

ISSN 2410-7360 (Print)
ISSN 2411-3913 (Online)

Міністерство освіти і науки України

ВІСНИК

**ХАРКІВСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА**

СЕРІЯ

“ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ”

[illegible]

Випуск 61

[illegible]

Заснована 1970 року

Харків
2024

Засновник і видавець
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Міністерства освіти і науки України

Наукове фахове видання України категорії «А» в галузях наук:
10 Природничі науки за спеціальностями: 103 Науки про Землю, 106 Географія.
Наказ МОН України № 1643 від 28.12.2019 р.

Засновано у 1970 році
Періодичність виходу – 2рази на рік

УДК 55+91+502/504](062.552)

У *Віснику* розглянуто питання взаємодії суспільства і природи, раціонального використання та охорони природного середовища. Відображено результати досліджень у галузі геології, геохімії, гідро-геології, географії, екології та соціально-економічної географії.

Для науковців, фахівців і викладачів вищих закладів освіти.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 24 від 25.11.2024 р.).

Редакційна колегія:

д. геол.-мін. н., проф. **В. Г. Суярко** (голова редколегії); **О. В. Чуєнко** (відповідальний секретар); д. геол. н., проф. **О. В. Барташук**; д. геогр. н., проф. **О. М. Крайнюков**; д. геол.-мін. н., проф. **А. І. Лур'є**; д. геогр. н., проф. **Н. В. Максименко**; д. геогр. н., проф. **А. Н. Некос**; д. геогр. н., проф. **Л. М. Немець**; д. геогр. н., проф. **В. А. Пересацько**; д. геогр. н., проф. **К. Ю. Сегіда** (заступник голови); (Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна); д. техн. н., проф. **В. С. Білецький** (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); д. геол.-мін. н., проф., членкор. НАНУ **Е. Я. Жовинський** (Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України); д. геол.-мін. н., проф. **В. М. Загнітко** (Інститут геології Київського національного університету імені Тараса Шевченка); д. фіз.-мат. н., проф. **Г. Д. Коваленко** (Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України); д. техн. н., проф. **І. М. Фик** (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); д. геол. н. **Ю. В. Хоха** (Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України).

Іноземні члени редколегії: д. габілітований **Здислав Адамчик** (Інститут прикладної геології, м. Глівіце, Польща); д. географії, проф. **Олександр Володченко** (Інститут картографії Дрезденського технічного університету, Німеччина); д. геол. н. **Георгій Мелікадзе** (Інститут геофізики Тбіліського державного університету імені Івана Джавахішвілі, Грузія); д. філософії (геологічна розвідка) **Брюс Дж. Перрі**, Камлупс, Канада; д. філософії (геологічна інженерія) **Нуреддін Сааді** (Університет Тріполі, Лівія); д. геології, проф., декан факультету геології **Ахмет Сасмаз** (Фіратський університет, Туреччина); д. габіл., проф., **Анджей Томаш Солецкі** (Інституту геологічних наук Вроцлавського університету, Польща); д. географії, проф., завідувач кафедри географії і туризму **Сауліус Станайтіс** (Литовський університет освітніх наук, Литва); декан факультету гірничої справи, екології, керування процесами та геотехнології, проф. **Мичал Челар** (Кошицький Технічний університет, Словаччина); д. філософії (географія), ст. наук. співробітник **Антон Шкаруба** (Естонський університет наук про життя, Тарту, Естонія).

“Вісник” входить до наступних міжнародних баз даних: *WorldCat*, *BASE* (Bielefeld Academic Search Engine), *ResearchBible*, *SBB* (Staatsbibliothek zu Berlin), *Ulrich's Periodicals Directory*, *EBSCO*, *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *DOAJ*, *Web of Science* (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Адреса редакційної колегії: Україна, 61022, Харків, майдан Свободи, 4, ХНУ імені В. Н. Каразіна, факультет геології, географії, рекреації і туризму, тел. +38(057)707-53-56;

e-mail: geoeco-series@karazin.ua; сайт: <http://periodicals.karazin.ua/geoeco>

Тексти статей представлені у авторській редакції. Автори несуть повну відповідальність за зміст статей, а також добір, точність наведених фактів, цитат, власних імен та інших відомостей.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-04463 (Рішення № 1538 від 09.05.2024 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення. Протокол № 15).

© Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна, оформлення, 2024

Founder and Publisher
V.N. Karazin Kharkiv National University
of the Ministry of Education and Science of Ukraine

The Journal is a professional publication in the field of science:
10 Natural sciences by specialties: 103 Earth Sciences, 106 Geography.

MES Ukraine Order No 1643 of 28/12/2019

Established in 1970

Published 2 times a year

UDC 55+91+502/504](062.552)

Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology is devoted to the modern studies in the field of geology, geochemistry, hydrogeology, ecology and social and economic geography.

"Visnyk" is intended for scientists, specialists and university lecturers.

Approved for printing by the decision of the Academic Council of V. N. Karazin Kharkiv National University (protocol No. 24 dated 11/25/2024).

Editorial Board:

Suyarko, Vasyl – Chairman of the Editorial Board, DSc (Geology and Mineralogy), Professor; **Chuienko, Oleksandr** – Executive Secretary; **Bartashchuk, Oleksii** – DSc (Geology), Professor; **Kraynyukov, Oleksiy** – DSc (Geography), Professor; **Lurye, Anatoliy** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor; **Maksymenko, Nadija** – DSc (Geography), Professor; **Nekos, Alla** – DSc (Geography), Professor; **Niemets, Liudmyla** – DSc (Geography), Professor; **Peresadko, Vilina** – DSc (Geography), Professor; **Sehida, Kateryna** – Deputy Chairman, DSc (Geography), Professor (V. N. Karazin Kharkiv National University); **Biletsky, Volodymyr** – DSc (Technical), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; **Zhovinsky, Edward** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Corresponding member of the National Academy of Science of Ukraine, M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine; **Zagnitko, Vasyl** – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Kovalenko, Grygoriy** – DSc (Physics and Mathematics), Professor, Director Institute of high-energy physics and nuclear physics NSC "Kharkov Institute of Physics and Technology" National Academy of Science Ukraine; **Fyk, Ilyia** – DSc (Technical), Professor, Head of the Department of Oil, Gas and Condensate Production, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; **Khokha, Yurii** – DSc (Geology), Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NAS of Ukraine.

International Council: **Adamczyk, Zdzisław** – Dr. habil., Silesian University of Technology, Gliwice (Poland); **Wolodtschenko, Alexander** – DSc (Geography), Professor, Institute of Cartography, Dresden University of Technology (Germany); **Melikadze, George** – DSc (Geology), Institute of Geophysics, Ivane Javakhishvili Tbilisi State University (Georgia); **Bruce J. Perry** – PhD, Exploration Geologist, Kamloops (Canada); **Saadi, Nureddin** – PhD, University of Tripoli, Department of Geological Engineering (Libya); **Sasmaz, Ahmet** – DSc (Geology), Professor, Head of Geology Department, Firat University (Turkey); **Solecki, Andrzej Tomasz**, Dr. habil., Professor, Institute of Geological Science University of Wrocław, Wrocław University (Poland); **Stanaitis, Saulius** – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Geography and Tourism, Lithuanian University of Educational Science (Lithuania); **Cehlár, Michal** – PhD, Professor, Dean of Faculty of Mining, Ecology, Process Control and Geotechnology, Technical University of Košice (Slovakia); **Shkaruba, Anton** – PhD, Senior Researcher, Estonian University of Life Sciences (Estonia).

Visnyk is a specialized edition on geological and geographical sciences. Indexed in: *WorldCat*, *BASE* (Bielefeld Academic Search Engine), *ResearchBible*, *SBB* (Staatsbibliothek zu Berlin), *Ulrich's Periodicals Directory*, *EBSCO*, *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *DOAJ*, *Web of Science* (Emerging Sources Citation Index (ESCI)).

Address of the Editorial Board: Ukraine, Kharkiv, 61022, 4 Svobody Sq., V. N. Karazin Kharkiv National University, School of Geology, Geography, Recreation and Tourism, tel. +38(057)707-53-56;

e-mail: geoeco-series@karazin.ua; website: <http://periodicals.karazin.ua/geoeco>

The texts of the articles are presented in the original edition. The authors are fully responsible for the content of the articles, as well as the selection and accuracy of the given facts, quotations, proper names and other information.

Articles have undergone internal and external peer review.

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-04463 (Decision № 1538 dated May 9, 2024 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, Protocol № 15).

З М І С Т

ГЕОЛОГІЯ

Bondarenko Maksym, Kulyk Volodymyr

DETERMINATION OF SHALINESS PARAMETERS OF TERRIGENOUS ROCKS IN CASED BOREHOLES AND WHILE DRILLING BY RADIOACTIVE LOGGING COMBINATION	10

Гаврилюк Руслан, Шпак Олена, Логвиненко Ольга, Запольський Ігор

МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ОЦІНКИ СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА НАФТОПРОДУКТАМИ, СПРИЧИНЕНОГО ВІЙСЬКОВОЮ АГРЕСІЄЮ РФ ПРОТИ УКРАЇНИ	23

Горайнов Сергій

ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ ГЕОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	39

Загнітко Василь

ПРОБЛЕМИ ПОШУКІВ ТА ДІАГНОСТИКИ КАРБОНАТИТІВ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ	55

Medvid Halyna, Yanush Liubov, Solovey Tatiana, Harasymchuk Vasyl

GROUNDWATER POLLUTION RISKS ASSESSMENT IN UKRAINE-POLAND TRANSBOUNDARY AQUIFERS	64

Pyvovarov Anton

IMPACT OF THE PETRIVSKO-KREMINSKY DEEP FAULT ON THE FLUID MIGRATION IN ROCKS OF THE SVYATONIRSK BRACHYANTICLINE	76

Пушкарьов Олександр, Севрук Ірина, Деміхов Юрій, Зубко Олександр,

Долін Віталій, Шраменко Іван

ВПЛИВ СТРУКТУРИ МІНЕРАЛЬНОГО АДСОРБЕНТА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ФРАКЦІОНУВАННЯ ВАЖКИХ ІЗОТОПІВ ВОДНЮ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ	85

Рева Максим, Лисенко Олександр, Чомко Дмитро

ГЕОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В СХИЛОВИХ МАСИВАХ м. КИЇВ	97

Шевченко Тетяна, Мамчур Сергій, Курепа Ярослав, Матвєєв Андрій

ПАЛЕОГЕОГРАФІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПІЗНЬОЕОЦЕНОВИХ ВІДКЛАДІВ ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ У ЗВ'ЯЗКУ З ЇХ БУРШТИНОНОСНІСТЮ (НА ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ «ПРАВОБЕРЕЖНА»)	108

ГЕОГРАФІЯ

Bortnyk Sergii, Lavruk Tetiana, Peresadko Vilina

STRATEGIC SPATIAL PLANNING OF TERRITORIAL COMMUNITIES TO ACHIEVE THE UN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS	121

Venhryn Daria

URBAN INTEGRATION OF FORCED MIGRANTS: LESSONS FROM CANADA AND UKRAINE	137

Helevera Olha, Mostipan Mykola, Topolnyi Serhii

SUMMER AND AUTUMN LONG-TERM DYNAMIC OF AIR TEMPERATURE IN CENTRAL UKRAINE	144

Грушевський Олег, Міщенко Наталя, Яцишен Анатолій

РОЛЬ ТУРБУЛЕНТНИХ ПОТОКІВ ТЕПЛА ГРАНИЧНОГО ШАРУ АТМОСФЕРИ У ФОРМУВАННІ РАДІАЦІЙНИХ ТУМАНІВ	156

Гудзеляк Ірина

ДЕМОГРАФІЧНИЙ РОЗВИТОК КРАЇН ПІВНІЧНОЇ ЄВРОПИ: АКТУАЛЬНІ ТРЕНДИ ДЛЯ УКРАЇНСЬКОГО ДОСВІДУ	166

Затула Василь

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОСУШЛИВОСТІ КЛІМАТУ УКРАЇНИ	180

Kravchenko Kateryna, Niemets Liudmyla, Sehida Kateryna

WAR CONSEQUENCES AND PROSPECTS FOR POST-WAR RECONSTRUCTION (CASE OF UKRAINIAN URBAN AGGLOMERATIONS)	193

Kravchynskiy Ruslan, Khilchevskiy Valentyn, Korchemlyuk Marta,

Zabokrytska Myroslava, Stefurak Olga, Belmega Ivan

THE ROLE OF HYDROLOGICAL FACTORS IN THE DIE-BACK OF THE EUROPEAN SPRUCE IN THE TERRITORY OF THE SOUTHEAST CARPATHIANS	212

Lykhovyd Pavlo, Vozhehova Raisa, Averchev Oleksandr

USING REMOTE SENSING NORMALISED DIFFERENCE VEGETATION INDEX TO RECOGNISE IRRIGATED CROPLANDS VIA AGROLAND CLASSIFIER APPLICATION	223

Margaryan Varduhi, Sedrakyan Armen, Reshetchenko Svitlana

POSSIBLE DETERMINATION OF TEMPERATURE AND SPACE-TIME PROBABLE DISTRIBUTION OF AIR TEMPERATURE IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ARMENIA	234

Провотар Наталія, Щурик Христина, Мезенцев Костянтин

МІСЬКИЙ РОЗВИТОК, ЗАСНОВАНИЙ НА ЗНАННЯХ: МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ЛЬВОВА ЯК МІСТА ЗНАНЬ	242

Trofymenko Petro, Minzhynner Anna, Zatserkovnyi Vitalii, Stakhiv Iryna, Kobylenska Svitlana

CARTOGRAPHIC AND ANALYTICAL ASSESSMENT OF LAND PRICE FORMATION DEPENDING ON THE PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY UNDER MILITARY AGGRESSION IN UKRAINE	259

Tuchkovenko Yurii, Loboda Nataliia, Ovcharuk Valeriya

KEY ASPECTS OF SEAWATER INTRUSION IN THE DNIESTER RIVER DURING STORM SURGES	272

Huseynov Jamal, Tagiyev Allahverdi

CURRENT SITUATION OF GLACIER AND SNOW GLADES IN THE SOUTHERN MOUNTAIN AREA OF LESSER CAUCASUS PROVINCE	288

ЕКОЛОГІЯ

<i>Awwal Yasin Agono, Muhammad Fatihu Ruqayyah</i> SPATIAL VARIABILITY OF SOME SOIL PROPERTIES AROUND ZARIA AREA, KADUNA STATE, NIGERIA	303
<i>Кравцова Ірина, Сонько Сергій, Василенко Ольга, Гурський Ігор, Огілько Станіслав</i> ФОРМУВАННЯ БІОЦЕНОЗІВ У ПРИДОРОЖНІХ ЛАНДШАФТАХ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ	313
<i>Крайнюк Олена, Буц Юрій, Барбашин Віталій, Нікітченко Ольга, Сухов Валерій</i> ДЕГРАДАЦІЯ ЕКОСИСТЕМ У ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ПІД ЧАС ВІЙНИ: СУПУТНИКОВИЙ АНАЛІЗ	329
<i>Latipov Normurod, Komilova Nilufar, Makhmudov Bakhodirjon, Berdiev Khayriddin, Moslemzadeh Mehrdad, Chulliyev Suhrob, Murtazayev Isabek, Hamroyev Mukhtor</i> ECONOMETRIC MODELING AND FORECASTING OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF CITIES AND POPULATION HEALTH PROBLEMS: CASE STUDY OF NAVOI AND ZARAFSHAN CITIES	344
<i>Mammadov Adik, Abdullayev Asadulla</i> THE MAIN CAUSES OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS (Pb, Cd, Hg) ON THE NORTHEASTERN SLOPE OF THE LESSER CAUCASUS OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN	358
<i>Суярко Василь, Улицький Олег, Сердюкова Ольга</i> ФАКТОРИ І ПРОЦЕСИ ЗАБРУДНЕННЯ СУПУТНЬО-ПЛАСТОВИМИ ВОДАМИ ТА НАФТОПРОДУКТАМИ ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА	369
<i>Hazarika Bharati, K. Kar Bimal</i> WATER SECURITY STATUS AND ASSOCIATED CHALLENGES IN GUWAHATI CITY (INDIA)	377
<i>Khalilov Ilgar, Eminov Farhad</i> AGAINST THE BACKGROUND OF GLOBAL CLIMATE CHANGES, THE CURRENT ECOLOGICAL SITUATION OF AZERBAIJAN'S WATER RESOURCES AND THE DIRECTIONS OF EFFICIENT USE	392
<i>Chernogor Leonid, Nekos Alla, Titenko Ganna, Chornohor Leonid</i> ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE CATASTROPHIC DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM	399
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ»	411

CONTENT

GEOLOGY

Bondarenko Maksym, Kulyk Volodymyr

- DETERMINATION OF SHALINESS PARAMETERS OF TERRIGENOUS ROCKS
IN CASED BOREHOLES AND WHILE DRILLING
BY RADIOACTIVE LOGGING COMBINATION 10

Havryliuk Ruslan, Shpak Olena, Lohvynenko Olha, Zapolskiy Igor

- METHODICAL ASPECTS OF THE ASSESSMENT OF THE STATE OF SUBSURFACE
CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS CAUSED BY THE MILITARY
AGGRESSION OF THE RUSSIAN FEDERATION AGAINST UKRAINE 23

Goryainov Sergey

- TRANSFORMATIVE CAPABILITIES OF GEOLOGICAL PROCESSES 39

Zagnitko Vasyl

- PROBLEMS OF SEARCH AND DIAGNOSIS
OF CARBONATITES ON THE TERRITORY OF UKRAINE 55

Medvid Halyna, Yanush Liubov, Solovey Tatiana, Harasymchuk Vasyl

- GROUNDWATER POLLUTION RISKS ASSESSMENT
IN UKRAINE-POLAND TRANSBOUNDARY AQUIFERS 64

Pyvovarov Anton

- IMPACT OF THE PETRIVSKO-KREMINSKY DEEP FAULT ON THE FLUID
MIGRATION IN ROCKS OF THE SVYATOHIRSK BRACHYANTICLINE 76

Pushkarov Oleksandr, Sevruck Iryna, Demikhov Yuriy, Zubko Oleksandr,

Vitaliy Dolin, Shramenko Ivan

- INFLUENCE OF MINERAL ADSORBENT ON EFFICIENCY OF FRACTIONATION
OF HEAVY HYDROGEN ISOTOPES IN AQUEOUS SOLUTIONS 85

Reva Maksym, Lysenko Oleksandr, Chomko Dmytro

- RHEOLOGICAL PROCESSES IN THE SLOPE MASSIFS OF THE CITY OF KYIV 97

Shevchenko Tetiana, Mamchur Serhii, Kurepa Yaroslav, Matveyev Andriy

- THE PALEOGEOGRAPHIC CONDITIONS FOR THE LATE EOCENE SEDIMENTS
OF ZHYTOMYR POLISSYA IN CONNECTION WITH THEIR AMBER CONTENT
(ON THE EXAMPLE OF THE «PRAVOBEREZHZHNA» SITE) 108

GEOGRAPHY

Bortnyk Sergii, Lavruk Tetiana, Peresadko Vilina

- STRATEGIC SPATIAL PLANNING OF TERRITORIAL COMMUNITIES
TO ACHIEVE THE UN SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS 121

<i>Venhryn Daria</i>	
URBAN INTEGRATION OF FORCED MIGRANTS: LESSONS FROM CANADA AND UKRAINE	137
<i>Helevera Olha, Mostipan Mykola, Topolnyi Serhii</i>	
SUMMER AND AUTUMN LONG-TERM DYNAMIC OF AIR TEMPERATURE IN CENTRAL UKRAINE	144
<i>Hrushevskyi Oleh, Mishchenko Natalia, Yatsyshen Anatolii</i>	
THE ROLE OF TURBULENT HEAT FLOWS OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN THE FORMATION OF RADIATION FOGS	156
<i>Hudzelyak Iryna</i>	
DEMOGRAPHIC DEVELOPMENT OF THE COUNTRIES OF NORTHERN EUROPE: CURRENT TRENDS FOR THE UKRAINIAN EXPERIENCE	166
<i>Zatula Vasyl</i>	
COMPLEX ASSESSING OF ARIDITY IN UKRAINE	180
<i>Kravchenko Kateryna, Niemets Liudmyla, Sehida Kateryna</i>	
WAR CONSEQUENCES AND PROSPECTS FOR POST-WAR RECONSTRUCTION (CASE OF UKRAINIAN URBAN AGGLOMERATIONS)	193
<i>Kravchynskyi Ruslan, Khilchevskyi Valentyn, Korchemlyuk Marta, Zabokrytska Myroslava, Stefurak Olga, Belmega Ivan</i>	
THE ROLE OF HYDROLOGICAL FACTORS IN THE DIE-BAK OF THE EUROPEAN SPRUCE IN THE TERRITORY OF THE SOUTHEAST CARPATHIANS	212
<i>Lykhovyd Pavlo, Vozhehova Raisa, Averchev Oleksandr</i>	
USING REMOTE SENSING NORMALISED DIFFERENCE VEGETATION INDEX TO RECOGNISE IRRIGATED CROPLANDS VIA AGROLAND CLASSIFIER APPLICATION	223
<i>Margaryan Varduhi, Sedrakyan Armen, Reshetchenko Svitlana</i>	
POSSIBLE DETERMINATION OF TEMPERATURE AND SPACE-TIME PROBABLE DISTRIBUTION OF AIR TEMPERATURE IN THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF ARMENIA	234
<i>Provotar Nataliia, Shchuryk Khrystyna, Mezentsev Kostyantyn</i>	
KNOWLEDGE-BASED URBAN DEVELOPMENT: OPPORTUNITIES FOR LVIV AS A KNOWLEDGE CITY	242
<i>Trofymenko Petro, Minzhynner Anna, Zatserkovnyi Vitalii, Stakhiv Iryna, Kobylenska Svitlana</i>	
CARTOGRAPHIC AND ANALYTICAL ASSESSMENT OF LAND PRICE FORMATION DEPENDING ON THE PHYSICAL AND GEOGRAPHICAL CONDITIONS OF THE TERRITORY UNDER MILITARY AGGRESSION IN UKRAINE	259
<i>Tuchkovenko Yurii, Loboda Nataliia, Ovcharuk Valeriya</i>	
KEY ASPECTS OF SEAWATER INTRUSION IN THE DNIESTER RIVER DURING STORM SURGES	272
<i>Huseynov Jamal, Tagiyev Allahverdi</i>	
CURRENT SITUATION OF GLACIER AND SNOW GLADES IN THE SOUTHERN MOUNTAIN AREA OF LESSER CAUCASUS PROVINCE	288

ECOLOGY

<i>Awwal Yasin Agono, Ruqayyah Muhammad Fatihu</i> SPATIAL VARIABILITY OF SOME SOIL PROPERTIES AROUND ZARIA AREA, KADUNA STATE, NIGERIA	303
<i>Kravtsova Iryna, Sonko Sergiy, Vasylenko Olga, Gursky Ihor, Ogilko Stanislav</i> FORMATION OF BIOCEANOSES IN ROADSIDE LANDSCAPES OF CHERKASY REGION	313
<i>Krainsiuk Olena, Buts Yuriy, Barbashyn Vitalii, Nikitchenko Olga, Sukhov Valerii</i> ECOSYSTEM DEGRADATION IN KHARKIV REGION DURING THE WAR: SATELLITE ANALYSIS	329
<i>Latipov Normurod, Komilova Nilufar, Makhmudov Bakhodirjon, Berdiev Khayriddin, Moslemzadeh Mehrdad, Chulliyev Suhrob, Murtazayev Isabek, Hamroyev Mukhtor</i> ECONOMETRIC MODELING AND FORECASTING OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF CITIES AND POPULATION HEALTH PROBLEMS: CASE STUDY OF NAVOI AND ZARAFSHAN CITIES	344
<i>Mammadov Adik, Abdullayev Asadulla</i> THE MAIN CAUSES OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS (Pb, Cd, Hg) ON THE NORTHEASTERN SLOPE OF THE LESSER CAUCASUS OF THE REPUBLIC OF AZERBAIJAN	358
<i>Suyarko Vasyly, Ulytskyi Oleg, Serdiukova Olga</i> FACTORS AND PROCESSES OF NATURAL ENVIRONMENT CONTAMINATION WITH SUBSTITUTE WATERS AND PETROLEUM PRODUCTS	369
<i>Hazarika Bharati, K. Kar Bimal</i> WATER SECURITY STATUS AND ASSOCIATED CHALLENGES IN GUWAHATI CITY (INDIA)	377
<i>Khalilov Ilgar, Eminov Farhad</i> AGAINST THE BACKGROUND OF GLOBAL CLIMATE CHANGES, THE CURRENT ECOLOGICAL SITUATION OF AZERBAIJAN'S WATER RESOURCES AND THE DIRECTIONS OF EFFICIENT USE	392
<i>Chernogor Leonid, Nekos Alla, Titenko Ganna, Chornohor Leonid</i> ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE CATASTROPHIC DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR DAM	399
REQUIREMENTS TO THE MATERIALS SUBMITTED TO THE "VISNYK OF V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY"	411

ГЕОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-01>

UDC 550.832.5

Received 24 July 2024

Accepted 2 November 2024

Determination of shaliness parameters of terrigenous rocks in cased boreholes and while drilling by radioactive logging combination

Maksym Bondarenko¹

PhD (Geology), Head of oil-and-gas geophysics department,

¹ S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine,

e-mail: msbondarenko1979@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-9293-6997>;

Volodymyr Kulyk¹

PhD (Physics and Mathematics), Senior Researcher,

Leading Researcher of oil-and-gas geophysics department,

e-mail: vkulyk@igph.kiev.ua,  <https://orcid.org/0009-0004-4193-5619>

ABSTRACT

Introduction. Shaliness is an important lithological and petrophysical characteristic of reservoirs and seals in section of oil-and-gas boreholes as well as near-surface rocks (grounds) as the basis of buildings and engineering structures. Granulometric shaliness, determined by the presence of pelitic particles, and mineral shaliness, which characterizes the content of clay minerals, are distinguished in terrigenous rocks. In the sections of oil-and-gas fields, granulometric shaliness is one of the criteria for identifying reservoirs and affects their reservoir properties. The physical properties of reservoirs, which are studied by borehole logging, depend on the content and type of clay minerals. Information about clay minerals is taken into account when drilling and stimulation of hydrocarbon production. Shaly grounds apply to the group of cohesive ones, which in construction most often serve as the foundations of structures. At that these grounds are classified as difficult engineering-geological conditions for construction, since clay minerals specifically affect their strength, stability, etc. In oil-and-gas and engineering-geological boreholes the empirical equations relating gamma-ray logging readings and granulometric shaliness are most often used for quantitative estimation. Herewith, it is traditionally thought that the clay minerals make up the bulk of the pelitic particles.

The paper is concerned with increasing the informativity of the borehole logging while investigating the shaliness of terrigenous oil-and-gas reservoirs and near-surface rocks based on a combination of gamma-ray logging, gamma-gamma density logging and neutron-neutron logging (GR+DL+NL).

The investigation methodology included: borehole geophysical measurements by tools created at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine independently and in collaboration with partner organizations; interpretation and analysis of logging data; justification and development of approaches to increase the informativity of the GR+DL+NL combination; estimation of the effectiveness of author's developments using independent criterions.

As a result of the investigation, on the basis of the abovementioned logging combination, the set of determined parameters is increased as compared with the traditional practice; number of new methods is developed for determining the parameters of shaliness, among them the content of clay minerals, their density and hydrogen index. The use of these parameters, in turn, improves the accuracy of porosity determination and other reservoir properties from logging data. Method for estimating the type of clay mineral according to the GR+DL+NL data is proposed. The method is an available alternative to geochemical core studies and to more expensive and difficult logging methods.

The novelty of the developments is confirmed by patents, and their effectiveness is confirmed by the results of borehole tests and comparison with independent determinations of parameters (laboratory core examinations, control logging data).

Practical significance. The proposed approaches are an important component of technologies for investigating oil-and-gas reservoirs and near-surface rocks, which are being developed at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Keywords: sand-shale rock; oil-and-gas reservoir; ground; combination of gamma-ray logging, gamma-gamma density logging and neutron-neutron logging; gamma-ray index; hydrogen index; density; clay mineral.

In cites: Bondarenko Maksym, Kulyk Volodymyr. (2024). Determination of shaliness parameters of terrigenous rocks in cased boreholes and while drilling by radioactive logging combination. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 10-22. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-01>

Introduction

Terrigenous (sand-shale) rocks prevail among sedimentary rocks of both oil-and-gas fields and engineering-construction sites. Shaliness is an important lithological and petrophysical characteristic of this rocks [1–4].

Terminology. The term «shaliness» is ambigu-

ous. In Soviet and post-Soviet special literature, granulometric and mineral shaliness, as well as insoluble residue (for carbonate deposits) are distinguished. *Granulometric shaliness* (or shale material) is determined by the presence of small pelitic particles in the rock (as is the convention, less than 0,01 mm) regardless of their mineral composition (main-

ly clay minerals, as well as quartz, feldspar, etc.). *Mineral shaliness* characterizes the content of clay minerals proper in the rock. The main among them are kaolinite, montmorillonite, chlorite and hydromicas [2, 5, 6].

In modern Western geological science, the term «*shale*» corresponds to granulometric shaliness, and «*clay*» corresponds to mineral shaliness. Log interpreters and petrophysicists often use these terms interchangeably as equivalent. This is explained by the common point about the predominance of clay minerals as a part of shale material, as well as the frequent lack of a priori data on percentage of clay in shale for a particular oil-gas field or section [7–9].

In the paper, we will use modern Western terminology [8].

Problem statement. Shale content is one of the factors in classing rocks into reservoirs and non-reservoirs for most terrigenous sections of oil-and-gas fields, as well as in classing reservoirs into layers with different reservoir properties (porosity, permeability, residual fluid saturation). Clay content, type and properties of clay minerals effect the physical properties of reservoirs (resistivity, radioactivity, elastic and neutron properties, etc.), which are investigated by geophysical borehole methods. Information about the mineral composition of shale material should be taken into account during drilling and procedures in the hydrocarbon production (in particular, shale gas). For example, montmorillonite is characterized by high swelling under the action of water, that must be taken into account when choosing a drilling mud. The plasticity of montmorillonite makes hydraulic fracturing (HF) difficult, and hydromica indicates rock brittleness, which favours HF. Kaolinite is a non-swelling mineral. It has the following features: the ability to relatively easily separate from quartz grains, be carried by the flow of hydrocarbons during their production, and to block pores, reducing permeability. Swelling is also not inherent in chlorite. However, this mineral loses iron under the action of acid treatment during the stimulation of production. That can lead to a loss of production rate due to the precipitation of a jellylike iron-bearing compound in the pores [2, 4, 8–12].

Shale material has a strong influence on the properties of the near-surface rocks (grounds) as the basis of engineering structures. Shale grounds and loess grounds are classified as difficult engineering-geological conditions for construction. Therefore, the investigation of shaliness is an important problem of engineering geology. At that, it is necessary to obtain information not only about the total content of shale material, but also about the clay minerals, which are contained in sand-shale grounds and specifically affect its strength and stability [3,13,14].

Single geophysical borehole methods are traditionally used to qualitatively and quantitatively es-

timating the rock shaliness in a well section: first of all, spontaneous potential and integral gamma-ray logging (GR). Their effectiveness is generally confirmed by long-term practice [5, 8, 15, 16]. At that, particularly gamma-ray logging application is usually limited to lithological layering and estimation of the shale content.

There are approaches for estimating clay content based on a combination of porosity determination methods: density gamma-gamma logging (DL), neutron-neutron logging (NL) and acoustic logging [17, 18].

Foreign companies use data from spectral gamma-ray logging, litho-density logging, pulsed neutron spectroscopy logging, etc. for estimating the type and content of specific clay minerals [8, 19–22]. However, the appropriate Western tools and techniques are expensive and not always adapted for use in specific conditions (logging while drilling, cased engineering-geological boreholes of small diameter, etc.).

Analysis of previous investigations

Parameters of mass and volume shaliness.

There are appropriate mass and volume parameters to quantitatively characterize the content of shale material and content of clay minerals in a rock. These parameters are important in itself, they are used in the generation of petrophysical equations and interpretation of results of geophysical borehole investigation for determining rock properties.

In petrophysics, the *mass content of shale* C_{sh} is determined by the data of granulometric analysis of rock sample as the ratio of the mass of shale material m_{sh} to the mass of solid phase m_s of the rock sample [2]:

$$C_{sh} = \frac{m_{sh}}{m_s}. \quad (1)$$

The part of the rock volume filled by shale material is characterized by the *volume content of shale* K_{sh} [2]:

$$K_{sh} = \frac{\delta_s}{\delta_{sh}} C_{sh} (1 - \phi). \quad (2)$$

Here, ϕ is the total porosity of the rock as the sum of open and closed porosity; δ_s is the density of solid phase of rock; δ_{sh} is the density of shale.

Along with the shale parameters, there is a need to obtain the mass content of clay and volume content of clay directly.

The *mass content of clay* C_{cl} is ratio of the mass of clay minerals m_{cl} to the mass of solid phase m_s of the rock:

$$C_{cl} = \frac{m_{cl}}{m_s}. \quad (3)$$

The value of C_{cl} can be estimated by laboratory methods based on X-ray diffraction analysis or rese-

arching the cation exchange capacity [7–10].

The volume content of clay K_{cl} is part of the rock volume filled by clay minerals [8]:

$$K_{cl} = \frac{\delta_s}{\delta_{cl}} C_{cl} (1 - \phi). \quad (4)$$

where δ_{cl} is density of clay minerals.

In order to determine the volume parameters K_{sh} and K_{cl} , in addition to the mass parameters C_{sh} and C_{cl} , it is necessary to know the density parameters δ_s , δ_{sh} and δ_{cl} , as well as the total porosity ϕ . Density and porosity parameters can be known from laboratory-based core analysis. Density parameters can be estimated from geophysical borehole logging (e.g., by the radioactive logging combination with using a priori data [23]), and porosity ϕ is determined from neutron-neutron logging or density gamma-gamma logging, as well as from acoustic logging.

In many cases, the density of clay minerals mixture δ_{cl} is close to the density of the matrix of sandstones [2] therefore simplified versions of formulas (2) and (4) can be used in practice:

$$K_{sh} = C_{sh} (1 - \phi), \quad (5)$$

$$K_{cl} = C_{cl} (1 - \phi). \quad (6)$$

Estimation of shale content by gamma-ray logging. The presence of shale material (and, accordingly, clay minerals) in the borehole section has effect on the readings of most logging methods. In order to corresponding quantitative estimate in borehole conditions, single logging methods are traditionally used, as well as combinations of methods [5, 7, 8, 16, 17, 24].

In practice, gamma-ray logging and the simplest empirical models are most often used to determine the shale content of terrigenous rocks [16]. Shale is characterized by increased radioactivity due to the large specific surface area of pelitic particles, that sorb salts of radioactive elements (mainly uranium-radium and thorium isotopes, as well as the ^{40}K isotope), and because of the presence of potassium in some clay minerals and in feldspar. This, in fact, makes it possible to distinguish rocks by shale content and quantifying it according to the GR data [5, 8].

In order to quantify the shale content of rocks C_{sh} in the section of oil-and-gas and engineering-geological boreholes, it is conventionally to employ the correlation between the C_{sh} parameter, which is determined in the laboratory, and the interpretive parameter of gamma-ray logging in the form of index ΔI_γ [5, 8, 14, 16]:

$$\Delta I_\gamma = f_1(C_{sh}). \quad (7)$$

Index of gamma-ray logging ΔI_γ is determined as follows:

$$\Delta I_\gamma = \frac{I_\gamma - I_\gamma^{\min}}{I_\gamma^{\max} - I_\gamma^{\min}}, \quad (8)$$

where I_γ is readings of the GR detector along the borehole; $I_\gamma^{\min}$ and $I_\gamma^{\max}$ are the reference readings of the GR detector (commonly this values are determined in slightly radioactive bed and in shale bed with high gamma-ray activity, respectively) [5, 8, 9, 14–16, 24–26].

Petrophysicists have proposed a lot of variants of equations depicting the correlation between shale content and GR readings for specific fields or sediments of a certain type [16].

There are known Larionov's [27] dependences of GR index on mass content of shale C_{sh} in terrigenous rocks. These dependences are widely used in the territory of the former USSR and in other countries [6, 8, 16, 26, 28]. The generalized dependence for quartz sandstones [5] is shown in Fig. 1a, curve 1:

$$\Delta I_\gamma = -1,28C_{sh}^2 + 2,28C_{sh}. \quad (9)$$

This dependence is the graduation characteristic of the gamma-ray logging.

The corresponding calibration function of gamma-ray logging for determining the mass content of shale is shown in Fig. 1b, curve 1:

$$C_{sh}^\gamma = 2,60\Delta I_\gamma^4 - 3,35\Delta I_\gamma^3 + 1,78\Delta I_\gamma^2 + 0,15\Delta I_\gamma. \quad (10)$$

The purpose of the paper is increasing the informativity and improving the accuracy of logging in determining the parameters of shaliness and other parameters of rocks, which require information about shaliness. The emphasis in the study is on logging when there is a steel string (drill one or casing one) in the borehole.

Methods, materials, petrophysical model

At the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (IGPh) has been created a number of new methods based on the combination of gamma-ray logging, density gamma-gamma logging and neutron-neutron logging (GR+DL+NL) for determining parameters of shaliness [23, 29, 30]. These developments allow to increase the number of determined rock parameters and achieve the purpose of investigation. Above-noted radioactive logging methods are universal in regard to borehole conditions (logging-while-drilling, logging in open and cased oil-and-gas boreholes, logging in near-surface engineering-geological boreholes, etc.). The methods are successfully used in practice and are traditional to well-log analysts.

The paper uses the results of field works carried out in cooperation with partner organizations at oil-and-gas and methane-coal fields, at engineering-geological sites (SOE «Enerhoproekt», LLC «Ukrspetsheolohiia», LLC «Ukrspetsprylad»). The measurements were performed with the help of tools, which created at the IGPh independently and in

cooperation with partner organizations within the terms of scientific cooperation agreements. Laboratory data and control logging results, which have been provided by partner organizations, were used as an independent criterion for estimating efficiency of the author's developments.

We have taken into consideration the following

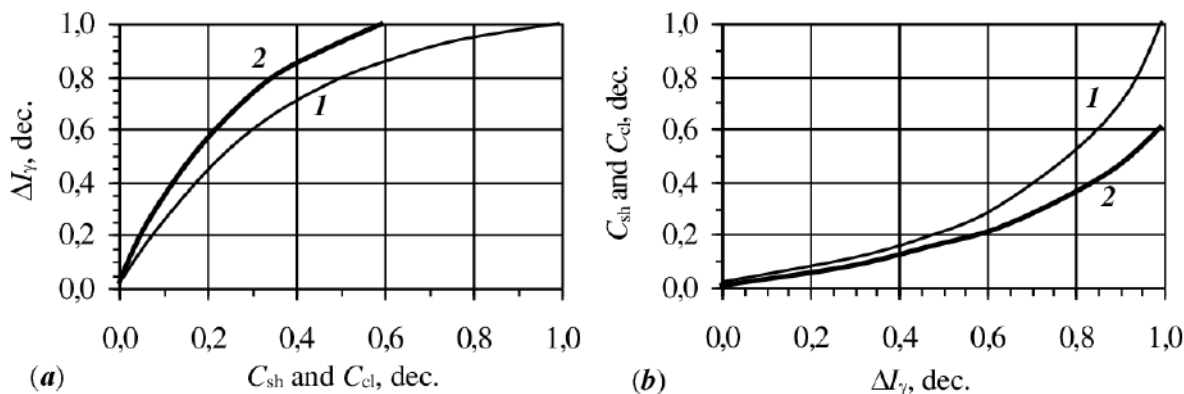


Fig. 1. Graduation characteristics (a) and calibration functions (b) of the gamma-ray logging
1 – mass content of shale C_{sh} ; 2 – mass content of clay C_{cl} ; dec. – decimal fraction

petrophysical model of terrigenous rock. The rock consists of a solid phase and pore space filled with fluid (water, oil) and gaseous phases in various proportions. The pores can be open, closed, or mixed. The solid phase of the rock consists of skeleton (quartz grains $\sim 1,0 \div 0,01$ mm in size) and shale material (particles smaller than 0,01 mm). Shale material includes clay minerals, fine quartz particles and other minerals (feldspars, carbonates, etc.). Clay minerals contain chemically bound water and are characterized by their chemical composition, density and hydrogen index.

Results and analysis

Determining clay content by gamma-ray logging. Log analysts have long noted that the usage of shale content based on traditional empirical models of type (7) often leads to inaccurate estimation of reservoir properties, in particular porosity based on neutron-neutron logging, acoustic logging, etc. The main mistake here is to assume that the shale material contains 100 % clay minerals [7, 9, 16]. Another disadvantage of this approach is the incorrectness of using the shale content to quantify the hydrogen index of clay minerals by the radioactive logging combination (GR+DL+NL) [30].

Core analysis using X-ray diffraction [31] showed that the relative mass of clay minerals C_{cl} is 50÷70 % of shale material, 25÷45 % are quartz particles and 5 % – other minerals. On a bounded interval of C_{cl} values, Bhuyan and Passey [7] established relationship between the parameters C_{cl} and ΔI_γ .

Taking into account the results of Bhuyan and Passey [7] and based on own experience in interpretation of GR data, we proposed (Fig. 1a, curve 2)

generalized graduation characteristic of GR for the content of clay minerals $\Delta I_\gamma = f_2(C_{cl})$, which in our case is described by the equation

$$\Delta I_\gamma = -2,52C_{cl}^2 + 3,18C_{cl}. \quad (11)$$

The corresponding calibration function of the GR for determining the mass content of clay minerals along the borehole section (Fig. 1b, curve 2) is as follows [30]:

$$C_{cl}^\gamma = 0,74\Delta I_\gamma^4 - 0,84\Delta I_\gamma^3 + 0,51\Delta I_\gamma^2 + 0,20\Delta I_\gamma. \quad (12)$$

The obtained dependence allows to abandon the generally accepted assumption [2, 8] that the shale material contains predominantly of clay minerals, and therefore it was assumed that $C_{cl} \approx C_{sh}$. At the current level to solve practical problems, when a priori the percentage of clay minerals is unknown and it is not possible to establish the graduation characteristic $\Delta I_\gamma = f_2(C_{cl})$, the «predominant» content of C_{cl} can be expressed by the approximate relation $C_{cl} \approx 0,6C_{sh}$ (i.e., the part of clay minerals in the total mass of shale material is ~ 60 % wt.) [30].

Volume contents of shale and clay. GR+NL combination. To determine the volume content of shale K_{sh} (5), it is necessary to know the porosity of the rock ϕ , in addition to the parameter C_{sh} . According to Larionov [27], the parameter ϕ is determined using a combination of methods NL+GR (or neutron-gamma logging + GR). This porosity ϕ can be used in equation (5) to obtain K_{sh} . According to the NL+GR combination, the last is determined as

$$K_{sh}^{\gamma+n} = \frac{C_{sh}^\gamma (1 - \phi^n)}{1 - \varpi_{sh} C_{sh}^\gamma}, \quad (13)$$

where ϕ^n is porosity by NL («neutron» porosity), associated with the total hydrogen content in the rock (in pore water, clay minerals, etc.); ϖ_{sh} – estimated, according to preliminary data, the value of the hydrogen index of the shale material.

The parameter K_{cl} is related to C_{cl} by relation (6), and the total porosity ϕ , using NL, is equal to

$$\phi = \phi^n - \varpi_{cl} K_{cl}, \quad (14)$$

where ϖ_{cl} is hydrogen index of the clay minerals, which a priori specified on the basis of a generalization of independent studies [e.g., 5, 8].

Solving the system of equations (6) and (14) for K_{cl} , we obtain the volume content of clay minerals by the GR + NL combination:

$$K_{cl}^{\gamma+n} = \frac{C_{cl}^{\gamma}(1-\phi^n)}{1-\varpi_{cl}C_{cl}^{\gamma}}. \quad (15)$$

Thus, according to (13) and (15), the volume content of shale and the volume content of clay minerals can be determined from GR and NL data with the corresponding a priori accepted values of the hydrogen index of shale material and clay minerals [30].

GR+DL combination. To quantify the hydrogen indices of shale material and clay minerals in formulas (13) and (15), the traditional approach involves core sampling, laborious and expensive laboratory tests. At the same time, the problem of obtaining the parameters K_{sh} and K_{cl} without using predetermined values of ϖ_{sh} and ϖ_{cl} is solved using purely radioactive methods. To do this, in formulas (5) and (6) we use the mass parameters C_{sh}^{γ} and C_{cl}^{γ} by the GR and porosity by the density logging ϕ^d .

The total water-saturated porosity by the DL is determined as

$$\phi = \phi^d = \frac{\delta_s - \delta^d}{\delta_s - \delta_w}, \quad (16)$$

where δ_s is the density of the solid phase of the rock (quartz skeleton together with shale material); δ_w – density of water in pore space; δ^d – density of rock along the borehole, determined by the calibration function of the DL tool. Approximate values of parameters δ_s and δ_w for sand-shale rocks can be considered a priori given [5].

Substituting $\phi = \phi^d$ into equations (5) and (6), we obtain the desired value of the parameters K_{sh} and K_{cl} :

$$K_{sh}^{\gamma+d} = C_{sh}(1-\phi^d), \quad (17)$$

$$K_{cl}^{\gamma+d} = C_{cl}(1-\phi^d). \quad (18)$$

Thus, according to expressions (17) and (18), the volume contents of shale material and clay min-

erals, $K_{sh}^{\gamma+d}$ i $K_{cl}^{\gamma+d}$, are determined by the GR+DL data.

Hydrogen index of clay minerals and shale material. The hydrogen index of clay minerals ω_{cl} along a particular borehole section has independent significance, since together with the density of clay minerals makes it possible to identify the presence of specific clay minerals. The parameter ω_{cl} of water-saturated rocks can be determined from the results of GR+DL+NL combination.

The problem is solved by equating to the porosity on the basis of NL (Eq. 14) and the porosity on the basis of DL (Eq. 16). Let's solve the resulting equation for the parameter ω_{cl} , using expression (18) for the parameter K_{cl} . As a result, we get

$$\omega_{cl}^{\gamma+d+n} = \frac{\phi^n - \phi^d}{C_{cl}^{\gamma}(1-\phi^d)}. \quad (19)$$

The difference between ϕ^n («neutron» porosity by NL) and ϕ^d («true» porosity by DL), $\Delta_{ch.b.w.} = \phi^n - \phi^d = \omega_{cl}K_{cl}$, has the meaning of apparent porosity due to chemically bound water in clay minerals.

Thus, according to Eq. (19), the hydrogen index of clay minerals along the borehole section can be determined by the GR+DL+NL combination [30].

The averaged value $\omega_{cl}^{\gamma+d+n}$ (over selected layers or over borehole section) can be used in Eq. (15) when determining the parameter $K_{cl}^{\gamma+n}$ by GR+ NL.

When determining the volume shale content using Eq. (13), there are difficulties in choosing a specific value of the hydrogen index of the shale material ω_{sh} . At the same time, the parameter ω_{cl} , associated with ω_{sh} , is determined by the GR+DL+NL combination (Eq. 19). Using the relationships $C_{sh}\omega_{sh} = C_{cl}\omega_{cl}$ and $C_{cl} \approx 0,6C_{sh}$, we obtain an approximate value of the hydrogen index of the shale material:

$$\omega_{sh}^{\gamma+d+n} \approx 0,6\omega_{cl}^{\gamma+d+n}. \quad (20)$$

If necessary, hydrogen index of shale material can be averaged layer-by-layer or along the investigated borehole section.

Thus, according to Eq. (20), the hydrogen index of the shale material can be determined from the GR+DL+NL combination [30].

Density of clay minerals. The density of the solid phase at full water saturation of the pores can be calculated using parameters, which are obtained by the radioactive logging combination (DL, NL, GR) [32], according to the equation:

$$\delta_s^{d+n+\gamma} = \frac{\delta^d - \delta_w\phi^{n+\gamma}}{1-\phi^{n+\gamma}}, \quad (21)$$

where $\delta_s^{d+n+\gamma}$ is the density of the solid phase of the rock by DL+NL+GR; δ^d – total rock density according to the DL; δ_w is the density of water, which is given a priori (for example, for fresh water 1,00 g/cm³); $\phi^{n+\gamma}$ – total porosity by the NL+GR combination using the calibration function of the NL tool for water-filled rocks under given measurement conditions and the relative content of clay minerals according to GR data.

In addition to the density of the solid phase, according to the proposed method [23], it is possible to determine the density of clay minerals and the density of shale material from the same radioactive combination (DL, NL, GR) together with a priori given constants.

According to the accepted petrophysical model, we use the relationship between the density of the solid phase δ_s of the sand-shale rock and the density of its components – clay minerals δ_{cl} and skeletal quartz grains together with quartz particles of shale material δ_q :

$$\delta_s = C_{cl}\delta_{cl} + C_q\delta_q, \quad (22)$$

where C_{cl} is relative mass content of clay minerals in the solid phase;

$C_q = (1 - C_{cl})$ is relative mass content of quartz in the solid phase.

In compliance with Eq. (22), the desired density of clay minerals is equal to:

$$\delta_{cl} = \frac{\delta_s - C_q\delta_q}{C_{cl}}. \quad (23)$$

Using Eq. (21) for density δ_s , we can rewrite Eq. (23) for the density of clay minerals as:

$$\delta_{cl}^{\gamma+d+n} = \frac{1}{C_{cl}^{\gamma}} \left[\frac{\delta^d - \phi^{n+\gamma}\delta_w}{1 - \phi^{n+\gamma}} - (1 - C_{cl}^{\gamma})\delta_q \right], \quad (24)$$

where δ_{cl} is the desired density of clay minerals; C_{cl}^{γ} is relative mass content of clay minerals in the solid phase of the rock, determined with the help of GR; δ_w and δ_q are a priori constants (densities of water and quartz, respectively) $\phi^{n+\gamma}$ is total porosity by the NL+GR combination; δ^d is total rock density according to the DL.

Suchwise, the density of clay minerals in the water-filled rocks according to the proposed method [23] is determined by calculation using Eq. (24) with the help of values directly measured by the radioactive logging combination (GR+DL+NL) and a priori specified constants.

The density of the shale material can be obtained in a similar way.

Estimation of clay mineral type. Determining the type of clay minerals in rock is actually a task of geochemistry [8]. An exact solution to this problem under borehole conditions can be obtained from the

results of core examination. However, researchers have developed a number of logging techniques for estimating clay minerals, including using neural networks [8, 19–22].

We propose to estimate type of clay mineral with the help of the GR+DL+NL combination. The hydrogen index ω_{cl} (19) and density δ_{cl} (24) of clay minerals together characterize a specific mineral. By means of plotting a crossplot of the parameters ω_{cl} and δ_{cl} , which are determined by the above-mentioned logging combination, it is possible to identify a clay mineral in a water-filled rock (see Fig. 2). To apply the method in oil-filled rocks, a priori data on the density of oil (or fluid in the invasion zone) is required. The method does not apply to gas-saturated rocks, since in such rocks both the neutron porosity and density porosity are apparent porosities.

Fig. 2 illustrates the crossplot $\delta_{cl} \leftrightarrow \omega_{cl}$ based on generalized measurement data in several engineering-geological boreholes for near-surface sand-shale rocks. The crossplot demonstrates the effectiveness of the proposed approach. Areas with a predominant content of a single mineral (montmorillonite, chlorite, hydromica) and a mix of minerals are identified on the crossplot.

Borehole examples of determination of shaliness parameters

Cased engineering-geological borehole. Fig. 3 gives an example of determining the shaliness parameters, density and total porosity of near-surface sand-shale rocks in the zone of full water saturation at the site of engineering-geological investigation. The site is located near the tailings dam of the Northern Mining and Processing Plant (Krivyi Rih). The logging was carried out using DL+GR and 2NL tools developed and made in the IGPh. Lithologically the borehole section is represented by grounds of varying degrees of shaliness (loam, shale, heavy shale). Control values of the parameters in Fig. 3 were obtained from laboratory petrophysical studies of rock samples taken along the borehole section. It can be seen that the logging determinations are in good agreement with independent laboratory data of shale and clay contents, total and solid phase densities, porosity.

For problems of oil-and-gas geophysics, given «cased borehole – near-surface rock» system acts as a full-scale model.

Logging-while-drilling of oil borehole. Determination of shaliness and other parameters according to logging-while-drilling (LWD) of deviated oil borehole (Dnipro-Donets depression (DDD), Poltava region) is shown in Fig. 4 for the terrigenous interval. The logging was carried out using the LWD-KPRK-48 tool, created by the IGPh and LLC "Ukrspetsprylad". The targeted operation reservoir

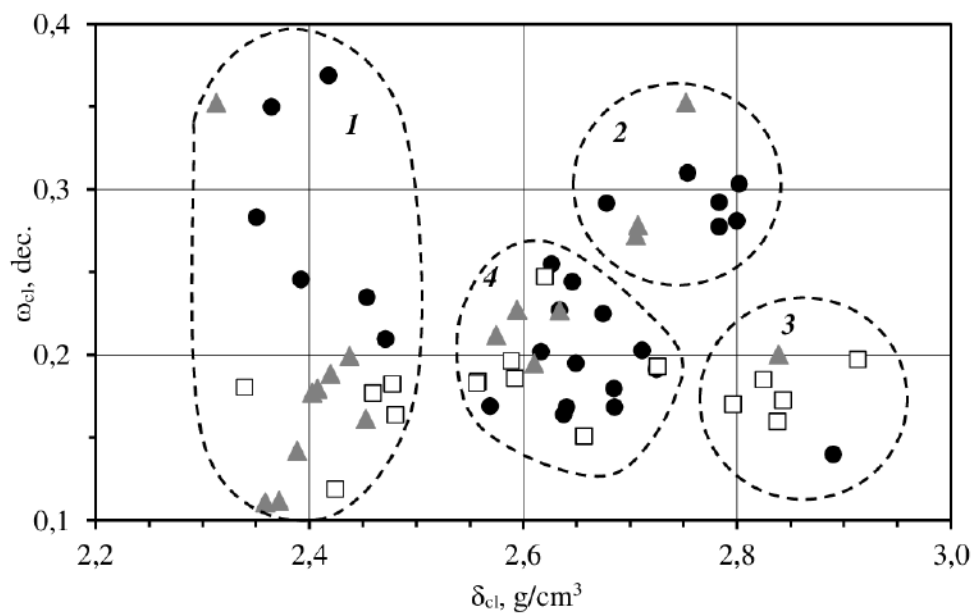


Fig. 2. Crossplot of density and hydrogen index for identification clay minerals by an example of three engineering-geological boreholes (●, □, ▲). Dotted line – area of predominant content of mineral: 1 – montmorillonites; 2 – chlorites, 3 – hydromicas; 4 – mix of minerals (~ 1/3 kaolinite + 1/3 hydromica + 1/3 montmorillonite)

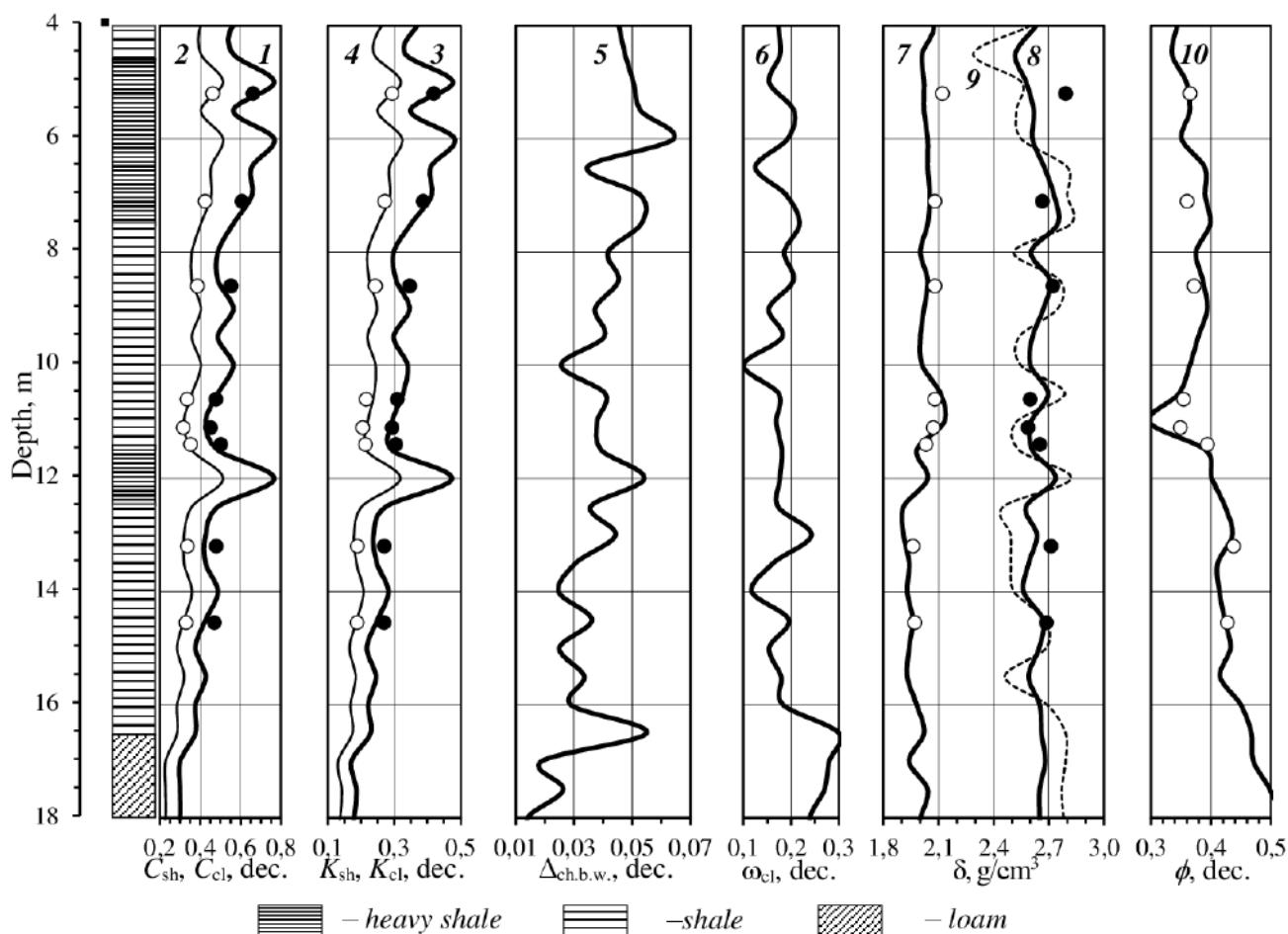


Fig. 3. Parameters of sand-shale rocks below the groundwater level in cased engineering-geological borehole (Kryvyi Rih, borehole diam. $d_b = 51$ mm, casing diam. $d_c = 51$ mm).

Mass and volume shaliness: 1, 3 – shale, 2, 4 – clay, respectively; 5 – chemically bound water; 6 – hydrogen index of clay minerals; density: 7 – total, 8 – solid phase, 9 – clay minerals; 10 – total porosity. ○, ● – control laboratory data; dec. – decimal fraction

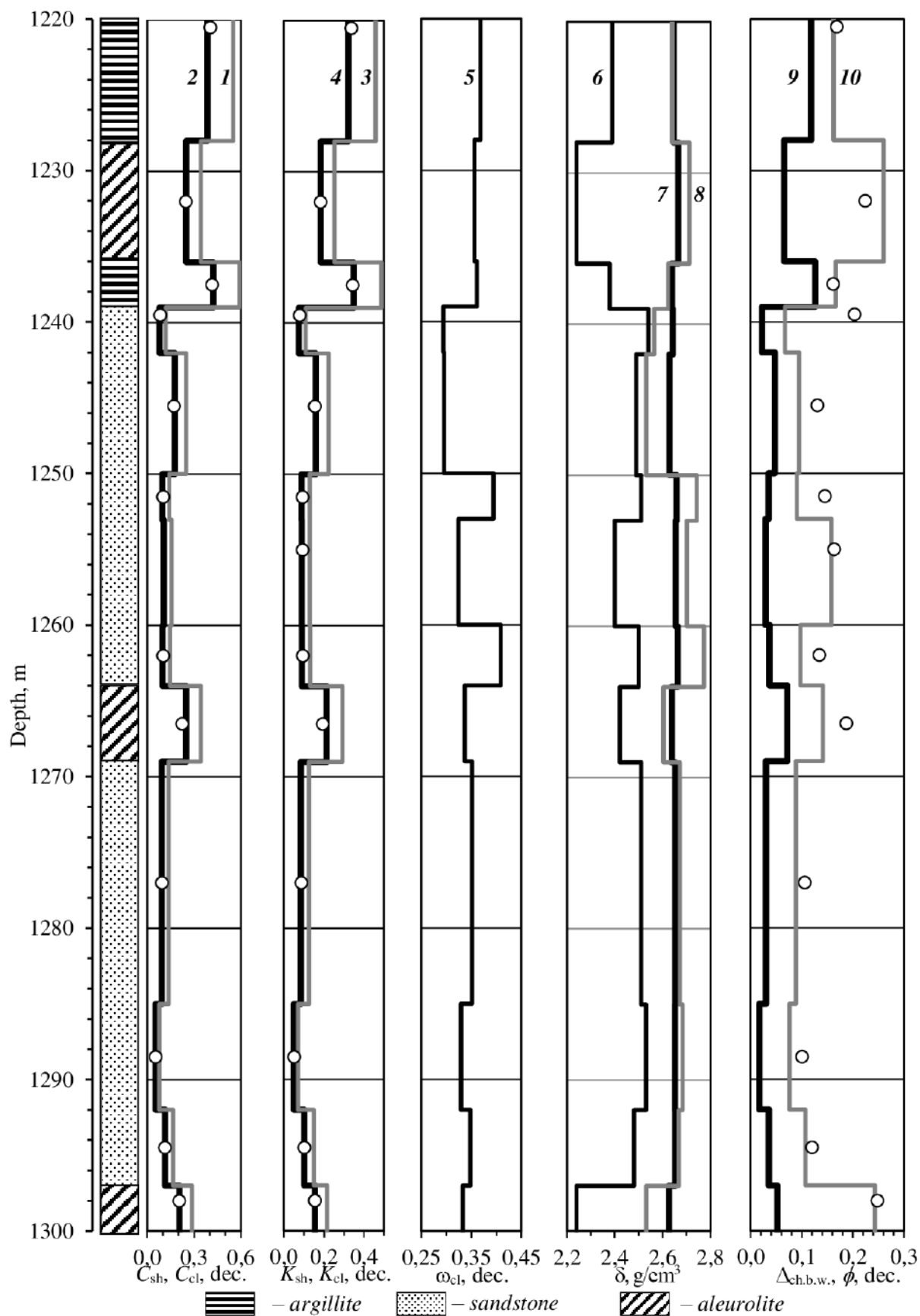


Fig. 4. Parameters of terrigenous rocks in deviated oil boreholeby logging-while-drilling using the LWD-KPRK-48 tool (Dnipro-Donets depression, $d_b = 216$ mm, drillstem diam. $d_d = 132$ mm).

Mass and volume shaliness: 1, 3 – shale, 2, 4 – clay, respectively;

5 – hydrogen index of clay minerals; density: 6 – total, 7 – solid phase, 8 – clay minerals;

9 – chemically bound water; 10 – total porosity; ○ – control layer-by-layer logging data in the open hole

is represented by low-shale sandstone; argillites and aleurolites are also identified. The LWD results are in good agreement with the control logging (determination of clay content and porosity) performed in the open hole after drilling.

Cased methane-coal borehole. Fig. 5 shows an example of determination of the shaliness and others parameters in the cased methane-coal borehole (mine field «Samsonivska-Zakhidna», Luhansk re-

gion). The logging was carried out using 2DL-48 and 2NL-48 tools, developed and manufactured at the IGPh. Terrigenous rocks of different shaliness were identified: argillite, sandstone, aleurolite. A low-density coal bed and tight limestone have also been identified. Limestone is characterized by almost zero shaliness. To determination of the shaliness parameters of coal, it is necessary to develop special methods.

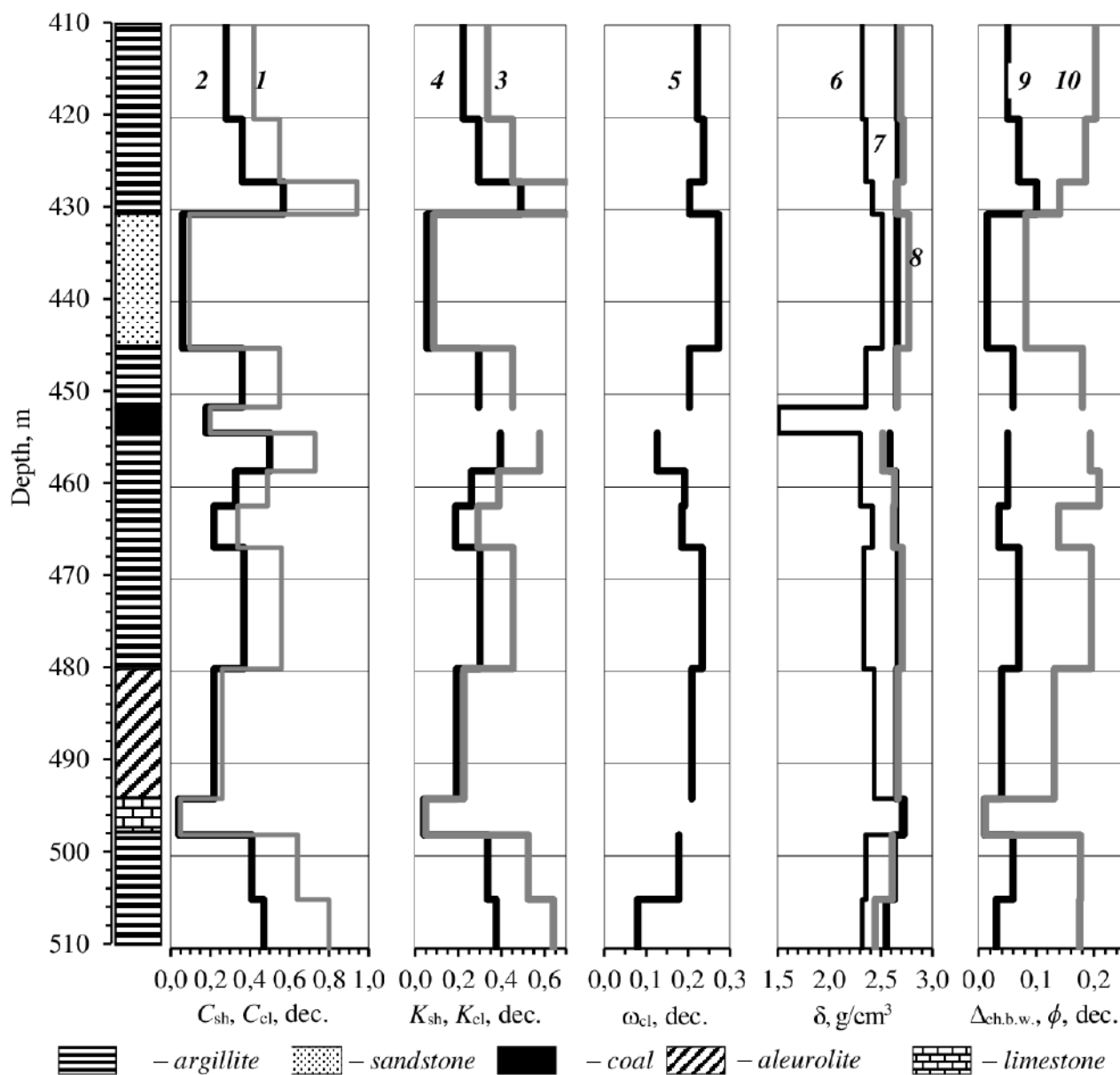


Fig. 5. Rock parameters in cased methane-coal borehole by 2DL-48 and 2NL-48 tools (Dnipro-Donets depression, $d_b = 159$ mm, $d_c = 108$ mm).

Mass and volume shaliness: 1, 3 – shale, 2, 4 – clay, respectively; 5 – hydrogen index of clay minerals; density: 6 – total, 7 – solid phase, 8 – clay minerals; 9 – chemically bound water; 10 – total porosity

Conclusions

Based on the GR+DL+NL combination, the informativity of well logging has been increased in determining the shaliness parameters of terrigenous oil-and-gas formations and near-surface rocks. At that, the emphasis is on investigations through a ste-

el string (drill or casing).

1. A number of logging methods for determining shaliness parameters have been developed, patented and tested in practice. The proposed methods unveil additional capabilities of the GR+DL+NL combination and increase the set of determined pa-

rameters compared to the traditional approach. Determination of additional practical petrophysical parameters (content, density and hydrogen index of clay minerals) increases the accuracy of porosity and other reservoir parameters by well logging.

2. A method has been proposed for estimating the type of clay mineral based on the data of the same radioactive logging combination. This information is used in the interpretation of logging data and is important during drilling operations and stimulation of hydrocarbon production, as well as engineering-geological survey.

3. The efficiency of the developed methods is confirmed by the results of borehole tests and comparison with independent determinations of parameters (laboratory core studies, control logging data). The «price – quality – efficiency» ratio of the obtained results demonstrates the advantage of logging methods for determining shaliness parameters and other parameters compared to laboratory ones. The latter, of course, must be selectively used as a criterion of accuracy and validity.

4. The proposed approaches are an important component of the exploration technology for oil-and-gas reservoirs (in open and cased boreholes and while drilling) and the investigation technology for near-surface rocks, developed at the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine on the basis of a radioactive logging combination.

Acknowledgements

The authors are grateful to director of LLC «Ukrspetsheolohiia» O.S. Stasiv, director of LLC «Ukrspetspyrlad» S.M. Danyliv and officials of SOE «Enerhoproekt» S.I. Deineko and S.O. Ivaschenko for organizing the borehole tests of the new developments.

Thanks are due to co-workers of the Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine Z.M. Yevstakhevych, S.I. Diachenko, O.V. Dmytrenko for taking part in development of pilot samples of logging tools and carrying out radioactive logging.

Bibliography

1. Безродна, І. М., Гожик, А. П. (2018). *Петрофізика*. Київ: ВПЦ «Київський університет».
2. Добрынин, В. М., Вендельштейн, Б. Ю., Кожевников, Д. А. (1991). *Петрофізика*. М.: Недра.
3. Шутенко, Л. Н., Рудь, А. Г., Кичаева, О. В., Самородов, А. В., Гаврилюк, О. В. (2015). *Механика грунтов, основания и фундаменты*. Харьков: ХНУГХ им. А. Н. Бекетова.
4. Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Clark, B., Waters, G., Jochen, V., Calvez, J., Lewis, R., Miller, C. K., Thaeler, J., & Toelle, B. E. (2011). Shale Gas Revolution. *Oilfield Review*, 23(3), 40–55. https://www.academia.edu/19167922/Shale_Gas_Revolution
5. Кузнецов, О. Л., Поляченко, А. Л. (Ред.). (1990). *Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика*. (2-е изд.). М.: Недра.
6. Потятинник, Т. В. (2018). Оцінка впливу карбонатно-глинистого цементу на коефіцієнт проникності порід-колекторів за геофізичними даними. *Науковий вісник ІФНТУНГ*. 1(44), 48–56. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1\(44\)-48-56](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1(44)-48-56)
7. Bhuyan, K., & Passey, Q.R. (1994). Clay estimation from GR and Neutron-Density porosity logs. paper D, SPWLA 35th Annual Logging Symposium, June 19-22, 1994.
8. Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). *Well logging for earth scientists*. (2nd ed.). Springer.
9. Kurniawan, B. (2005). *Shaly sand interpretation using CEC-dependent petrophysical parameters* [Doctoral dissertation, Louisiana State University]. https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=3383&context=gradschool_dissertations
10. Abdideh, M. (2015). Study of dependence between clay mineral distribution and shale volume in reservoir rocks using geostatistical and petrophysical methods. *Geodesy and Cartography*, 41(2), 92–100. <https://doi.org/10.3846/20296991.2015.1051333>
11. Ahmad, K., Kristaly, F., Turzo, Z., & Docs, R. (2018). Effects of clay mineral and physico-chemical variables on sandstone rock permeability. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*, 1(1), 18-26. <https://doi.org/10.30881/jogps.00006>
12. Zhu, L., Sun, J., Zhou, X., Li, Q., Fan, Q., Wu, S., & Wu, S. (2022). Well logging evaluation of fine-grained hydrate-bearing sediment reservoirs: Considering the effect of clay content. *Petroleum Science*, Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.018>
13. Elhassan, A. M., Mnzool, M., Smaoui, H., Jendoubi, A., Elnaïm, B., & Alotaibi, M. (2023). Effect of clay mineral content on soil strength parameters. *Alexandria Engineering Journal*, 63(1), 475-485. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.012>
14. Ferronskiy, V. I. (2015). *Nuclear geophysics. Applications in hydrology, hydrogeology, engineering geology, agriculture and environmental science*. Springer.
15. Diaz-Curiel, J., Miguel, M. J., Biosca, B., & Arevalo-Lomas, L. (2021). Gamma ray log to estimate clay content in the layers of water boreholes. *Journal of Applied Geophysics*, 195, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104481>
16. Martins, J. L., & Castro, T. M. (2018). Empirical and petrophysical models for shaliness estimation in clastic sedimentary rocks. *Revista Brasileira de Geofísica*, 36(2), 163–176. <https://doi.org/10.22564/rbfg.v36i2.919>

17. Kamel, M. H., & Mabrouk, W. M. (2003). Estimation of shale volume using a combination of the three porosity logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 40, 145–157. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00120-7)
18. Ghassem, A., Roozmeh, A. (2017). Determination of shale types using well logs. *International Journal of Petrochemical Science & Engineering*, 2(5), 274–280. <https://doi.org/10.15406/ipcse.2017.02.00051>
19. Almeida, T. L. P., Passos, B. A. F., Costa, J. L. S., & Andrade, A. J. N. (2021). Identifying clay mineral using angular competitive neural network: A machine learning application for porosity estimative. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108303>
20. Galford, J., Quirein, J., Shannon, S., Truax, J., & Witkowsky, J. (2009, October 04–07). Test Results of a New Neutron Induced Gamma Ray Spectroscopy Geochemical Logging Tool [Conference presentation]. 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA. <https://doi.org/10.2118/123992-MS>
21. Klaja, J., & Dudek, L. (2016). Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes. *NAFTA-GAZ*, 1, 3–14. <https://doi.org/10.18668/NG2016.01.01>
22. Schlumberger. (2005). Log interpretation charts. Schlumberger, Houston, TX. <https://www.spec2000.net/freepubs/SLB1997R.pdf>
23. Бондаренко, М. С., Кулик, В. В. (2015). Спосіб визначення параметрів густини піщано-глинистих порід комплексом радіоактивного каротажу. Патент України на корисну модель № 95931. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
24. Al-Obaidi, S. H. (2017). Calculation improvement of the clay content in the hydrocarbon formation rocks. *Oil & Gas Research*, 3(1), 1–2. <https://doi.org/10.4172/2472-0518.1000130>
25. Diaz-Curiel, J., Miguel, M. J., Biosca, B., & Medina R. (2019). Environmental correction of gamma ray logs by geometrical / empirical factors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.056>
26. Wang, H., Liu, T., Tang, T., & Shi, Y. (2017). A unified model to evaluate shaliness in compacted and soft formations using downhole GR log. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 877–883. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.070>
27. Ларионов, В. В. (1969). Радиометрия скважин. М.: Недра.
28. Федоришин, Д. Д., Трубенко, О. М., Федоришин, С. Д., Фтемов, Я. М., Коваль, Я. М. (2016). Перспективи ядерно-фізичних методів під час виділення газонасичених порід-колекторів складнобудованих неогенових відкладів. *Геодинаміка*, 2(21), 134–143.
29. Бондаренко, М. С., Кулик, В. В. (2019). Спосіб свердловинного визначення масової глинистості теригенних гірських порід. Патент України на корисну модель № 131232. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
30. Кулик, В. В., Бондаренко, М. С., Дейнеко, С. І. (2015). Спосіб визначення параметрів глинистості гірських порід комплексом радіоактивного каротажу. Патент України на винахід № 109230. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».
31. Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P., Du, P., & Song, H. (2018). XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. *Solid Earth Sciences*, 3, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>
32. Кулик, В. В., Бондаренко, М. С., Камілова, О. В. (2013). Спосіб визначення мінеральної густини скелету гірських порід. Патент України на винахід № 103841. ДП «Український інститут інтелектуальної власності».

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Bezrodna, I. M., & Gozhyk, A. P. (2018). Petrophysics. Kyiv university. [in Ukrainian]
2. Dobrynin, V. M., Vendelshtein, B. Iu., & Kozhevnikov D. A. (1991). Petrophysics. M., Nedra.
3. Shutenko, L. N., Rud, A. H., Kychaeva, O. V., Samorodov, A. V., & Havryliuk, O. V. (2015). Ground mechanics, bases and foundations. KhNUGH im. Beketova.
4. Alexander, T., Baihly, J., Boyer, C., Clark, B., Waters, G., Jochen, V., Calvez, J., Lewis, R., Miller, C. K., Thaeler, J., & Toelle, B. (2011). Shale Gas Revolution. *Oilfield Review*, 23(3), 40–55. https://www.academia.edu/19167922/Shale_Gas_Revolution
5. Kuznetsov, O. N., & Poliachenko, A. L. (Eds.) (1990). Borehole nuclear geophysics. *Geophysicist's handbook* (2nd ed.). M., Nedra.
6. Potiatynnyk, T. V. (2018). Estimation of the carbonate-shaly cement influence on the permeability of reservoirs by geophysical data. Scientific bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 1(44), 48–56. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1\(44\)-48-56](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2018-1(44)-48-56) [in Ukrainian]
7. Bhuyan, K., & Passey, Q. (1994). Clay estimation from GR and Neutron-Density porosity logs. paper D, SPWLA 35th Annual Logging Symposium, June 19–22, 1994.
8. Ellis, D. V., & Singer, J. M. (2008). Well logging for earth scientists. (2nd ed.). Springer.

9. Kurniawan, B. (2005). Shaly sand interpretation using CEC-dependent petrophysical parameters [Doctoral dissertation, Louisiana State University]. https://digitalcommons.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=3383&context=gradschool_dissertations
10. Abdideh, M. (2015). Study of dependence between clay mineral distribution and shale volume in reservoir rocks using geostatistical and petrophysical methods. *Geodesy and Cartography*, 41(2), 92–100. <https://doi.org/10.3846/20296991.2015.1051333>
11. Ahmad, K., Kristaly, F., Turzo, Z., & Docs, R. (2018). Effects of clay mineral and physico-chemical variables on sandstone rock permeability. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*, 1(1), 18–26. <https://doi.org/10.30881/jogps.00006>
12. Zhu, L., Sun, J., Zhou, X., Li, Q., Fan, Q., Wu, S., & Wu, S. (2022). Well logging evaluation of fine-grained hydrate-bearing sediment reservoirs: Considering the effect of clay content. *Petroleum Science*, Pre-proof. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.09.018>
13. Elhassan, A. M., Mnzool, M., Smaoui, H., Jendoubi, A., Elhaim, B., & Alotaibi, M. (2023). Effect of clay mineral content on soil strength parameters. *Alexandria Engineering Journal*, 63(1), 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.08.012>
14. Ferronskiy, V. I. (2015). Nuclear geophysics. Applications in hydrology, hydrogeology, engineering geology, agriculture and environmental science. Springer.
15. Diaz-Curiel, J., Miguel, M. J., Biosca, B., & Arevalo-Lomas, L. (2021). Gamma ray log to estimate clay content in the layers of water boreholes. *Journal of Applied Geophysics*, 195, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104481>
16. Martins, J. L., & Castro, T. M. (2018). Empirical and petrophysical models for shaliness estimation in clastic sedimentary rocks. *Revista Brasileira de Geofísica*, 36(2), 163–176. <http://doi:10.22564/rbge.v36i2.919>
17. Kamel, M. H., & Mabrouk, W. M. (2003). Estimation of shale volume using a combination of the three porosity logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 40, 145–157. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00120-7)
18. Ghassem A. M., & Roozmeh A. (2017). Determination of shale types using well logs. *International Journal of Petrochemical Science & Engineering*, 2(5), 274–280. <https://doi.org/10.15406/ipcse.2017.02.00051>
19. Almeida, T. L. P., Passos, B. A. F., Costa, J. L. S., & Andrade, A. J. N. (2021). Identifying clay mineral using angular competitive neural network: A machine learning application for porosity estimative. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 200. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108303>
20. Galford, J., Quirein, J., Shannon, S., Truax, J., & Witkowsky, J. (2009, October 04–07). Test Results of a New Neutron Induced Gamma Ray Spectroscopy Geochemical Logging Tool [Conference presentation]. 2009 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA. <https://doi.org/10.2118/123992-MS>
21. Klaja, J., & Dudek, L. (2016). Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes. *NAFTA-GAZ*, 1, 3–14. <https://doi.org/10.18668/NG2016.01.01>
22. Schlumberger. (2005). Log interpretation charts. Schlumberger, Houston, TX. <https://www.spec2000.net/freepubs/SLB1997R.pdf>
23. Bondarenko, M. S., & Kulyk, V. V. (2015). Method for determining density parameters of sandshale rocks by the radioactivity logging complex. *Ukrainian Patent for useful model № 95931. The State Enterprise "Ukrainian Intellectual Property Institute"*. [in Ukrainian]
24. Al-Obaidi, S. H. (2017). Calculation improvement of the clay content in the hydrocarbon formation rocks. *Oil & Gas Research*, 3(1), 1–2. <https://doi.org/10.4172/2472-0518.1000130>
25. Diaz-Curiel, J., Miguel, M. J., Biosca, B., & Medina, R. (2019). Environmental correction of gamma ray logs by geometrical / empirical factors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 462–468. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.10.056>
26. Wang, H., Liu, T., Tang, T., & Shi, Y. (2017). A unified model to evaluate shaliness in compacted and soft formations using downhole GR log. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 156, 877–883. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.06.070>
27. Larionov, V. V. (1969). Borehole radiometry. M., Nedra.
28. Fedoryshyn, D. D., Trubenko, O. M., Fedoryshyn, S. D., Ftemov, Ya. M., & Koval Ya. M. (2016). Prospects of nuclear-physical methods for the distinction of gas-saturated reservoir rocks in complicated Neogene sediments. *Geodynamics*, 2(21), 134–143.
29. Bondarenko, M. S., & Kulyk, V. V. (2019). The method of borehole determination of mass shale content of terrigenous rocks. *Ukrainian Patent for useful model № 131232. The State Enterprise "Ukrainian Intellectual Property Institute"*. [in Ukrainian]
30. Kulyk, V. V., Bondarenko, M. S., & Deineko, S. I. (2015). Method for determining shaliness parameters of rocks by the radioactive logging complex. *Ukrainian Patent for invention № 109230. The State Enterprise "Ukrainian Intellectual Property Institute"*. [in Ukrainian]
31. Zhou, X., Liu, D., Bu, H., Deng, L., Liu, H., Yuan, P., Du, P., & Song, H. (2018). XRD-based quantitative analysis of clay minerals using reference intensity ratios, mineral intensity factors, Rietveld, and full pattern summation methods: A critical review. *Solid Earth Sciences*, 3, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2017.12.002>
32. Kulyk, V. V., Bondarenko, M. S., & Kamilova, O. V. (2013). Method for determining mineral density of rock skeleton. *Ukrainian Patent for invention № 103841. The State Enterprise "Ukrainian Intellectual Property Institute"*. [in Ukrainian]

Визначення параметрів глинистості теригенних гірських порід в обсаджених свердловинах та в процесі буріння комплексом радіоактивного каротажу

Максим Бондаренко¹

к. геол. н., зав. відділу,

¹ Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна;

Володимир Кулик¹

к. фіз.-мат. н., пров. наук. співроб.

Глинистість є важливою літологічною і петрофізичною характеристикою колекторів і покришок в розрізі нафтогазових свердловин та приповерхневих гірських порід (ґрунтів) як основи інженерних споруд. В теригенних породах розрізняють гранулометричну глинистість, яка визначається наявністю пелітових частинок, та мінеральну глинистість, яка характеризує вміст глинистих мінералів. В розрізах нафтогазових родовищ гранулометрична глинистість є одним з критеріїв при виділенні колекторів та впливає на їхні фільтраційно-ємнісні властивості (ФЄВ). Фізичні властивості колекторів, які вивчають геофізичними свердловинними методами (ГСД), залежать від вмісту і типу глинистих мінералів. Інформацію про глинисті мінерали враховують при бурінні та інтенсифікації видобування вуглеводнів. Глинисті ґрунти належать до групи зв'язних, які у будівництві найбільш часто служать основами споруд. При цьому такі ґрунти відносять до складних інженерно-геологічних умов будівництва, оскільки глинисті мінерали специфічно впливають на їхню міцність, стійкість та ін. Метою статті є розширення інформативності ГСД при дослідженні глинистості теригенних нафтогазових колекторів і приповерхневих гірських порід на основі комплексу гамма-, гамма-гамма і нейтрон-нейтронного каротажу (ГК+ГГК+ННК). Методика досліджень включала ГСД приладами, створеними в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (ІГФ НАНУ) самостійно і у співробітництві з організаціями-партнерами, інтерпретацію каротажних матеріалів, розроблення підходів для підвищення інформативності ГК+ГГК+ННК, оцінку ефективності авторських розробок з використанням незалежних критеріїв. В результаті дослідження розширено (на основі комплексу ГК+ГГК+ННК) сукупність визначуваних параметрів гірських порід порівняно з традиційною практикою; розроблено ряд нових способів визначення параметрів глинистості, зокрема вмісту, густини і водневого індексу глинистих мінералів. Використання цих параметрів, в свою чергу, підвищує точність визначення пористості та ін. ФЄВ за даними ГСД. Запропоновано спосіб оцінки типу глинистого мінералу за даними ГК+ГГК+ННК. Спосіб є доступною альтернативою геохімічним дослідженням керну та більш дорогим і складним каротажним способам. Новизна розробок підтверджена патентами, а ефективність – свердловинними випробуваннями та порівнянням з незалежними визначеннями параметрів. Запропоновані підходи є складовою технологій дослідження нафтогазових колекторів та приповерхневих гірських порід, які розробляються в ІГФ НАНУ.

Ключові слова: піщано-глиниста гірська порода; нафтогазовий колектор; ґрунт; комплекс гамма-, гамма-гамма і нейтрон-нейтронного каротажу; відносний різницевий параметр гамма-каротажу; водневий індекс; густина; глинистий мінерал.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 24 липня 2024 р.

Прийнята 2 листопада 2024 р.

Методичні аспекти оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами, спричиненого військовою агресією РФ проти України

Руслан Гаврилюк¹

к. геол. н., учений секретар,¹ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,
e-mail: gavrilyuk.ruslan@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-6465-9440>;

Олена Шпак¹

к. геол. н., ст. наук. співробітник,
e-mail: shpak_lena@yahoo.com,  <https://orcid.org/0000-0002-7021-0842>;

Ольга Логвиненко¹

мол. наук. співробітник,
e-mail: lohvylenko.olha@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-8193-4144>;

Ігор Запольський¹

мол. наук. співробітник,
e-mail: igorzapol@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0006-7281-4785>

Внаслідок російської військової агресії значна кількість об'єктів зберігання нафтопродуктів та інших об'єктів нафтопродуктозабезпечення України зазнали руйнувань, що призвело до формування нових осередків забруднення геологічного середовища. Такі осередки завдають істотної шкоди довкіллю, оцінка якої є одним з ключових пріоритетів для України серед усього спектру довкіллевих впливів російської агресії. Першим етапом оцінки завданої шкоди є оцінка стану довкілля, що включає визначення об'єктів, характеру, масштабів та особливостей забруднення геологічного середовища. Вона має базуватися на результатах еколого-геологічного обстеження кожної забрудненої ділянки, проведення якого має забезпечити отримання необхідної достовірної інформації. Результати оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами слугують основою для подальших етапів оцінки завданої шкоди: розробки системи моніторингу та ремедіаційних заходів, сумарні витрати на які, включаючи їх реалізацію, разом з витратами на оцінку стану довкілля, мають складати основу грошової оцінки завданої шкоди. В статті розглянуті методичні підходи щодо еколого-геологічного обстеження об'єктів забруднення геологічного середовища нафтопродуктами, розроблені на основі власного багаторічного досвіду. Описані загальні принципи організації і проведення натурних обстежень. Запропоновані види та обсяги досліджень на всіх етапах обстеження. Розглянуті особливості буріння свердловин та проведення супроводжувальних робіт на забруднених нафтопродуктами ділянках. Розглянуті приклади еколого-геологічного обстеження, проведеного в районі міжнародного аеропорту «Бориспіль» та м. Біла Церква – об'єктах, які за масштабами забруднення є потенційно співставними з осередками, що можуть формуватися внаслідок військової агресії РФ. Запропоновані три класи екологічної небезпеки осередків нафтопродуктового забруднення, які визначають подальші напрямки поводження із забрудненими територіями.

Ключові слова: геологічне середовище, забруднення, нафтопродукти, еколого-геологічне обстеження, вплив війни на довкілля, ремедіація.

Як цитувати: Гаврилюк Руслан. Методичні аспекти оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами, спричиненого військовою агресією РФ проти України / Руслан Гаврилюк, Олена Шпак, Ольга Логвиненко, Ігор Запольський // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 23-38. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02>

In cites: Havryliuk Ruslan, Shpak Olena, Lohvylenko Olha, Zapolskiy Igor (2024). Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 23-38. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02> [in Ukrainian]

Стаття присвячена пам'яті українського гідрогеолога, доктора геолого-мінералогічних наук, професора Миколи Степановича Огняника (1937–2022) – засновника напрямку досліджень забруднення геологічного середовища нафтопродуктами в Україні.

Постановка проблеми. Повномасштабна російська військова агресія проти України супроводжується цілеспрямованими ракетними атаками на об'єкти нафтопродуктозабезпечення України, такі як бази зберігання нафтопродуктів (НП), нафтопереробні заводи, військові аеродроми тощо [28]. Хроніки вже перших днів війни свідчать про ракетну атаку на нафтобазу у м. Ва-

силькові, Київської обл. та її повне руйнування. В подальшому фіксувалися неодноразові влучання в різних регіонах України в нафтобази, нафтопереробні заводи, зокрема Кременчуцький, який неодноразово піддавався ракетним ударам протягом весни-літа 2022 р. (<https://ecodozor.org/>) та інші об'єкти нафтопродуктозабезпечення.

Військові атаки та диверсії ворога призвели до руйнування десятків об'єктів нафтопродуктозабезпечення, що супроводжувались масштабними пожежами і розливами НП. Якщо пожежі призводять до відносно тимчасового забруднення атмосфери, то розливи НП є значно більш

довгостроковим фактором забруднення земної поверхні з високою ймовірністю подальшого просочування НП у відклади зони аерації та формування масштабних осередків довготривалого забруднення геологічного середовища.

Умисне руйнування об'єктів нафтопродуктозабезпечення, в першу чергу нафтобаз – об'єктів зберігання значних обсягів НП, мають всі ознаки екоциду, враховуючи свідомість дій агресора, а також серйозність та довготривалість їхніх наслідків. Отже однією з пріоритетних задач в рамках оцінки шкоди, завданої російською агресією доквіллю України, є визначення наслідків руйнування нафтобаз для геологічного середовища.

У випадку з геологічним середовищем визначення наслідків має базуватися на оцінці актуального стану забруднення, сформованого внаслідок військових дій, шляхом проведення еколого-геологічного обстеження. Таке обстеження забезпечує отримання необхідної достовірної інформації про об'єкти, характер, масштаб та особливості забруднення геологічного середовища.

Результати оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами слугують основою для подальших етапів оцінки завданої шкоди. Окрім витрат на обстеження вона включає вартість заходів з моніторингу та ремедіації забруднення, планування яких забезпечуються даними, отриманими в результаті обстеження. Водночас проведення обстеження вбачається доцільним не лише у випадку, коли забруднення вже відбулося, але й для об'єктів, що можуть стати ціллю для військового агресора. В такому разі обстеження дозволяє встановити вихідний стан доквілля. У випадку військової атаки на даний об'єкт інформація про вихідний стан доквілля та порівняння з його станом після дозволить обґрунтовано довести нанесену шкоду.

Оцінка стану забруднення також може розглядатися як певний аналог оцінки впливу на доквілля (ОВД) конкретного об'єкту в системі управління осередком забруднення [2]. В цьому контексті оцінка забруднення має дати відповідь на питання щодо необхідності запровадження невідкладних заходів для зниження рівня небезпеки до помірного рівня, зокрема для недопущення посилення негативних впливів сформованого забруднення на доквілля та населення. Останнє є необхідним не лише для екологічної безпеки території, але й для успішної компенсації шкоди доквіллю в міжнародних інстанціях.

Досвід діяльності Компенсаційної комісії ООН (UNCC), яка здійснювала реєстрацію, оцінку та присуджувала компенсацію за очищення та відновлення від шкоди, що була завдана ґрун-

там, водам, прибережним екосистемам внаслідок агресії Іраку проти Кувейту (війна в Перській затоці, 1990–1991 рр.), показав важливість вчасного реагування постраждалою країною на забруднення геологічного середовища. Згідно рішення Ради Безпеки ООН №687 від 3.04.1991 р. Ірак несе відповідальність за міжнародним правом за будь-які прямі втрати, збитки, включаючи збитки доквіллю та виснаження природних ресурсів, або шкоду, заподіяну іноземним урядам, фізичним та юридичним особам внаслідок незаконного вторгнення Іраку та окупації ним Кувейту (<https://documents-dds-ny.un.org/doc/RESOLUTION/GEN/NR0/597/07/PDF/NR059707.pdf>). Проте комісією було зазначено про обов'язок заявників щодо максимально можливого пом'якшення або зменшення екологічної шкоди, або невчинення дій, що можуть підсилити шкоду доквіллю чи збільшити ризики майбутньої шкоди (<http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2022/05/Kompensatsijna-komisiya-OON.pdf>). Отже своєчасне запровадження заходів з управління осередком забруднення є необхідною складовою подальшої компенсації завданої шкоди, а їх запровадження неможливе без оцінки стану забруднення.

Особливості забруднення геологічного середовища НП визначають необхідність спеціалізованого підходу при оцінюванні осередків забруднення. Вивченню поведінки НП-забруднювачів у геологічному середовищі, розробці стратегій і методичних засад поводження з об'єктами, забрудненими НП, їх ремедіації присвячено низку робіт [24, 25, 29-32]. В Україні аналогічні наукові дослідження проводяться силами ІГН НАН України на ділянках забруднення, що приурочені до військових об'єктів (аеродромів), нафтопереробних заводів, складів паливно-мастильних матеріалів тощо [1-3, 8-10, 12, 19-23]. На основі попереднього власного та світового досвіду висвітлені методичні аспекти оцінки стану забруднення геологічного середовища НП, спричиненого військовою агресією РФ проти України.

Метою статті є висвітлення і пропозиції методичних підходів до еколого-геологічного обстеження територій, забруднених НП, враховуючи наслідки руйнувань об'єктів нафтопродуктозабезпечення в результаті російської військової агресії проти України.

Особливості техногенного забруднення геологічного середовища нафтопродуктами. Забруднення геологічного середовища НП відрізняється від інших видів техногенного забруднення внаслідок специфічних особливостей забруднювача, який представлений рідиною, що не змішується з водою. При цьому НП здебільшого мають щільність меншу за воду, що визначає

утворення техногенних скупчень на поверхні ґрунтових вод. Такі скупчення стають джерелами подальшого тривалого вторинного забруднення підземної гідросфери розчиненими вуглеводнями, навіть незначні концентрації яких, що здатні поширюватись на великі відстані, унеможливають пряме використання води для питних цілей.

Детально фізико-хімічні властивості НП, їх знаходження і міграція в геологічному середовищі вивчені та описані нами в роботах [4, 5, 9, 12, 19].

Потрапляючи на поверхню землі внаслідок аварійних розливів та витоків, НП під дією гравітаційних сил мігрують вертикально крізь зону аерації (ЗА). Під час міграції частина забруднювача захоплюється капілярно-плівковими силами або сорбується частками ґрунту. Окремі складові НП характеризуються високою здатністю до випаровування і можуть утворювати потенційно шкідливі викиди летких органічних сполук [25, 32]. Якщо в ЗА потрапляє достатній об'єм НП, вони здатні досягати рівня ґрунтових вод (РГВ) та накопичуватися на ньому, утворюючи лінзу мобільних НП, яка поширюється латерально під дією власного напору і уклону рівневої поверхні ґрунтових вод (рис. 1). Лінзи мобільних НП є “ядром” осередку забруднення, і можуть досягати декілька метрів потужності та займати десятки гектарів площі [6, 9, 21, 22]. Мобільні та залишкові НП є джерелом потрапляння розчинених вуглеводнів з інфільтраційним потоком у ґрунтові води [25, 31].

Присутні у ґрунті мікробні популяції сприяють деградації НП. Дослідження з визначення природи мікроорганізмів і механізмів, що контролюють життєдіяльність бактерій, свідчать про значну роль біодеградації у природному ослабленні НП-забруднення [24, 25]. Нами проводились дослідження на забрудненій НП території складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту “Бориспіль” з дослідження видового складу мікроміцетів у ґрунті. Дані визначень знаходження мікроорганізмів у зразках ґрунту свідчать про різноманітність їх форм, залежно від ступеня забруднення, глибини відбору, літології та водонасичення [16].

Трансформація осередку НП-забруднення ґрунтових вод пов'язана із певними закономірностями зміни їх хімічного складу. Нами виявлено збільшення окиснюваності ґрунтових вод в зоні НП-забруднення від фонових показників 1-3 до 20 мг/дм³ [9]. Хоча залежність між концентрацією розчинених НП в ґрунтових водах та показниками окиснюваності відносна, але цей показник можна використовувати як якісний для оцінки НП-забруднення. В той же час, значення окиснюваності більше 3 мг/дм³ свідчить про

забруднення води та ризику її використання для питних цілей. З огляду на хімічний склад ґрунтових вод, спостерігалось зростання сульфат-іону з глибиною. Причиною зниження концентрацій SO₄ в верхній частині розрізу, де спостерігалась зона НП-забруднення, до значень 6-12 мг/дм³ при фонових значеннях 50-100 мг/дм³ є те, що в умовах НП-забруднення підземних вод сульфати віддають кисень для окислення вуглеводнів, тому сульфат-іон відсутній у хімічному складі води або залишається у незначній кількості, а натомість з'являється сірководень [9].

Коливання РГВ суттєво впливають на процеси перерозподілу мобільних НП, їх розчинення, випаровування та біодеградацію, сприяючи поширенню НП-забруднення та збільшенню ризику забруднення об'єктів-реципієнтів [25]. Нами досліджено в польових умовах, що сезонні коливання РГВ призводили до «розмазування» авіаційного гасу в зоні аерації та збільшення зони забруднення ґрунтів у вертикальному розрізі [19]. Нами проводились лабораторні дослідження впливу коливань РГВ на стан і вміст НП у геологічному середовищі [13, 14]. Експерименти були виконані в колоні, заповненій піском, куди подавалась вода та авіаційний гас (рис. 2). Виявлено, що при початковому підйомі і наступному опусканні РГВ товщина шару мобільного гасу зменшується (майже до повного зникнення). При підйомі РГВ зменшення потужності шару НП відбувається більш інтенсивно, через те що НП витрачається на створення нового шару з мобільним НП і нових капілярних зон, залишаючи після себе защемлений водою НП. При зниженні РГВ товщина шару НП падає менш інтенсивно, оскільки шар НП витрачається на залишковий НП, який утримується ґрунтом після гравітаційного стікання. В [15] досліджено вплив коливання РГВ на формування залишкових та защемлених НП. Встановлено, що при природному підйомі РГВ гас не переноситься вище 10 см і защемлюється в капілярній зоні; при первинному і наступних опусканнях РГВ після формування шару з мобільним НП залишкові насиченості води та НП будуть різними залежно від літологічного складу ґрунту, початкового насичення, інтервалу та часу опускання РГВ.

Мігруючи з ґрунтовим потоком, розчинені в ньому НП створюють ризик забруднення джерел питного водопостачання та поверхневих водойм і водотоків, де розвантажуються ґрунтові води [2, 23, 26]. У випадку наявності “гідрогеологічних вікон” у водотривкому шарі порід, забруднені НП води можуть потрапляти у водоносний горизонт, що залягає нижче [1, 18].

Загальні принципи еколого-геологічного обстеження об'єктів НП-забруднення. Почина-

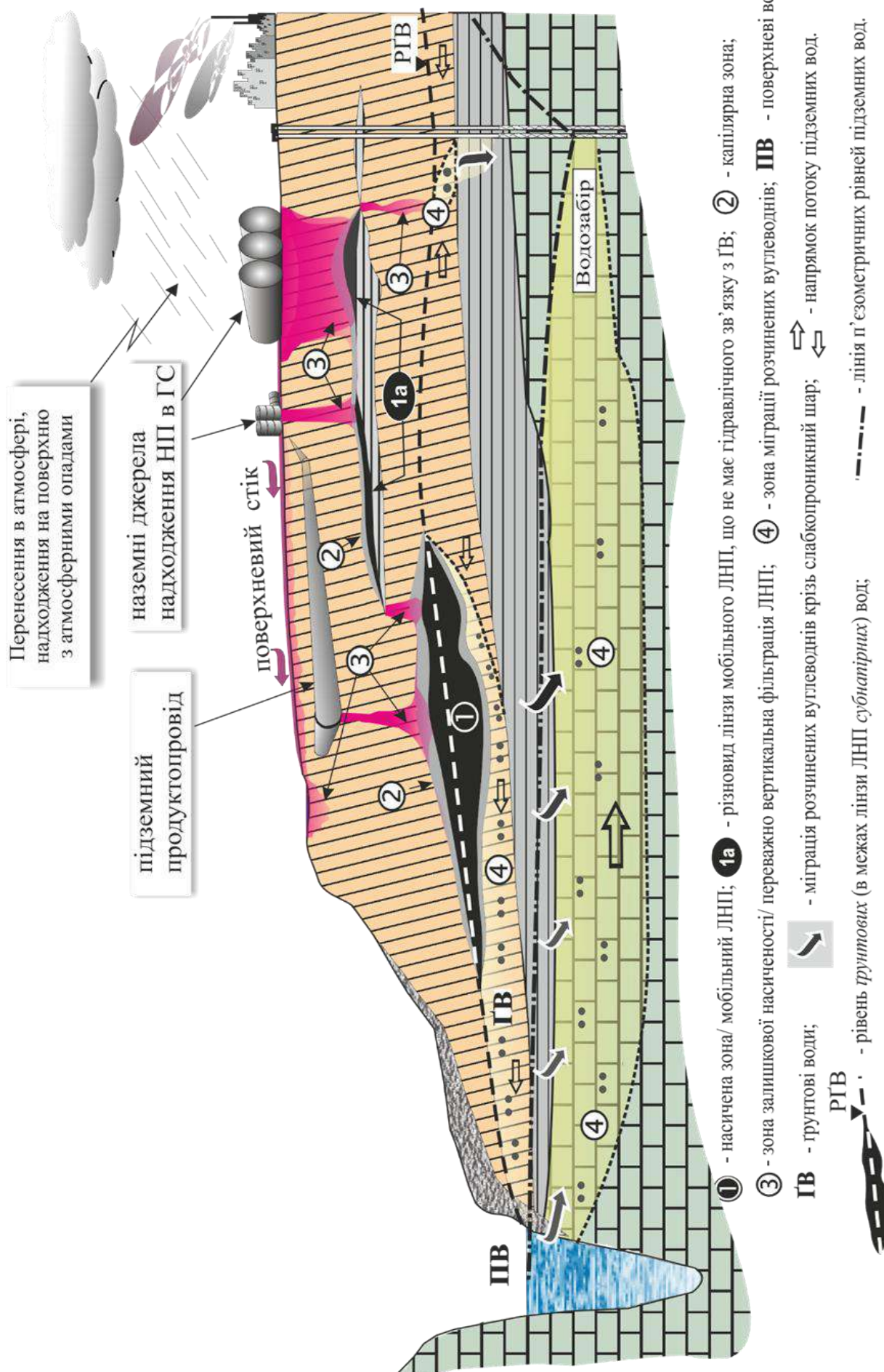


Рис. 1. Концептуальна схема забруднення геологічного середовища нафтопродуктами [5] /
Fig. 1. The conceptual scheme of subsurface contamination with petroleum products [5]

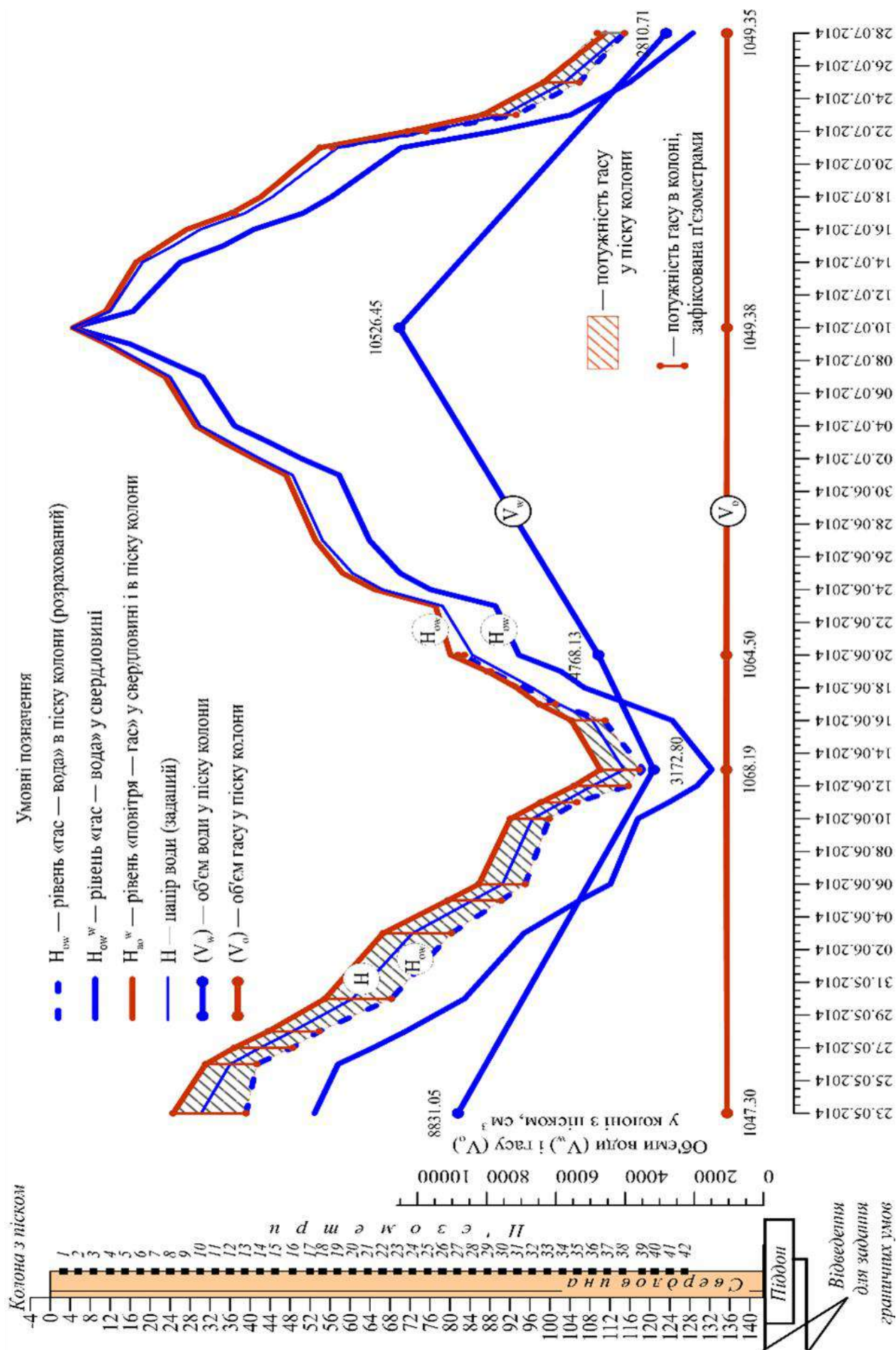


Рис. 2. Зміна рівнів у свердловині та колоні при випуску та подачі води після формування шару мобільного газу [13, 14] /
 Fig. 2. Change of levels in a well and a column during the release and supply of water after the formation of a mobile kerosene layer [13, 14]

ючи з 24 лютого 2022 р. в результаті російської військової агресії в Україні були зруйновані десятки об'єктів нафтопродуктозабезпечення, які супроводжувались аварійними розливами НП та їх надходженням до геологічного середовища (<https://www.gp.gov.ua/ua/posts/rozsliduvannya-raket-nix-atak-po-ukrayinskix-naftobazax-ta-vstanovlennya-zbitkiv-dlya-dovkilliya-v-ofisi-genprokurora-obgovorili-mozlivist-dolucennya-francuzkix-ekspertiv>).

Для картування, розрахунків просторових параметрів і об'ємів, оцінки і прогнозування якісної і кількісної трансформації НП, накопичених у геологічному середовищі, необхідно отримати дані щодо геологічного розрізу, фільтраційних, міграційних, водно-фізичних та гідрохімічних параметрів.

Основними видами робіт в рамках еколого-геологічного обстеження повинні бути наступні:

- комплексна еколого-геологічна зйомка масштабу 1 : 1 000, 1 : 5 000, 1 : 10 000;
- геофізичні, радіологічні та аерозйомочні роботи;
- бурові роботи;
- дослідно-фільтраційні та дослідно-міграційні роботи;
- геодезичні роботи;
- біоіндикація та біотестування;
- лабораторні визначення хімічного складу і води, а також вмісту забруднювачів у геологічному середовищі;
- математичне моделювання часової і просторової трансформації НП у геологічному середовищі.

Цільове призначення еколого-геологічного обстеження – фіксація вихідного стану забрудненого геологічного середовища та основних його параметрів, натурна та прогнозна оцінка якісних і кількісних змін, що безпосередньо або опосередковано негативно впливають на екологічну обстановку.

Основною вимогою до еколого-геологічних робіт є комплексність виконання геологічних, геохімічних, ландшафтно-геохімічних, гідрогеологічних, інженерно-геологічних, геофізичних та інших досліджень, які в сукупності дозволяють оцінити стан геологічного середовища, екологічну обстановку на території та обґрунтувати заходи із запобігання або ліквідації негативних впливів і змін.

Еколого-геологічне обстеження в комплексі інформаційно забезпечує:

- визначення масштабів забруднення геологічного середовища;
- виявлення джерел забруднення;
- визначення шляхів надходження НП у геологічне середовище;
- вивчення процесів накопичення і міграції

НП у геологічному середовищі;

- визначення токсичності НП по відношенню до підземних та поверхневих вод, атмосферного повітря, ґрунтів, рослинності та донних відкладів;
- виконання прогнозних оцінок часових і просторових трансформацій осередку забруднення і пов'язаних з ними ризиків погіршення стану і якості екологічного середовища;
- розробку системи профілактичних запобіжних, ліквідаційних, ремедіаційних, реабілітаційних та інших заходів відновлення забрудненого НП природного, і в тому числі, геологічного середовища.

Еколого-геологічне обстеження осередків НП-забруднення обов'язково потрібно виконувати у випадках:

- отримання інформації про руйнування, що сталися у зв'язку з військовими діями, або інші аварійні ситуації, які можуть спричинити негативний вплив на довкілля та здоров'я людей;
- понаднормативного забруднення довкілля в зоні об'єкту життєзабезпечення (колодязів, свердловин, поверхневих водних об'єктів – озер, річках, водосховищах, струмках тощо), атмосферного повітря, що робить небезпечним середовище існування;
- наявності ризику виникнення аварійної ситуації, в першу чергу в межах або поруч з об'єктом, що охороняється, населеним пунктом, джерелом життєзабезпечення.

Мета еколого-геологічного обстеження осередків НП-забруднення:

- виявлення джерел забруднення довкілля НП;
- визначення розподілу забруднюючих речовин у компонентах довкілля, зокрема, в ґрунтах, атмосфері, поверхневих та підземних водах, донних відкладів, рослинності;
- вивчення шляхів та форм міграції НП у геологічному середовищі;
- визначення умов взаємозв'язку між атмосферними опадами, підземними та поверхневими водами;
- прогноз розповсюдження НП у геологічному середовищі;
- оцінка природного та техногенного ризику на людину та довкілля;
- розробка заходів з ліквідації або/та локалізації забруднення ґрунтів, поверхневих та підземних вод.

Обсяги еколого-геологічного обстеження об'єктів нафтопродуктозабезпечення визначаються метою його виконання, розміром постраждалої та прилеглих територій, що знаходяться під впливом забруднення, необхідною точністю

виконання прогнозів розповсюдження забруднення та визначення ризику негативного впливу на людину та компоненти довкілля.

Ключовою ланкою в системі еколого-геологічного обстеження є визначення необхідності організації і ведення постійного моніторингу за станом геологічного середовища і зовнішніми чинниками у межах забрудненого об'єкту.

Комплексний еколого-геологічний моніторинг є невід'ємною складовою наукового дослідження на НП-забрудненій території і постійним джерелом вихідної інформації для аналітичної обробки та отримання результатів щодо обґрунтування і прийняття практичних рішень.

У реальному практичному сенсі моніторинг не може бути повсюдним і має охоплювати типові для певних умов об'єкти з інтерполяційним зв'язком, за необхідності, з об'єктами аналогами.

Основою моніторингової мережі на репрезентативних об'єктах є свердловини, по яких спостерігають за коливаннями РГВ і поверхні вільного НП, відбирають проби рідин на хімічний аналіз, визначають наявність і потужність шару вільного НП, визначають фільтраційні параметри водовміщуючих порід. Також за можливості (необхідності) облаштовують гідрофізичні стаціонари в зоні аерації.

Точки спостережень розміщують по всій забрудненій території та в зоні ризику розповсюдження НП-забруднення, за даними яких будують спеціальні інформаційні карти, які можуть бути використані і для математичного моделювання, а саме:

- карти гідроізогіпс, гідроізоп'єз, поверхні вільного НП;
- карти потужності зони аерації;
- карти потужності водоносних горизонтів та шарів вільного НП;
- карти хімічного складу та мінералізації підземних вод;
- карти забруднення ґрунтів та підземних вод НП;
- карти розповсюдження НП-забруднення за межі об'єкту їх зосередження.

В практиці гідрогеологічних досліджень рекомендується для визначення обсягів обстеження використовувати розвідувальне моделювання [5, 11]. При створенні розрахункової схеми моделі слід враховувати особливості міграції НП та води – як у вигляді двох рідин, що не змішуються, так і перенос розчинених вуглеводнів у водоносному горизонті. Відповідним чином, з метою прогнозу міграції НП у водоносному горизонті створюють моделі фільтрації мобільних НП (з використанням, наприклад, програмної системи TFDD) та переносу розчинених вуглеводнів (з використанням програмних систем BIOPLUME,

MT3D, MODTECH тощо). Методика та результати моделювання детально описані в роботах [1, 6, 7, 17, 18].

У практичному плані може бути успішно реалізований метод поетапного виконання польових робіт і поступового накопичення еколого-геологічної інформації.

Для отримання коректних результатів еколого-геологічних досліджень та висновків щодо забруднення має бути задіяна відповідна методично-нормативна база, а саме критерії оцінки рівня забруднення ґрунтів НП. Ґрунти вважаються забрудненими, якщо концентрації НП в них досягають таких значень, при яких починаються негативні зміни у довкіллі, тобто:

- порушується рівновага в екосистемі ґрунтів;
- гине ґрунтова біота;
- падає продуктивність або починають гинути рослини;
- відбувається зміна морфології, водно-фізичних властивостей ґрунтів, знижується їх родючість;
- виникає загроза забруднення підземних та поверхневих вод в результаті вимивання із ґрунту НП та розчинення їх у воді.

Небезпечним рівнем забруднення ґрунту вважається рівень, що перевищує границю потенціалу самоочищення. В зарубіжних країнах прийнято вважати безпечним верхнім рівнем вмісту НП у ґрунті – 1-3 г/кг, початок серйозних екологічних збитків – при вмісті 20 г/кг і вище. Беручи до уваги фізико-географічні умови України (клімат, типи і склад ґрунтів, рослинність тощо), а також характер землекористування, які впливають на процеси самоочищення при НП-забрудненні геологічного середовища, для практики проведення ремедіаційних робіт доцільно прийняти такі ступені градації забруднення ґрунтів нафтою та НП з урахуванням природного вмісту (кларку):

- незабруднені ґрунти < 0.5 г/кг;
- слабо забруднені ґрунти – 0.5-5 г/кг;
- середньо забруднені ґрунти – 5-13 г/кг;
- сильно забруднені ґрунти – 13-25 г/кг;
- дуже сильно забруднені ґрунти > 25 г/кг.

Слабке забруднення може бути ліквідоване в процесі самоочищення ґрунтів у найближчі 2-3 роки, середнє – протягом 4-5 років. Початком серйозних екологічних збитків вважається забруднення ґрунту НП в концентраціях, що перевищують 13 г/кг, тому що при таких концентраціях починається міграція НП у підземні води та істотно порушується екологічна рівновага в ґрунтового біоценозі [8].

Етапи еколого-геологічного обстеження осередків НП-забруднення. Еколого-геологічне обстеження забруднених НП територій викону-

ється поетапно і включає: *пошуки, розвідку і розвідку в період ремедіаційних робіт.*

Мета *пошуків* – виявити та попередньо оцінити ступінь забруднення геологічного середовища НП і ступінь екологічної небезпеки, яку представляє це забруднення. Пошуки розбиваються на стадії: підготовчу, польових досліджень та заключну.

Наукова еколого-геологічна підготовка полягає у збиранні і опрацюванні літературних та фондових матеріалів. За результатами обробки зібраної інформації складаються карти (плани) існуючих і потенційних джерел НП-забруднення геологічного середовища та об'єктів, які можуть потерпати від забруднення (поверхневі водойми та водотоки, побутові колодязі, водозабірні свердловини, сільськогосподарські угіддя, цивільні та промислові споруди), а також стан вивченості геологічних і гідрогеологічних умов.

У польовий період проводяться рекогносцирувальні маршрутні обстеження з відбором проб ґрунтів, поверхневих та підземних вод з метою визначення вмісту НП. Рекогносцирувальні маршрути планують і здійснюють від джерела забруднення геологічного середовища за напрямком потоку ґрунтових вод на максимальну відстань очікуваного розповсюдження НП. Вздовж маршруту бурять пошукові свердловини. Запланована довжина маршруту регулюється фактом виходу в незабруднену зону, яка фіксується на підставі органоліптичної оцінки наявності НП та результатів хімічного аналізу відібраних проб ґрунту та води. Зазвичай кількість пошукових свердловин визначається з розрахунку: одна-дві свердловини уверх за потоком від об'єкта-забруднювача, інші нижче за потоком на відстані 20-50 м [12]. Глибини свердловин, як правило, визначаються глибиною залягання РГВ. Окрім пошукових свердловин опробуються всі водотоки та водойми, побутові колодязі, експлуатаційні та режимні свердловини. Обстежуються місця аварійних розливів НП, встановлені за документальними джерелами та на підставі опитувань очевидців.

Приклад розміщення моніторингових свердловин при обстеженні забрудненої НП території складу ПММ аеропорту Бориспіль, за даними яких оконтурено площу поширення мобільних НП у ґрунтових водах, наведений на рис. 3.

В процесі обстеження фіксують:

- ділянки фактично встановлених та можливих витоків НП;
- ділянки накопичення НП на поверхні землі та інтенсивного НП-забруднення ґрунтово-рослинного шару;
- місця виходів НП у яружно-балочну мережу, природні та техногенні заглиблення на по-

верхні землі, водойми та водотоки, а також у побутові колодязі та дренажні споруди;

- збирають дані, що дозволяють прямо чи опосередковано оцінити величину витоків НП на об'єкті-забруднювачі (фактично зареєстровані витокі, нормативні втрати, обіг НП за період функціонування, час експлуатації обладнання без заміни та капітального ремонту). Слід враховувати, що руйнування об'єктів нафтопродуктозабезпечення внаслідок воєнних дій супроводжуються переважно масштабними аварійними розливами НП;
- дані, що дозволяють прямо чи опосередковано оцінити величину витрати НП та води на ділянці дренажування; вимірюють рівні НП та води у свердловинах, колодязях та дренах, концентрації розчинених у воді НП на ділянці дренажування, технічні характеристики водозабірних та дренажних систем);
- з'ясовують геоморфологічну приналежність ділянок забруднення, ландшафтні характеристики, тип ґрунтів, стан рослинності (можливе пригнічення під впливом НП-забруднення ґрунту).

На заключній стадії на підставі результатів польових і лабораторних робіт складають карти забрудненості ґрунтів зони аерації, поверхневих та ґрунтових вод. На картах відзначається наявність:

- ліній мобільних НП та розчинених НП у ґрунтових водах;
- наднормативного забруднення водоносних горизонтів та водних джерел, що використовуються для господарсько-питних, лікувальних та інших цілей;
- наднормативного забруднення водотоків та водойм;
- наднормативного забруднення ґрунтів та коренежитного шару на землях сільськогосподарського та рекреаційного використання.

За інформацією, відображеною на побудованих картах, встановлюється ступінь екологічної небезпеки існуючих ділянок НП-забруднення геологічного середовища та виконуються спрощені прогнози (аналітичні розрахунки або розвідувальне моделювання) їх поширення у просторі та часі. При цьому виділяють три класи екологічної небезпеки осередків НП-забруднення.

До 1-го класу відносять ділянки, де вже існує або в найближчі 10 років можливе проявлення наднормативного вмісту НП у різних компонентах довкілля, що використовуються в господарських, побутових та інших цілях. Ділянки 1-го класу небезпеки потребують невідкладних ремедіаційних заходів, у тому числі локалізації та ліквідації осередків НП-забруднення. Це є нагальним у випадках усунення наслідків руйну-

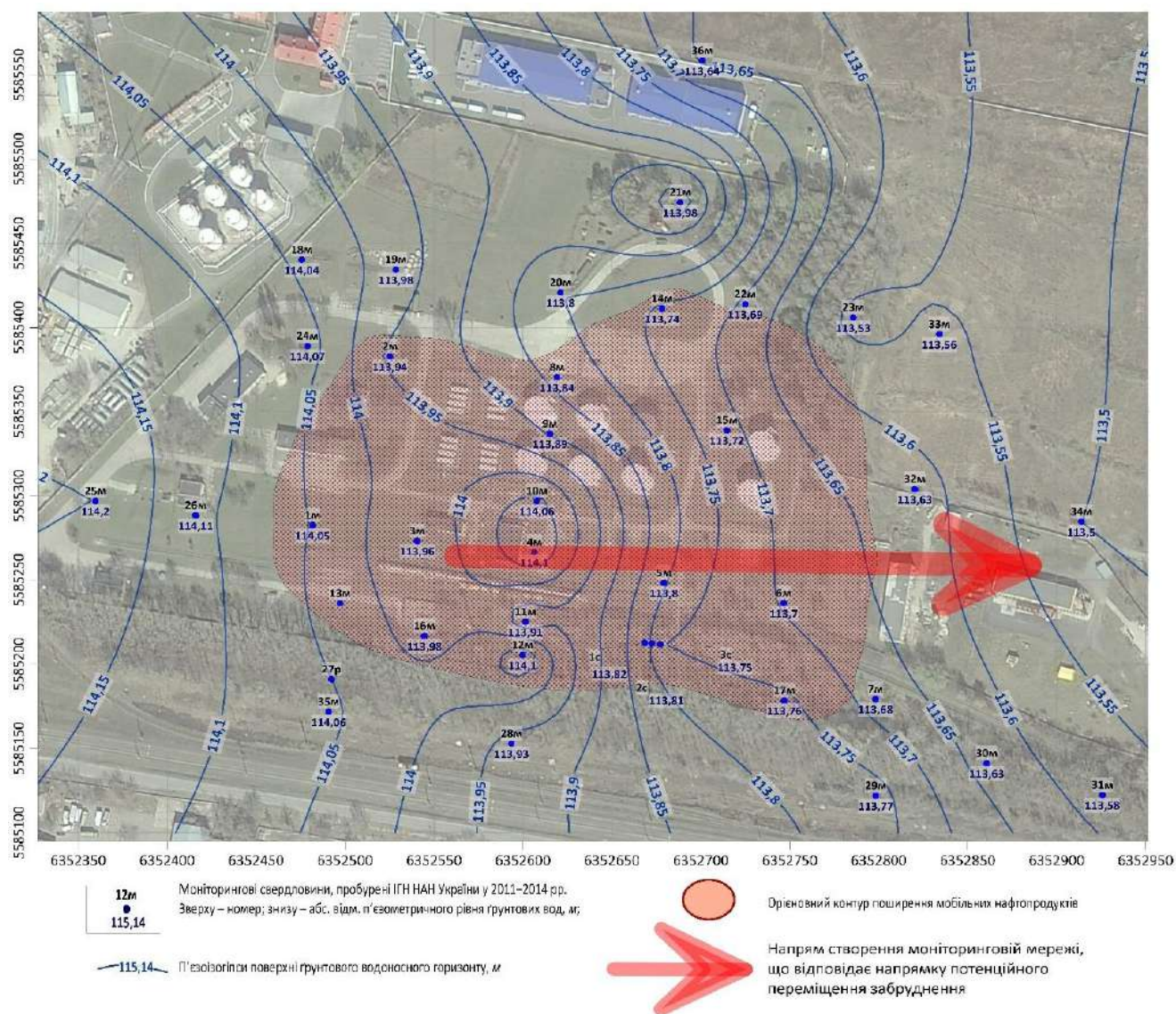


Рис. 3. Карта-схема розміщення мережі моніторингових свердловин на забрудненій НП ділянці складу ПММ аеропорту Бориспіль [21] /

Fig. 3. The map-diagram of the location of the monitoring well network on the site of the fuel and lubricant warehouse (Boryspil Airport) contaminated with petroleum products [21]

вань об'єктів нафтопродуктозабезпечення в результаті воєнних дій.

До 2-го класу небезпеки належать території, де загроза перевищення нормативного рівня НП-забруднення та пов'язаного з ним завдання економічного або соціального збитку може проявитися після 10 років. Тут насамперед необхідно проведення робіт з локалізації та ліквідації осередків забруднення та організації режимних спостережень.

До 3-го класу небезпеки належать території, в межах яких НП-забруднення в реальних умовах не становить суттєвої небезпеки для господарських і соціально орієнтованих об'єктів. Однак при зміні умов знаходження об'єкту НП-забруднення така загроза може виникнути, тому для територій 3-го класу небезпеки рекомендується проведення спостережень за розвитком

НП-забруднення.

Інформація, отримана в ході виконання етапу пошуків, використовується для складання геоекологічного паспорта об'єкта-джерела забруднення і пояснювальної записки до нього [12].

На етапі розвідки дослідження проводяться на території 1-го класу небезпеки з метою вироблення заходів, спрямованих на усунення або ослаблення загрози господарським та соціально орієнтованим об'єктам, а на території 2-го класу небезпеки – з метою вироблення заходів, що запобігають розповсюдженню НП-забруднення.

Основні завдання розвідки:

- оцінка стану НП, що містяться в геологічному середовищі (мобільні, утримувані ґрунтом, розчинені у ґрунтових водах, газоподібні), їх обсягу та розподілу за площею і в розрізі;

- прогноз поширення НП-забруднення у просторі та часі, визначення часу досягнення забруднювачем ділянок височування (дренування) та об'єктів, що використовуються в господарських та інших цілях;
- обґрунтування заходів щодо локалізації/ліквідації осередків НП-забруднення.

Для вирішення цих завдань необхідно виконати:

- картувальні роботи (буріння розвідувальних свердловин, проведення розвідки непрямыми методами, визначення вмісту НП у ґрунтах зони аерації та у водонасиченій частині ґрунтової товщі);
- дослідні роботи з визначення фільтраційних та міграційних параметрів;
- відбір монолітів з усіх літологічних різниць та проведення лабораторних визначень щільності скелета ґрунту та твердих частинок, гранулометричного складу, коефіцієнта фільтрації, параметрів залежності капілярного тиску від насиченості для систем «повітря–вода», «повітря–НП» та «НП–вода»;
- лабораторні визначення складу та властивостей НП (щільність, в'язкість, натяг поверхні розділу «повітря–вода», «повітря–НП» та «НП–вода»), де вода може бути за органолептичними ознаками чистою, але за лабораторними даними містити НП-забруднення;
- моделювання процесів поширення розчинених та мобільних НП – вирішення епігностичних та прогнозних завдань;
- моніторинг рівнів мобільних НП та ґрунтових вод, вмісту у воді розчинених НП та вмісту НП, що утримуються в ґрунтах зони аерації.

Етап *розвідки в період ремедіаційних робіт* поділяється на дві стадії: початкову та оптимізаційну.

Початкова розвідка здійснюється перед ремедіаційними роботами з метою уточнення геологічної будови та гідрогеологічних параметрів, що використовуються для обґрунтування альтернативних інженерних заходів у рамках ремедіації забрудненого геологічного середовища.

Оптимізаційна розвідка виконується в процесі проведення ремедіаційних робіт для з'ясування їх ефективності, уточнення розмірів ореолу НП-забруднення (динаміки його зміни), коригування фільтраційних і міграційних параметрів і виконання на їх основі оптимізаційних розрахунків. Найбільш поширений принцип оптимізації полягає в пошуку такого варіанту розвідувальних робіт, витрати на проведення яких компенсуються економією коштів, що досягається за рахунок підвищення ефективності ремедіаційних заходів, тобто в мінімізації суми витрат на про-

ведення ремедіаційних та розвідувальних робіт.

Обстеження забруднених ділянок на усіх етапах супроводжується картувальними роботами з виявлення і деталізації закономірностей просторового поширення НП у геологічному середовищі (місцеположення, кількості, розмірів, форм і умов накопичення).

Особливості буріння свердловин та супроводжувальних робіт. В даний час для обстеження та моніторингу осередків НП-забруднення найчастіше використовують свердловини, тому що вони дозволяють вивчити літологічні особливості та будову геологічного середовища, відібрати проби води та зразки ґрунту для лабораторного визначення вмісту НП, фізико-механічних та гідрофізичних властивостей. Крім того, буріння з відбором керна дозволяє вже в польових умовах шляхом візуальної оцінки зразків оконтурити принаймні в першому наближенні зону забруднення.

Найбільш достовірні результати забезпечує застосування колонкового буріння без промивання та ударно-канатного буріння, але з метою економії витрат часто застосовують шнекове буріння з періодичним відбором керна за допомогою пробовідбірника. В процесі проходки свердловини особливу увагу слід приділяти зоні, що включає як інтервал забруднення, так і частину товщі, яка знаходиться над і під забрудненням. Недоліком цього способу буріння є те, що він вимагає багаторазового виконання спуско-підйомних операцій, кожна з яких спричиняє неконтрольовану помилку вимірювання. За даними [27], при випробуванні малопотужних забруднених зон помилка виміру може досягати $\pm 25\%$. Буріння потрібно проводити з обсаджуванням, щоб перешкоджати просуванню забруднювача з верхніх шарів до нижніх. Якщо свердловина не призначена для тривалих спостережень, після відбору зразків її потрібно ліквідувати за допомогою тампонажу.

Візуальне виявлення НП по керну може бути ненадійним, особливо якщо наявність НП не призводить до істотної зміни кольору ґрунту або ця зміна подібна до тієї, що спостерігається при змочуванні ґрунту водою. Зміна запаху у зразку теж не завжди помітна, особливо за наявності запаху в оточуючому середовищі. Більш надійні результати дає застосування ультрафіолетового випромінювання (УФВ), під дією якого вуглеводні флуоресціюють у темряві. Ця властивість вуглеводнів зберігається при насиченні ними ґрунтів та розчиненні у воді [27]. Потрібно зауважити, що УФВ не дає можливості кількісної оцінки вмісту НП, але є об'єктивним способом встановлення їх наявності.

Кількісний вміст НП визначається лабора-

торним аналізом зразків. Однак для прогнозу розповсюдження НП і розробки способу їх вилучення в процесі очищення геологічного середовища необхідне знання не тільки вмісту НП у ґрунті, але і їх фазового стану. Кількість НП, що утримуються ґрунтом, може набагато перевищувати кількість мобільних НП. У багатьох випадках забруднення становлять НП, які повністю утримуються ґрунтом і не здатні самостійно переміщуватись. Проте ґрунтова товща, що містить утримувані НП, є джерелом забруднення інфільтраційних вод, які надходять у нижчі незабруднені шари зони аерації та ґрунтові води. Тому відсутність мобільної фази НП не є підставою для виключення ґрунтів, що містять НП, із зони опробування.

Бурові роботи при обстеженні осередку НП-забруднення (м. Біла Церква). При проведенні еколого-геологічного обстеження території колишнього Білоцерківського авіаремонтного заводу (БАРЗ) та урочища Потерчатє (дендропарк «Олександрія») картування НП-забруднення геологічного середовища виконувалось бурінням розвідувальних свердловин, що дозволило оцінити:

- потужність НП-забруднення геологічного середовища;
- наявність мобільних НП;
- межу розділу «гас-вода»;
- рівні ґрунтових вод.

Також відбирались проби води на визначення вмісту розчинених НП.

Згідно з геологічною будовою та гідрогеологічними умовами, в межах ділянки робіт виділені три геофільтраційні схеми. Маркуючим горизонтом для геофільтраційних схем є водоносний горизонт, приурочений до флювіогляціальних підморенних тонкозернистих пилюватих пісків пливунного характеру, середньо-четвертичного віку (fII_{dn}1). До водоносного горизонту переважно приурочено забруднення НП і частково забруднені ними важкі моренні суглинки (gII_{dn}).

Для геофільтраційних схем I та II (територія заводу БАРЗ) буріння виконували ударно-канатним способом діаметром 168 мм до глибини 10-12 м по зв'язним ґрунтам верхньо-середньочетвертичного віку (vdIII_{bg}, gII_{dn}).

Водоносний горизонт був розкритий шнековим бурінням суцільним вибоєм до глибини 17-18 м. При вилученні шнеків за зразками органо-лептично була оцінена зона НП-забруднення. Після вилучення шнеків проводилось буріння без води, з обсадною колоною труб діаметром 146 мм, нижче зони забруднення на 1-1.5 м. В обсадну колону опускалась робоча фільтрова колона діаметром 108 мм з установкою фільтра в інтервалі зони забруднення. Здійснений підйом

обсадної колони труб і желонування, оцінена межа розділу «гас-вода», потужність мобільного гасу, рівень ґрунтових вод. Відбирались проби води для визначення вмісту розчинених НП.

З урахуванням гідрогеологічних умов, а також отриманих параметрів забруднення розвідувальна свердловина може бути обладнана як моніторингова, при цьому обсіпка фільтра є сумішшю великого та середньо-зернистого піску. Свердловина обладнується патрубком, що закривається, а його приземна частина цементується. Розвідувальні свердловини ліквідуються шляхом тампонування їх стовбурів вибуреним ґрунтом.

На ділянках геофільтраційної схеми III буріння виконувалось шнеками та желонкою з обсадною колоною труб (ур. Потерчатє).

За даними буріння оконтурені три лінзи мобільних НП з максимальною потужністю 1,5 м та площинне забруднення ґрунтових вод розчиненими НП з концентраціями 2,34-593,7 мг/л (рис. 4).

Висновки. Повномасштабна російська військова агресія проти України спричинила формування численних масштабних осередків забруднення геологічного середовища НП, які потребують оцінки завданої шкоди довкіллю та проведення ремедіаційних заходів. Запропоновані методичні підходи щодо еколого-геологічного обстеження об'єктів забруднення геологічного середовища НП дозволяють оцінити вплив воєнних дій на геологічне середовище.

Еколого-геологічне обстеження забруднених НП територій виконується поетапно і включає пошуки, розвідку і розвідку в період ремедіаційних робіт. Мета пошуків полягає у виявленні та попередній оцінці ступеню забруднення геологічного середовища НП і ступеню екологічної небезпеки забруднення. Польовий період є основним етапом еколого-геологічного обстеження. Проводяться рекогносцирувальні маршрути, буріння пошукових свердловин з відбором проб ґрунтів, поверхневих та підземних вод з метою визначення вмісту НП. На заключній стадії складають карти забрудненості ґрунтів зони аерації, поверхневих та ґрунтових вод.

Виділені три класи екологічної небезпеки осередків НП-забруднення. До 1-го класу відносять ділянки, де вже існує або в найближчі 10 років виникне загроза наднормативного вмісту НП, і які потребують невідкладного проведення реабілітаційних робіт, у тому числі локалізації та ліквідації осередків НП-забруднення. До 2-го класу небезпеки належать ділянки, де загроза перевищення нормативного вмісту НП та завдання економічного або соціального збитку може проявитися після 10 років – необхідно проведення робіт з локалізації та ліквідації осередків забруднення та режимних спостережень. До

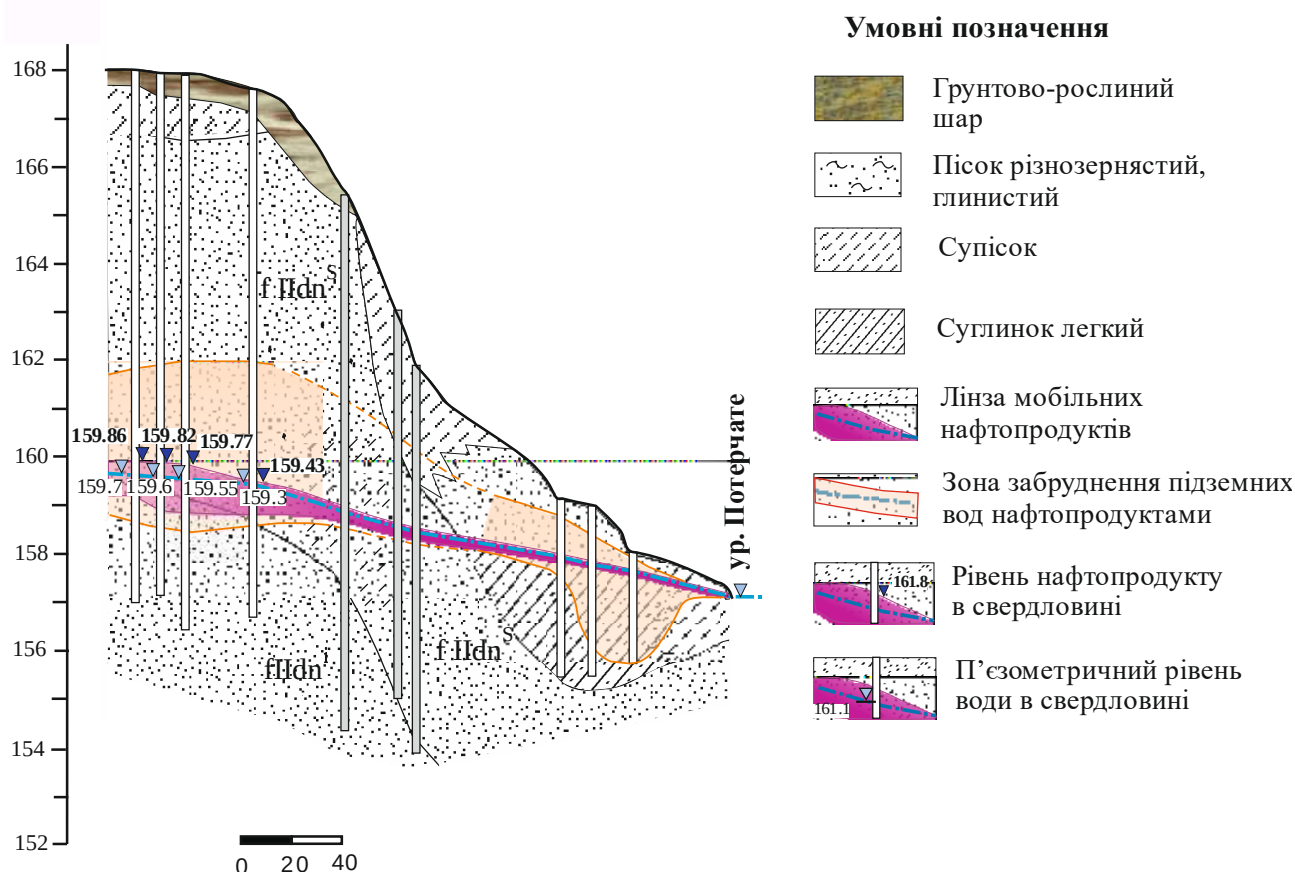


Рис. 4. Поширення НП-забруднення геологічного середовища в напрямку ур. Потерчате (Державний дендропарк «Олександрія») за даними розвідувального буріння [23] /

Fig. 4. Spreading of subsurface contamination with petroleum products in the direction of the Poterchate ravine (Olexandria State Arboretum) according to the data of exploratory drilling [23]

3-го класу небезпеки належать ділянки, у межах яких НП-забруднення не становить суттєвої небезпеки, однак при зміні умов така загроза може виникнути – рекомендується проведення спостережень за розвитком НП-забруднення.

На етапі розвідки дослідження проводяться на території 1-го класу небезпеки з метою вироблення заходів, спрямованих на усунення або ослаблення загрози господарським та соціально орієнтованим об'єктам, а на території 2-го класу небезпеки – з метою вироблення заходів, що запобігають розповсюдженню НП-забруднення. Етап розвідки в період ремедіаційних робіт поділяється на дві стадії: початкову та оптимізаційну. Початкова розвідка здійснюється перед ремедіаційними роботами з метою уточнення геологічної будови та гідрогеологічних параметрів, що використовуються для обґрунтування альтернативних інженерних заходів. Оптимізаційна розвідка виконується в процесі проведення ремедіаційних робіт для з'ясування їх ефективності, уточнення масштабів та динаміки НП-забруднення, коригування фільтраційних та міграційних параметрів і виконання на їх основі оптимі-

заційних розрахунків.

Розроблені принципи еколого-геологічного обстеження осередків НП-забруднення геологічного середовища можуть бути використані на багатьох об'єктах нафтопродуктозабезпечення як цивільного, так і військового призначення, що зазнали руйнувань внаслідок воєнних дій. В контексті російської військової агресії проти України їх застосування забезпечує збір необхідної інформації для оцінки шкоди, завданої довкіллю через забруднення геологічного середовища НП.

Фінансування. Дослідження виконано за конкурсною темою «Стратегічна мінеральна сировина для відновлення економіки України: аналіз ресурсів і запасів, розробка пошукових критеріїв нарощування мінерально-сировинної бази» (№ 0123U100855) за бюджетною програмою КПКВК 6541230 «Науково-дослідні та дослідно-конструкторські (експериментальні) роботи за пріоритетним напрямом «Технології пошуку, видобутку, переробки та використання найважливіших видів мінеральної сировини, проблеми оцінки, збереження та післявоєнного відновлення довкілля» на 2023–2024 роки».

Список використаної літератури

1. Брикс А.Л. Особенности распространения растворенных УВ на участке аэродрома г. Николаев (Украина) [Текст] / А.Л. Брикс, Р.Б. Гаврилюк // Геологічний журнал, 2011. – №1. – С. 120-127.
2. Брикс А.Л. Аспекти поводження із забрудненими нафтопродуктами ділянками геологічного середовища [Текст] / А.Л. Брикс, М.С. Огняник // Геологічний журнал, 2022. – № 3 (380). – С. 18-33. <https://doi.org/10.30836/igs.102568142022325860>
3. Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б., Огняник М.С. Развитие мониторинговых исследований у зв'язку із забрудненням підземних вод НП // Геологічний журнал. – 2017, №1. – С. 37-46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.1.99650>
4. Брикс А.Л., Гаврилюк Р.Б. Трансформація скупчень легких нафтопродуктів, забруднюючих геологічне середовище. Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Геологія, географія, екологія. – 2015, № 1157. – С. 116–123. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/3745>
5. Брикс А.Л., Огняник М.С. Екологія геологічного середовища: забруднення нафтопродуктами. Термінологічний словник-довідник еколога-гідрогеологічного напрямку. Видання друге, виправлене і доповнене. – К: Наукова думка, 2024. – 144 с. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1952-2>
6. Брикс А.Л., Огняник М.С. Математичне моделювання міграції авіаційного газу за межі території військової авіабази / Екологія довкілля та безпека життєдіяльності, 2002. – №3. – С. 51-56.
7. Брикс А.Л., Парамонова Н.К. Особливості методики моделювання руху лінзи НП в геологічному середовищі / Геологічний журнал, 2009. – №4. – С. 107-113.
8. Методика обстеження еколога-геологічного стану територій військових об'єктів. Методичні рекомендації по обстеженню еколога-геологічного стану територій військових аеродромів / Огняник М.С., Митропольський О.Ю., Брикс А.Л., Парамонова Н.К., Голуб Г.І. та ін. К.: ІГН НАН України, 2012. – 209 с.
9. Наукові основи ліквідації забруднення геологічного середовища легкими нафтопродуктами. Звіт про науково-дослідну роботу, № Держреєстрації 0115U005445. 2020. – 224 с.
10. Огняник М.С. Дослідження нафтопродуктового забруднення підземних вод України [Текст] / М.С. Огняник, А.Л. Брикс, Р.Б. Гаврилюк // Геологічний журнал. – 2018, №3. – С. 59–66.
11. Огняник Н.С. Постоянно действующие гидрогеологические модели интенсивно осваиваемых территорий Украинской ССР. Киев: Наукова думка, 1991. – 176 с.
12. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, И.С. Пашковский и др. Киев: [А.П.Н.], 2006. – 278 с.
13. Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 1. Проведение опыта с первоначальным подъемом уровня грунтовых вод после формирования слоя с легким нефтепродуктом. / Геологічний журнал. – 2017а, № 3 (360). – С. 42–54. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.3.117336>
14. Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И. Лабораторные исследования влияния колебания уровня грунтовых вод на состояние и содержание легких нефтепродуктов в геологической среде. Ст. 2. Опыт с первоначальным опусканием напора воды после формирования слоя с мобильным керосином. / Геологічний журнал. – 2017б, № 4 (361). – С. 77–87. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.4.122763>
15. Парамонова Н.К., Голуб Г.И., Запольский И.Н., Логвиненко О.И., Негода Ю.О. Влияние колебания уровня грунтовых вод на формирование остаточных и зацементированных легких нефтепродуктов. / Геологічний журнал. – 2016, № 1 (354). – С. 112–124. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2016.1.97283>
16. Шпак Е.Н., Логвиненко О.И. Исследование природного самоочищения подземной среды, загрязненной нефтепродуктами. / Мінеральні ресурси України. – 2019, № 3. – С. 49–51. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.3.49-51>
17. Шпак О.М. Вивчення впливу біодеградації на забруднення підземних вод нафтопродуктами методом математичного моделювання / Геологічний журнал. – 2015, № 1 (350). – С. 100–106. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2015.1.138728>
18. Шпак О.М. Умови забруднення підземних вод нафтопродуктами в зоні водозаборів (на прикладі Херсонського вузла водозаборів) // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата геологічних наук. Київ: Видавництво “Логос”, 2005. – 24 с.
19. Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І., Запольський І.М. Оцінка впливу коливань рівня ґрунтових вод на трансформацію нафтопродуктового забруднення підземного середовища / Геологічний журнал. 2023. № 2 (383). – С. 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586>
20. Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І., Негода Ю.О. Методичні підходи до планування ремедіаційних заходів на забруднених нафтопродуктами військових територіях / Мінеральні ресурси України. 2023. №4. – С. 13–19. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.4.38-44>
21. Шпак О.М., Гаврилюк Р.Б., Логвиненко О.І. Оцінка ефективності ремедіації геологічного середовища на території складу паливно-мастильних матеріалів аеропорту Бориспіль / Вісник Київського Національного університету. Сер. Геологія. 2022, № 1(96). – С. 76-82. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.11>
22. Еколого-гідрогеологічний моніторинг територій загрози екологічній середовища легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, А.Л. Брикс. Киев, LAT&K, 2013. – 254 с.
23. Bricks Andriy L., Gavryliuk Ruslan B., Negoda Yuriy O. Hazard of petrochemical pollution of ponds of the “Olexandria” arboretum (Bila Tserkva) / Journal of Geology, Geography and Geoecology. – 2020, № 29(2). С. 243-251. <https://doi.org/10.15421/112022>

24. Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. Unraveling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*. 2021. Iss. 13 (7). 898. <https://doi.org/10.3390/w13070898>
25. Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. (2022). A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment* 806 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
26. Havryliuk R.B., Shpak O.M., Negoda Y.O., Lohvynenko O.I., Nikitash O.G. Study of environment contamination with petroleum products in the region of Bila Tserkva eco-industrial park // *Proceedings of 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov 2022, Volume 2022. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580153>
27. Hughes J.P., Sullivan C.R., Zinner R.E. (1988). Two techniques for determining the true hydrocarbon thickness in an unconfined sandy aquifer. In: *Proceedings of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, vol 1. – P. 291-314.
28. Karamushka, V., Boychenko, S., and Havryliuk, R.: *Environmental consequences resulted from the oil depots' deterioration by the RF's missile attacks*, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-478, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-478>, 2024.
29. LNAPL Site Management Handbook (2010). Naval Facilities Engineering Command. 23 p.
30. Milioni A. (2016). Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils. 19 p. <http://www.oil-gasportal.com/remediation-of-hydrocarbon-contaminated-soils>.
31. Newell C.J., Acree S.D., Ross R.R., Huling S.G. (1995). Light nonaqueous phase liquids. *EPA Ground Water Issue*. EPA 540-S-95-500. 28 p.
32. *Understanding Light Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) Behavior in Soil* (2004). EPA Region 3/State Corrective Action Workshop. Rocky Gap Lodge, Maryland.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine

Ruslan Havryliuk¹

PhD (Geology), Scientific Secretary,

¹ Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Olena Shpak¹

PhD (Geology), Senior Researcher;

Olha Lohvynenko¹

Junior Researcher;

Igor Zapolskiy¹

Junior Researcher

ABSTRACT

Formulation of the problem. As a result of Russian military aggression, a significant number of petroleum product supply objects were destroyed in Ukraine, which led to the formation of new sources of subsurface contamination. Such sources cause significant damage to the environment, the assessment of which is one of the key priorities among the entire range of environmental impacts of Russian aggression. The first stage is the assessment of the state of the environment, which includes the determination of objects, nature, scale and features of subsurface contamination. Its results serve as the basis for further stages of damage assessment: development of a monitoring network and restoration measures, the total costs of which should form the basis for a monetary assessment of the damage.

The purpose of the article is to develop a methodology for the environmental and geological survey of petroleum contamination sources taking into account the consequences of the destruction of petroleum product supply facilities as a result of military operations.

The scope of the ecological and geological survey of the petroleum contamination sources is determined by the purpose of its implementation, the size of a survey area and adjacent territories under the influence of contamination, the necessary accuracy of forecasting contamination spreading, and determining the risk to humans and the environment

Main Results. This article describes the methodological aspects of the environmental and geological survey of the sources of subsurface contamination with petroleum products, developed on the basis of our long-term scientific re-

search. The general principles of conducting the ecological and geological survey are described, and the scope and structure of research are proposed at all stages of the ecological and geological survey of petroleum contamination sources: search, exploration and exploration during remedial actions. Three classes of ecological danger of petroleum contamination sources are distinguished. The 1st class refers to contaminated areas where the threat of an above-standard content of petroleum products already exists or it is expected in the next 10 years, which requires urgent remedial actions, including the localization and/or elimination of petroleum contamination sources. The 2nd class of danger refers to territories where the threat of exceeding the regulatory level of petroleum products and the task of economic or social damage is expected after 10 years, and first of all, it is necessary to carry out works on the localization and/or elimination of contamination sources and regular observations. The 3rd danger class includes territories where petroleum contamination does not pose a significant danger but such a threat may arise when conditions change. In this case, it is recommended to observe the development of petroleum contamination. The cases of environmental and geological surveys conducted in the area of the international airport "Boryspil" and Bila Tserkva town, which are potentially comparable to the sources formed as a result of military aggression of the Russian Federation in terms of the scale of contamination, are considered.

Conclusions. The developed principles of ecological and geological survey of the sources of subsurface contamination with petroleum products can be used at many petroleum product supply facilities that were destroyed as a result of Russian military aggression.

Keywords: subsurface, contamination, petroleum products, ecological and geological survey, military impact on the environment, remediation.

References

1. Bricks A.L., Gavrilyuk R.B. (2011). Features of the distribution of dissolved hydrocarbons at the site of the airfield in Nikolaev (Ukraine). *Geological journal*, 1. 120-127.
2. Bricks A.L., Ognyanik M.S. (2022). Aspects of handling areas of the geological environment contaminated with petroleum products. *Geological Journal*, 3 (380), 18-33. <https://doi.org/10.30836/igs.102568142022325860> [in Ukrainian]
3. Bricks A.L., Gavrilyuk R.B., Ognyanik M.S. (2017). Development of monitoring studies in connection with groundwater contamination with petroleum products. *Geological Journal*. 1, 37-46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.1.99650> [in Ukrainian]
4. Bricks A.L., Havryliuk R.B. (2015). Transformation of light petroleum product accumulations contaminating the geological environment. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Ser. "Geology, Geography, Ecology"*, 1157: 116–123 [in Ukrainian]. <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/3745>
5. Bricks A.L., Ognyanik M.S. (2024). Ecology of the geological environment: Pollution by oil products. *Glossary of terms – Dictionary. PH «Naukova Dumka»*. <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1952-2> [in Ukrainian]
6. Bricks A.L., Ognyanik M.S. (2002) Mathematical modeling of aviation kerosene migration beyond the territory of a military air base. *Environmental ecology and life safety*, 3, 51-56. [in Ukrainian]
7. Bricks A.L., Paramonova N.K. (2009). Peculiarities of the method of modeling the movement of petroleum product lens in the geological environment. *Geological journal*, 4, 107-113. [in Ukrainian]
8. Ognyanik M.S., Mitropolskyi O.Yu., Bricks A.L., Paramonova N.K., Golub G.I. etc. (2012). Methodology for surveying the ecological and geological condition of the territories of military facilities. *Methodical recommendations for surveying the ecological and geological condition of the territories of military airfields*. K., IGN NAS of Ukraine. [in Ukrainian]
9. Scientific basis of elimination of subsurface contamination with light petroleum products (2020). Report on research work, State registration number 0115U005445. [in Ukrainian]
10. Ognyanik M.S. (2018) Study of groundwater contamination with petroleum products in Ukraine / M.S. Ognyanik, A.L. Bricks, R.B. Havrylyuk. *Geological journal*. 3, 59–66. [in Ukrainian]
11. Ognyanik N.S. (1991). Permanent hydrogeological models of intensively developed territories of the Ukrainian SSR. Kyiv: Naukova dumka.
12. Fundamentals of studying subsurface contamination with light petroleum products (2006) / N.S. Ognyanik, N.K. Paramonova, I.S. Pashkovsky and others. Kyiv: [A.P.N].
13. Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. (2017a). Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article 1. Conducting an experiment with the initial rise in the groundwater level after the formation of a layer with a light oil product. *Geologichnij zhurnal*, 3 (360): 42–54. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.3.117336>
14. Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I. (2017b). Laboratory studies of the influence of groundwater table fluctuations on the state and content of light petroleum products in the subsurface. Article 2. Experience with the initial lowering of the water pressure after the formation of a layer with mobile kerosene. *Geologichnij zhurnal*, 4 (361): 77–87. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2017.4.122763>
15. Paramonova N.K., Golub G.I., Zapolsky I.N., Logvinenko O.I., Negoda Yu.O. (2016). The influence of groundwater table fluctuations on the formation of residual and entrapped light petroleum products. *Geologichnij zhurnal*, 1 (354): 112–124. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2016.1.97283>
16. Shpak E.N., Logvinenko O.I. (2019). Research of natural remediation of the subsurface contaminated with petroleum products. *Mineral resources of Ukraine*, 3. 49-51. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.3.49-51>
17. Shpak O.M. (2015). Research of biodegradation effect on groundwater contamination with petroleum products using mathematical modeling. *Geologichnij zhurnal*, 1 (350). 100–106. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2015.1.100106>

[6814.2015.1.138728](https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586)

18. Shpak O.M. (2005). Conditions of groundwater contamination with petroleum products in the area of water intake (on the example of the Kherson water intake site). Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geological Sciences. Kyiv: Logos Publishing House. [in Ukrainian]
19. Shpak O.M., Havryliuk R.B., Lohvynenko O.I., Zapolskiy I.M. (2023). Assessment of the impact of groundwater table fluctuations on the transformation of subsurface contamination with petroleum products. *Geologichnij zhurnal*, 2. 40–57. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.2.273586> [in Ukrainian]
20. Shpak O.M., Gavryliuk R.B., Logvinenko O.I., Negoda Yu.O. (2023). Methodical approaches to the planning of remedial actions in military territories contaminated with petroleum products. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 13–19. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.4.38-44> [in Ukrainian]
21. Shpak O.M., Havryliuk R.B., Logvinenko O.I. (2022). Evaluation of the effectiveness of remediation of the geological environment on the territory of the fuel and lubricant warehouse of Boryspil airport. *Bulletin of the Kyiv National University. Ser. Geology*, 1(96), 76–82. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.11> [in Ukrainian]
22. Ecological and hydrogeological monitoring of territories of subsurface contamination with light petroleum products (2013) / N.S. Ognianik, N.K. Paramonova, A.L. Bricks. Kyiv, LAT&K. [in Russian]
23. Bricks Andriy L., Gavryliuk Ruslan B., Negoda Yuriy O. (2020). Hazard of petrochemical pollution of ponds of the “Olexandria” arboretum (Bila Tserkva). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. No 29(2). 243–251. <https://doi.org/10.15421/112022>
24. Bruckberger M.C., Gleeson D.B., Bastow T.P., Morgan M.J., Walsh T., Rayner J.L., Davis G.B., Puzon G.J. (2021). Unravelling Microbial Communities Associated with Different Light Non-Aqueous Phase Liquid Types Undergoing Natural Source Zone Depletion Processes at a Legacy Petroleum Site. *Water*. Iss. 13 (7). 898. <https://doi.org/10.3390/w13070898>
25. Cavelan A., Golfier F., Colombano S., Davarzani H., Deparis J., Faure P. (2022). A critical review of the influence of groundwater level fluctuations and temperature on LNAPL contaminations in the context of climate change. *Science of the Total Environment* 806 150412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150412>
26. Havryliuk R.B., Shpak O.M., Negoda Y.O., Lohvynenko O.I., Nikitash O.G. (2022) Study of environment contamination with petroleum products in the region of Bila Tserkva eco-industrial park. *Proceedings of 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2022. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580153>
27. Hughes J.P., Sullivan C.R., Zinner R.E. (1988). Two techniques for determining the true hydrocarbon thickness in an unconfined sandy aquifer. In: *Proceedings of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, 1, 291–314.
28. Karamushka, V., Boychenko, S., and Havryliuk, R. (2024). Environmental consequences resulted from the oil depots' deterioration by the RF's missile attacks, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-478. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-478>
29. LNAPL Site Management Handbook (2010). Naval Facilities Engineering Command, 23.
30. Milioni A. (2016). Remediation of Hydrocarbon Contaminated Soils. <http://www.oil-gasportal.com/remediation-of-hydrocarbon-contaminated-soils>
31. Newell C.J., Acree S.D., Ross R.R., Huling S.G. (1995). Light nonaqueous phase liquids. *EPA Ground Water Issue*. EPA 540-S-95-500.
32. *Understanding Light Non-Aqueous Phase Liquid (NAPL) Behavior in Soil* (2004). EPA Region 3/State Corrective Action Workshop. Rocky Gap Lodge, Maryland.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 18 July 2024

Accepted 12 November 2024

Перетворювальні можливості геологічних процесів

Сергій Горайнов

к. геол.-мін. н., доцент, кафедра фундаментальної та прикладної геології,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: gorjajnov@karazin.ua

Геологічні процеси створюють динамічну структуру Землі. Вона складається ієрархічною системою геологічних тіл. У статті аналізується взаємини геологічних процесів з ієрархічною системою геологічних тіл, що включає ранги мінеральних індивідів, породних тіл, формаційних покладів, планетарних оболонок і сегментів. В аналіз залучені молекулярний і атомарний ранги об'єктів, бо вони теж беруть участь у геологічних процесах. Використане групування геологічних процесів в 5 відомих типів – теригенні, органогенні, магматичні, метаморфічні, хеомогенно-метасоматичні. Усі геологічні процеси зводяться до перетворень одних геологічних тіл в інші по стадіях: 1) руйнування вихідного субстрату; 2) рекомбінації утворених фрагментів; 3) конструювання нових тіл шляхом з'єднання фрагментів структурними зв'язками. Комбінації тіл різних рангів на різних стадіях процесу зображувалися у вигляді схеми – матриці. У ній показане, тіла яких рангів беруть участь на тій або іншій стадії. Після розгляду перетворювальних можливостей геологічних процесів окремо, було проаналізовано їх різноманітність в цілому. Матриці процесів дозволили на єдиному підґрунті проаналізувати перетворювальні можливості процесів кожного генетичного типу й виявити спільні риси процесів даного типу. Єдиний підхід дозволив зіставити генетичні типи процесів. Порівняння матриць різних груп процесів одного генетичного типу показало, що а) існують ранги об'єктів, які обов'язково руйнуються, рекомбінуються (переносяться) і створюються даними однотипними процесами; б) існують ранги об'єктів, які доступні для переробки й утворення тільки деяким групам процесів цього типу. У зведених характеристиках процесів перші групи рангів становлять "ядро" генетичного типу процесів, а другі – його "периферію". Масштабність проявлення процесу обумовлюють ті ранги геологічних тіл, які доступні йому при перетвореннях. Нові мінеральні індивіди здатні утворюватися в ході всіх процесів, крім теригенних (у них переносяться, руйнуються й сортуються тільки реліктові зерна). Нові породні тіла формуються у всіх процесах. Нові формаційні поклади утворюються також у всіх процесах, крім деяких органогенних. Нові оболонки й сегменти планети можуть формуватися тільки магматичними й деякими метаморфічними процесами. Теригенні, органогенні й хеомогенно-метасоматичні процеси формують оболонки планети тільки спільно. Дана робота являє собою емпіричне узагальнення. Таке узагальнення може послужити підґрунтям вдосконалювання теорії рудоутворення.

Ключові слова: геологічні тіла; геологічні процеси; наукові системи; встановлення залежності між науковими фактами.

Як цитувати: Горайнов Сергій. Перетворювальні можливості геологічних процесів / Сергій Горайнов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 39-54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-03>

In cites: Goryainov Sergey (2024). Transformative capabilities of geological processes. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 39-54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-03> [in Ukrainian]

Постановка загальної проблеми. Геологічні процеси змінюють поверхню й надра Землі, створюючи її динамічну структуру, стали протягом мільярдів років. Ця структура складається ієрархічно організованою системою геологічних тіл [4]. Але взаємини геологічних процесів із цією системою геологічних тіл дотепер не проаналізовані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будь-які природні процеси, у тому числі й геологічні, протікають у певних умовах навколишнього середовища. Зміни цих умов можуть зупинити процес або зробити його неможливим. Базовими для геологічних процесів є наступні умови.

1. Існування планети як природного тіла обмежене певним інтервалом мас, що викликає появу також цілком певних інтервалів інтенсивності поля гравітації. За цими межами або планета стає зіркою, або геологічні процеси на ній неможливі, і вона в підсумку не еволюціонує [1].

© Горайнов Сергій, 2024

Наявність *поля тяжіння* (у певних межах напруженості!) є першою й необхідною передумовою для виникнення й протікання всіх геологічних процесів.

2. Оскільки деякі геологічні процеси відбуваються на твердій поверхні планети, а інші – під нею, остільки необхідною умовою стає саме існування "*кам'яного ядра*" планети, обмеженого цією "твердою поверхнею". Дана умова разом з полем тяжіння створює в надрах літостатичний тиск, що зростає з глибиною [1-3, 6, 10, 14].

3. Щоб поле тяжіння здійснювало якусь геологічну роботу, необхідний *градієнт* поля тяжіння (просторова різниця його потенціалів). Якщо, наприклад, поверхня планети в кожній точці має той самий потенціал (тобто не має ніякого *рельєфу*), то протікання багатьох геологічних процесів неможливо.

4. Багато геологічних процесів вимагають *змін температури* – як ззовні планети, так і усе-

редині. Ззовні Земля нагрівається Сонцем. Звичайна зміна температури поверхні планети забезпечується її обертанням навколо своєї осі (що дає чергування дня й ночі), і обертанням її навколо центрального світила зірково-планетної системи (що зумовлює зміну пір року). Зміни температури усередині планети обумовлені гравітаційною диференціацією її надр, розпадом радіоактивних ізотопів і "приливним тертям" при наявності масивного супутника (або супутників). Зміна температури може змінювати фазовий стан речовин (тверде, рідке, газоподібне) на поверхні й у надрах планети.

5. Деякі геологічні процеси вимагають існування атмосфери у планети, тобто *існування речовин у газовій фазі*. Ця умова не завжди виконується, тому у безатмосферних планет та супутників багато знайомих нам природних процесів неможливі (наприклад, вітер) [17].

6. Багато геологічних процесів вимагають *існування речовин у рідкій фазі*. Найпоширеніша на поверхні Землі рідина – вода. Вона працює і як механічно діючий агент (течії, хвилі та ін.), і як розчинник. Різниця хімічних потенціалів між рідкими й твердими тілами запускає процеси хемогенного типу.

7. Особливістю протікання геологічних процесів на Землі є *наявність життя*. Це приводить до появи різноманітних взаємодій між живими організмами, їх відмерлими залишками й геологічними тілами [7-9]. Завдяки цьому розмаїття й геологічних процесів, і їх результатів зростає.

8. Важливою умовою протікання геологічних процесів є *наявність достатнього часу* для організації самого геологічного процесу й формування його результатів. Ця умова завжди мається на увазі, але не завжди усвідомлюється й формулюється [14].

Звичайно геологічні процеси поділяють на дві великі групи за областями їх проявлення – *екзогенні* (відбуваються на поверхні планети й використовують енергію Сонця) і *ендогенні* (відбуваються в надрах планети й використовують її внутрішні джерела енергії) [2, 6, 10]. Цей поділ не є строгим. Деякі екзогенні процеси, почавшись на поверхні, продовжуються на глибині (наприклад, просочування поверхневих вод під землю). Деякі ендогенні процеси мають "поверхнєве закінчення" (наприклад, вилив лави).

Типізація геологічних процесів була проведена автором на основі аналізу результатів цих процесів – складів, структур і форм геологічних тіл [4]. Структури породних тіл і формаційних покладів виявилися генетичними – неповторними в тілах різного генезису, й тому – індикаторними. Тому надалі буде використовуватися гру-

пування в 5 відомих типів геологічних процесів – *теригенні, органогенні, магматичні, метаморфічні, хемогенно-метасоматичні*. Вони стосуються утворення тіл усіх геологічних рангів.

Ще в XIX ст. встановлено, що геологічні процеси при всій їхній різноманітності мають спільні риси. По визначенню геологічні процеси зводяться до перетворень одних геологічних тіл в інші. Будь-яке таке перетворення включає наступні стадії [12]:

- 1) *руйнування* вихідного субстрату;
- 2) *перегрупування (рекомбінації)* утворених фрагментів;
- 3) *конструювання* з них нових об'єктів (геологічних тіл) шляхом з'єднання розрізаних фрагментів новими структурними зв'язками.

Ці три стадії зручно використовувати для опису самих процесів, порівняння їх між собою, виявлення їх відмінностей і подібності.

Множина геологічних тіл, що приймає участь у геологічних процесах, аналізувалося автором [4]. Була виявлена ієрархічна структура цієї множини, що складається із чотирьох рангів природних (різкісних) геологічних тіл, що послідовно ускладнюються. Показано, що кожний геологічний процес народжує на кожному з рангів тіла двох типів – новостворені й реліктові. Ці особливості також є спільними для всіх геологічних процесів, що зручно для їхнього опису й порівняння між собою.

Невирішена частина загальної проблеми.

Геологічні тіла належать до якого-небудь рангу загальної ієрархічної схеми – мінерального, породного, формаційного або оболонкового [4]. Тому й ті тіла, які руйнуються в ході процесу, і ті тіла, які утворюються у результаті руйнування – також відносяться до тих або інших рангів. Рангові можливості перетворень геологічних тіл геологічними процесами дотепер не аналізувалися.

Мета статті – проаналізувати перетворювальні можливості геологічних процесів з погляду тих об'єктів, які надходять у той або інший геологічний процес, перетворюються в ньому й формують кінцевий результат даного процесу.

Методи дослідження. Робота проведена методом порівняльного аналізу. Підґрунтям аналізу були ранги геологічних тіл – мінеральних індивідів, породних тіл, формаційних покладів, планетарних оболонок і сегментів. В аналіз включені також негеологічні ранги об'єктів (молекулярний і атомарний), оскільки вони теж беруть участь у геологічних процесах.

Усе різноманіття геологічних процесів групувалося в типи по механізмах їх протікання й за одержуваними результатами [5]:

- теригенні процеси відбуваються під впли-

вом рельєфу й клімату місцевості, утворюючи шари й уламки;

- органогенні процеси відбуваються завдяки життєдіяльності організмів і утворюють різноманітні органогенні й біореліктові тіла;

- метаморфічні процеси відбуваються в результаті твердотільних деформацій і утворюють тіла метаморфітів і реліктові блоки й лінзи;

- магматичні й криогенні процеси відбуваються завдяки плавленню й наступної кристалізації розплавів, утворюючи тіла із кристалізаційними структурами й тугоплавкі реліктові ксеноліти;

- хемогенні й метасоматичні процеси відбуваються завдяки взаємодії розчинів з навколишніми твердими тілами; вони утворюють різні апосомі й релікти заміщення/розчинення (резистери) [11].

Геологічні процеси мають стадійність і різноманітність проявів, а їх результати – зональність. Тому одиничні процеси об'єднані в *групи* за умовами прояву. Наприклад, усі елементарні процеси наміву річкових кіс, ерозії берегів, перекочування валунів були об'єднані в групу алювіальних процесів – по спільності природних умов прояву (діяльність ріки). До складу кожного типу процесів включалися кілька груп подібних, але різних процесів, що відрізняються місцем, умовами протікання й результатами своєї дії.

Комбінації тіл різних рангів на різних стадіях процесу зображувалися у вигляді схеми, що є своєрідною *матрицею процесу* (рис. 1). Хрестиками позначена рангова приналежність тіл, які:

- руйнуються в ході процесу (у даному прикладі – вихідні формаційні поклади, породні тіла й мінеральні індивіди);

- рекомбінуються в ході процесу (мінеральні індивіди й породні тіла; молекули й радикали не зачіпаються);

- створюються нові породні тіла й формаційні поклади.

На стадії руйнування утворюються реліктові тіла, які й беруть участь у процесі на стадії рекомбінації. З них на стадії створення формуються новостворені тіла різних рангів.

Складання матриць окремих процесів дозволяє перейти до аналізу їх сукупності в межах типу. Після цього порівнюються перетворювальні можливості типів процесів між собою. Такий аналіз дозволить робити висновки про їхні можливості – зокрема, можливості рудоутворення.

З одержанням порівняльної характеристики перетворювальних можливостей геологічних тіл різними типами геологічних процесів ціль статті вважається досягнутою.

Основні результати дослідження. Спочатку розглядалися перетворювальні можливості

кожного геологічного процесу окремо.

Ранги тел	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный			
Формационный	+		+
Породный	+	+	+
Минеральный	+	+	
Молекулярный			
Атомарный			

Рис. 1. Приклад матриці геологічного процесу / Fig. 1. Example of the matrix of the geological process

Теригенні процеси на поверхні Землі досить різноманітні. Усі вони протікають на тих або інших формах рельєфу в тому або іншому кліматі. Їхня геологічна діяльність додатково обумовлюється комбінаціями граничних умов, які описані раніше. Матриці теригенних процесів представлені на рис. 2.

Процес фізичного вивітрювання. *Руйнування* зазнають більш давні породні тіла й складені ними формаційні поклади будь-якого походження – шаруваті, магматичні та ін. Це породжує гострокутні породні *уламки* різного розміру (брили, щебені, жорству). Можуть викришуватися окремі мінеральні індивіди вихідних порід, що утворюють теригенні *зерна*. *Рекомбінація* уламків і зерен відбувається провалюванням більш дрібних уламків у проміжки між більшими без обкочування й сортування. *Створюється* елювіальний формаційний поклад, складений необкатаними й несорттованими уламками, між якими розташовуються гнізда піску, складені мінеральними зернами. Нові мінерали тут не утворюються – руйнуються й рекомбінуються вже ті, що існували раніше.

Кріотурбаційні процеси *руйнують* формаційні поклади й породні тіла більш давнього віку. Можуть також дробитися мінеральні індивіди. *Рекомбінація* уламкового матеріалу відбувається локально, під дією виморожування й кріотурбацій. У цьому беруть участь породні тіла (шари й уламки), а також утворені зерна. *Створюється* поверхневий формаційний поклад товщиною в перші метри, складений теригенними породами й уламками зі структурою морозних (криогенних) внутрішньшарових деформацій і виморожування (уламки частково відокремлюються від дрібнозему). Нові мінеральні види тут не синтезуються – тільки руйнуються мінеральні індивіди, що утворювалися раніше.

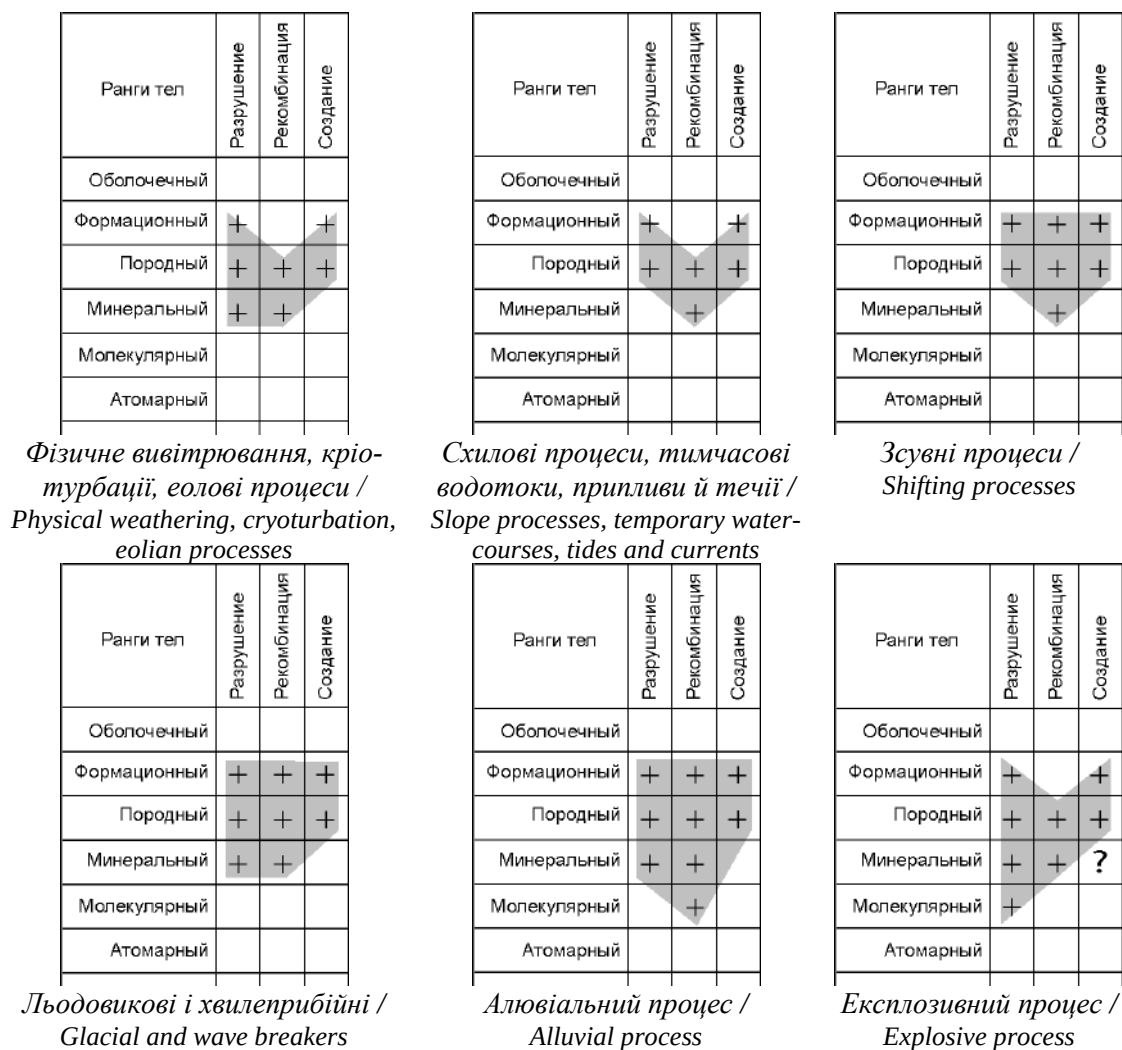


Рис. 2. Зіставлення матриць теригенних процесів / Fig. 2. Comparison of matrices of terrigenous processes

Еолові процеси. Тут руйнування вихідних породних тіл, формаційних покладів і частково мінеральних індивідів, *рекомбінація* уламків і зерен (перенос й сортування) і їх *відкладання* проявляються одночасно, але в різних місцях. Нові формаційні поклади мають зональність будови в напрямку переносу зерен. Кам'янисті пустелі – це область дефляції, джерело еолового матеріалу. По напрямку дефляції вони змінюються піщаними морями, а лесові покриви завершують загальну зональність еолового формаційного покладу. Зміна вітрів зумовлює слойчастість еолових породних тіл – барханів, дюн, лесових покривів.

Вулканогенно-уламковий процес трохи відрізняється від еолового. *Руйнуванню* в ході процесу газами, що розширюються, в основному зазнає тіло розплаву. У ньому можуть бути присутніми або відсутніми кристалокласти. Виверження руйнує більш давні породні тіла й формаційні поклади з утворенням літокластів. Їхня *рекомбінація* (перенесення, сортування) відбувається в повітрі під час польоту. *Створюються*

верстви туфів, які разом з уламками лави й літокластами утворюють новий формаційний поклад. Цей поклад виражений в рельєфі як вулканічна сопка (шлаковий конус). Чи вважати вітрокласти новоствореними мінеральними індивідами – питання поки що відкрите.

Колювіальний процес руйнує більш давні формаційні поклади й породні тіла, формуючи уламки й у незначній кількості – мінеральні зерна. *Рекомбінація* отриманого теригенного матеріалу відбувається швидко – у ході обвалювання або осипання. Сортування або обкочування уламкового матеріалу в ході процесу не відбувається через малий час його протікання. У результаті *створюється* новий колювіальний формаційний поклад, що має форму неправильного одиничного конуса або призми з таких об'єднаних конусів у основі схилу. Поклад має неясну, положисто нахилу (до підшви схилу) шаруватість, зональну будову, і досягає товщини в десятки метрів.

Процеси схилового крипу. Цими процесами *руйнуються* вихідні породні тіла й формаційні поклади з утворенням реліктових тіл – уламків і

мінеральних зерен. При сповзанні по схилу вони *рекомбінуються* (переносяться, частково сортується, поєднуючись із утворенням нових породних текстур). В основі схилів *створюються* нові породні тіла, поєднані в новостворені формаційні поклади (десерпцію, дефлюксію, соліфлюксію), що складаються із новостворених зернистих шарів і реліктових уламків. Через редукованість хемогенного впливу води в ході даних процесів нові мінеральні індивіди не утворюються.

Зсувні процеси провадять *руйнування* вихідних породних тіл і формаційних покладів з утворенням реліктових тіл – ерозійних відокремлень, уламків і мінеральних зерен. У ході оповзання по схилу вони *рекомбінуються* (переносяться, деформуються, дробляться, перемішуються). У основі схилів *формується* новостворені формаційні поклади (деляпсія на суші й флишевої формації в морських умовах). Деляпсії складається переважно з реліктових уламків породних тіл, сформованих з формаційних покладів, які руйнуються. Новостворені породні тіла оточують і цементують їх. У флишевій формації, навпаки, реліктові уламки займають підлегле положення, основний об'єм формації складений новоствореними зональними породними тілами – ритмами.

Екзараційно-моренні процеси охоплюють трохи більший інтервал рангів, ніж попередні. Це пов'язане з великою масою льодовика, здатного руйнувати великі скелі. Льодовикова екзарація *руйнує* давні формаційні поклади й породні тіла з утворенням ерозійних відокремлень, породних уламків і мінеральних зерен. *Рекомбінація* цих фрагментів відбувається в рухомих моренах. У ході руху уламки обкочуються, дряпаються й дробляться до окремих мінеральних зерен. Сортування уламків за розміром не відбувається. *Відкладення* мореного матеріалу пов'язане з таненням льодовика. Відсутність сортування успадковується й на етапі відкладення морен – це не сортовані суміші уламків різного розміру. Мінеральні індивіди в даному формаційному покладі рідко утворюють самостійні шари, частіше цементуючи більші уламки й розсіюючись між ними.

Флювіогляціальний процес. *Руйнування* й розмиву зазнають більш давні породні тіла (льодовикові валуни й інші уламки) і складені ними льодовикові (моренні) формаційні поклади. Обкочування уламків супроводжується їхнім стиранням у потоках і відщипленням мінеральних зерен. *Рекомбінація* утворених уламків і зерен відбувається у водних потоках. Це супроводжується сортуванням їх по розмірах. Глинистий матеріал виноситься за межі льодовикової області – як мінімум у прильодовикові підпрудні озера, а у випадку зандрових полів – за їхні межі.

Відкладання уламкового матеріалу формує нові породні тіла шарів (пісків, алевритів та ін.). Спільно вони утворюють нові шаруваті формаційні поклади – озові, озово-зандрові, озерно-льодовикові.

Делювіальний процес *руйнує* більш давні формаційні поклади й породні тіла – до окремих мінеральних зерен. Мінеральні індивіди вихідних порід у ході обмеженого схилом процесу зруйнуватися не встигають. *Рекомбінація* зерен відбувається в ході недалекого переносу вниз по схилу. Тому сортування матеріалу незначне, а обкочування уламків практично не спостерігається. *Відкладення* уламкового матеріалу формує делювіальний шлейф – самостійний делювіальний формаційний поклад грубо призматичної форми й невеликої товщини. Він складений шарами зернистих порід із включеннями породних уламків (жорстви, щебенів), і закриває підніжжя делювіальних схилів.

Пролувіальний процес у ході глибинної й назадної ерозії *руйнує* більш давні формаційні поклади й породні тіла, але це майже не зачіпає мінеральні індивіди. Для їхнього руйнування енергії потоків недостатньо. *Переносяться* уламки гірських порід (до брил і валунів) і мінеральні зерна. *Створення* нових геологічних об'єктів відбувається в конусах виносу ("сухих дельтах"). Із зерен утворюються нові породні тіла (шари), які разом з уламками складають новий формаційний поклад – або одиничний пролувіальний конус виносу, або серію конусів, що злилися воедино, з утворенням нової моласової формації.

Алювіальний процес *руйнує* більш давні формаційні поклади, породні тіла й мінеральні індивіди. *Рекомбінація* фрагментів відбувається в ході їх потокового переносу у вигляді ерозійних відокремлень формаційних покладів (великих валунів), породних уламків (валунів, гальки, гравію та ін.) і мінеральних зерен. Слід урахувати й перенос речовин у розчиненому (молекулярно-іонному) стані. *Створюються* нові шари і нові формаційні поклади (алювіальні), що мають фаціальну зональність (русліві, заплавні, старичні й ін. фації). Утворення нових мінеральних індивідів з розчинів – це вже не алювіальний, а хемогенний процес, для якого діяльність рік створює вихідні передумови.

Хвилеприбійними процесами *руйнуються* формаційні поклади корінних порід, більш давні породні тіла з утворенням уламків. Руйнування й уламків, і мінеральних індивідів відбувається в зоні прибережної абразії (обкочування, стирання). Енергії хвилеприбійної діяльності досить для часткового руйнування й обкочування мінеральних зерен. *Рекомбінація* мінеральних інди-

відів, породних тіл (зокрема, органічних залишків) і ерозійних відокремлень відбувається в ході їх перенесення (уздовж і впоперек берега) і сортування за розміром. Створення нових об'єктів представлено відкладанням нових шарів, які в сукупності з уламками утворюють шаруваті зональні формаційні поклади.

Ваттові (припливно-відпливні) процеси впливають на перерозподіл морських осадків на літоралі, у затоках і на вершинах підводних підняттях. Руйнуванню завдяки припливам і відливам зазнають формаційні поклади корінних порід і хвилеприбійних наносів, а також більш давні породні тіла з утворенням уламків і зерен. Руйнування мінеральних індивідів під дією припливно-відпливних течій малоімовірно через їхню низьку енергійність. Рекомбінація мінеральних індивідів (зерен) і породних тіл (звичайно дрібного гравію й органічних залишків) відбувається в каналах міграції при переносі й сортуванні за розміром. Створення нових об'єктів представлено новими шарами й шаруватими формаційними покладами, що відкладаються у прибережних літоральних умовах. Нові мінеральні індивіди тут не утворюються.

Глибоководно-намівні процеси відбуваються під дією придонних течій на тих глибинах

Світового океану, де хвилеприбійна або припливно-відпливна діяльність уже не впливає на донні осадки. Руйнуванню в ході діяльності течій можуть зазнати формаційні поклади корінних порід, більш давні породні тіла (зокрема, шари або органічні залишки). Руйнування мінеральних індивідів у ході донної абразії тут малоімовірно через низьку енергійність донних течій. Рекомбінація мінеральних індивідів і породних тіл (частіше органічних залишків, а також продуктів льодового розносу) відбувається шляхом їхнього переносу течіями й попутним сортуванням уламкового матеріалу за розміром. Створення нових об'єктів презентовано новими шарами й шаруватими формаційними покладами, що мають поширення на значних площах Світового океану. Вони можуть формувати підводно-намівні хребти й височини товщиною в сотні метрів - перші кілометри й довжиною в тисячі кілометрів. Таких великих намівів на суші не спостерігається.

Органогенні процеси можливі тільки за умови існування живих організмів. Ці процеси відбуваються в полі тяжіння планети, при обов'язковій участі атмосфери й води, а також під регулюючим впливом змін температури. Матриці органогенних процесів представлені на рис. 3.

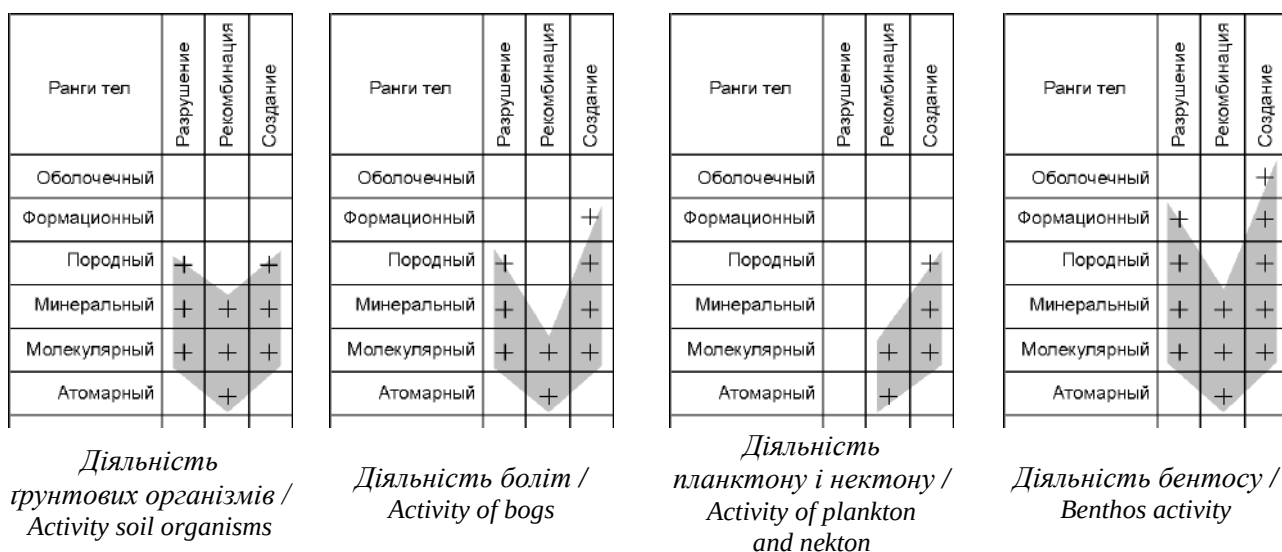


Рис. 3. Матриці органогенних процесів / Fig. 3. Matrices of organogenic processes

Процеси ґрунтоутворення руйнують материнські породи й деякі мінеральні індивіди, частково розчиняючи деякі з них (біогенне вивітрювання). Рекомбінація матеріалу відбувається в іонній і молекулярній розчинній формі й часто усередині організмів. Біотурбаціями можуть переміщатися й мінеральні індивіди. Створюються нові сполуки (органічні й неорганічні), з яких складається полікомпонентне тіло гумусу. Воно просочує теригенну матрицю материнської породи, охоплюючи усе нижчі горизонти. Гумус,

власне, і є органогенним утворенням – результатом діяльності бактерій. Для ґрунтів також характерний широкий розвиток супутніх хемогенних процесів.

Геологічна діяльність боліт. Наземні організми до поховання в болотах руйнують гірські породи, мінеральні індивіди й навіть розчиняють деякі з них біогенним вивітрюванням. Після відмирання й поховання організмів відбувається рекомбінація утвореного матеріалу під дією біохімічних процесів в іонній і молекулярній формі.

Створюються нові сполуки (органічні й неорганічні), синтезуються тіла мінералоїдів типу гумусу. Виникають породні тіла торфів або сапропелів, які можуть вважатися формаційними покладами органогенного походження завдяки бактеріальним процесам, хоча самі ці тіла складені лише відходами їхньої життєдіяльності.

Органогенно-уламкові процеси – результат життєдіяльності кістякових морських організмів (бентосу, планктону і нектону). На відміну від багатьох інших процесів, *руйнівна діяльність* планктонних і нектонних організмів практично відсутня. *Рекомбінація* продуктів зводиться до вилучення з вод готових розчинених і зважених речовин і побудові з них своїх тіл і, зокрема, кістяків. Створюються нові сполуки (органічні й неорганічні), своєрідні біогенні мінеральні індивіди й з них – нові породні тіла (раковини, кістяки), нехай і мікроскопічні. Подальша доля цих породних тіл після смерті організмів визначається або теригенними процесами осадконакопичення, або хомогенними процесами діагенезу. Органогенні уламки кістяків та раковин склада-

ють формаційні поклади вже теригенного походження.

Рифоутворюючі процеси – результат життєдіяльності бентосних кістякових морських організмів. *Руйнівна* роль бентосу в цілому невелика, обмежуючись невеликим горизонтом біотурбації й поверхневим висвердлюванням ходів у твердих предметах. *Рекомбінація* ж матеріалу не обмежується переміщенням піщин, а охоплює молекулярний і атомно-іонний рівні. З розчинених речовин бентосні організми *створюють* усі типи геологічних тіл – від мінеральних індивідів до планетарних сегментів (органогенних смуг), причому впродовж всієї геологічної історії Землі.

Метаморфічні процеси Землі настільки поширені, що можуть вважатися домінуючими. Майже вся мантія Землі, що займає більш 83 % її об'єму – це метаморфічна оболонка. І земна кора більш ніж на 2/3 складається з метаморфічних утворень. Матриці метаморфічних процесів відбивають їхню різну поширеність, енергетику й особливості проявлення в умовах сучасної Землі (рис. 4).

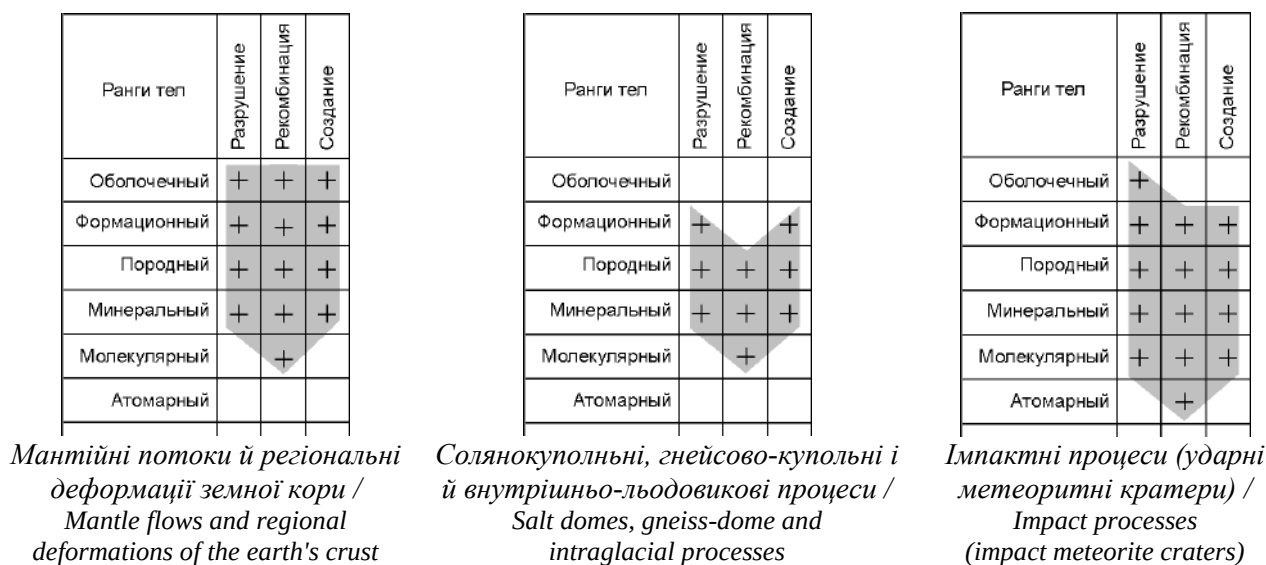


Рис. 4. Зіставлення матриць метаморфічних процесів /

Fig. 4. Comparison of matrices of metamorphic processes

Метаморфічні процеси є теплогенераторами – глобальними, регіональними або локальними. Температурний режим накладає обмеження на метаморфічні процеси. Вони можливі тільки в тих температурних межах, у яких природне середовище *залишається у твердому стані* – не плавиться. Зрозуміло, для різних природних речовин ці температурні обмеження будуть різними.

Мантіїні потоки глобальні по своїх масштабах, вони охоплюють глибини від поверхні планети до поверхні земного ядра. *Руйнування* мантійними потоками зазнають цілі оболонки й

сегменти планети – континентальні фундаменти, осадовий чохол і океанічні плити. Основа руху – твердотільні потоки, що відбуваються шляхом стресової перекристалізації мінеральних індивідів, тобто шляхом розриву й відновлення зв'язків їхніх кристалічних ґраток. *Рекомбінація* утворених фрагментів відбувається як на мікрорівні радикалів і іонів, так і на рівні планетарних сегментів. У результаті *створюється* широкий спектр геологічних новостворених тіл – від мінеральних індивідів до нових мантійних метаморфічних формаційних покладів, що потребують подальшого вивчення.

Регіональні динамометаморфічні процеси також є глобальними. *Руйнування* регіональними деформаціями земної кори зазнають як цілі оболонки й сегменти планети (континентальні фундаменти, осадовий чохол, острівні дуги, океанічні плити), так і окремі мінеральні індивіди (при стресовій перекристалізації з розривом зв'язків їх кристалічних ґраток). *Рекомбінація* утворених фрагментів відбувається як на мікрорівні радикалів і іонів, так і на рівні великих серединних масивів – реліктових тіл більш давніх складчастих областей. *Створюється* широкий спектр геологічних нових тіл – від мінеральних індивідів (кристалобластів) до формаційних покладів складчастих областей і кристалічних фундаментів континентів (планетарних сегментів).

Солянокупольні процеси локальні. У ході формування діапіру *руйнуються* вихідні осадові формаційні поклади – групи соленосних шарів. Породні тіла (шари) починають текти, стаючи більш молодими метаморфічними породами. Вихідні зерна руйнуються до рівня радикалів, перекристалізуючись у новостворені кристалоласти. *Рекомбінуються* як мінеральні індивіди, так і породні тіла. *Створюються* нові мінеральні індивіди, метаморфічні соляні породні тіла й у цілому – новостворений формаційний поклад – соляний діапір. По структурних співвідношеннях з навколишніми тілами такі соляні породи є набагато молодшими за віком метаморфічними утвореннями (аж до сучасних).

Гнейсово-купольні процеси *руйнують* вихідні осадові, метаморфічні й більш давні магматичні формаційні поклади. Їхні породні тіла пластично деформуються при спливанні, стаючи молодшими метаморфічними породами. Вихідні зерна руйнуються з утворенням новостворених кристалобластів. *Рекомбінуються* як мінеральні індивіди, так і породні тіла (тектонічні лінзи). *Створюються* нові мінеральні індивіди, метаморфічні тіла гнейсів і сланців і в цілому – гнейсовий купол, новостворений формаційний поклад. По структурних співвідношеннях з навколишніми синкліналями гнейси є метаморфічними утвореннями, синхронними за віком із зеленими сланцями.

Внутрішньольодовикові процеси відбуваються в льодових породах при негативних температурах. При формуванні льодовиків *руйнуються* вихідні парагенезиси шарів снігу, фірну, фірнового льоду. Їхні породні тіла пластично деформуються під тиском, стаючи більш молодим метаморфічним глетчерним льодом. Вихідні кристали руйнуються з утворенням новостворених кристалобластів. *Рекомбінуються* як окремі молекули води, так і мінеральні індивіди й породні тіла (льоду й уламків гірських порід). *Ство-*

рюються нові кристалоласти, метаморфічні тіла глетчерного льоду й у цілому – новостворені формаційні поклади (льодовики). Їхні розміри можуть досягати розмірів материка. Глетчерний лід є сучасною метаморфічною гірською породою по всіх своїх властивостях.

Імпактні процеси також локальні, але високо енергійні, оскільки протікають на космічних швидкостях [16]. Вони є основним процесом утворення планет. При цьому *руйнування* зазнають не тільки великі формаційні поклади й породні тіла. Можливо й часткове руйнування осадового чохла. При вибуху розриваються також хімічні зв'язки молекул з утворенням перегрітої плазми. *Рекомбінація* матеріалу відбувається шляхом миттєвої витрати плазми на синтез нових високобаричних, у тому числі рідкісних мінералів, і виникненням значних об'ємів розплавів. Відбувається масове перемішування уламків, у тому числі великих тектонічних блоків формаційного складу. Впродовж секунд *створюються* нові мінеральні індивіди, скло, новостворені й реліктові породні тіла (уламки) і новий ударно-метаморфічний формаційний поклад.

Магматичні й криогенні процеси – результат впливу теплового поля Землі на тверді гірські породи, при якому вони починають плавитися, а згодом, при втраті тепла – кристалізуватися. Тому ці процеси можна назвати *кристалізаційними*. Процеси плавлення відбуваються в межах "кам'яних ядер" Землі й інших планет. Саме "кам'яне ядро" планети, будучи твердим тілом, у принципі здатне до плавлення – переходу в рідку фазу. Руйнування вихідного субстрату (до стану рідин) відбите в матрицях кристалізаційних процесів (рис. 5).

Вулкано-плутонічні процеси здатні *руйнувати* плавленням до появи рідин не тільки мінеральні індивіди, але й цілі сегменти планети (океанічні плити). В ході міграції розплавів до поверхні *рекомбінуються* як окремі атоми й іони, так і ксеногенні мінеральні індивіди й породні тіла ксенолітів. *Створюються* з розплавів нові склуваті тіла, мінеральні індивіди (магматогенні кристали), новостворені породні тіла (магматоліти – дайки, продукти диференціації в інтрузивах та ін.), формаційні поклади (вулкано-плутонічні споруди) і нові магматогенні сегменти планети (океанічні плити, вулканічні пояси й ареали, вогненні траси). Вулкано-плутонічні процеси глобальні й створюють нові тіла всіх рангів.

Криогенні процеси відбуваються в криолітозоні планети. У ході криогенних процесів *руйнуються* формаційні поклади (льодовики) і більш дрібні тіла льоду аж до формування потах вод – молекулярних рідин. *Рекомбінація* (пе-

Ранги теп	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный	+		+
Формационный	+		+
Породный	+	+	+
Минеральный	+	+	+
Молекулярный	+	+	+
Атомарный		+	

Вулкано-плутонічні процеси / Volcanic-plutonic processes

Ранги теп	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный			+
Формационный	+		+
Породный	+	+	+
Минеральный	+	+	+
Молекулярный	+	+	+
Атомарный		+	

Криогенні процеси / Cryogenic processes

Рис. 5. Зіставлення матриць кристалізаційних процесів /
Fig. 5. Comparison of matrices of crystallization processes

ренос) матеріалу відбувається водою з іонами, що знаходяться у ній, а також і скупченнями кристалів, і уламками льоду. У результаті криогенних процесів *формуються* нові мінеральні індивіди, породні тіла, формаційні поклади (крижані поля, багаторічні наледі, повторно-жильні льоди та ін.). Криогенними процесами в умовах Землі формуються також особливі криогенні сегменти (парагенезиси льодових формаційних покладів), що займають обидві приполярні області. Відбувається обмін речовиною криогенних сегментів і навколишніх оболонок. Формування льодів зв'язує воду, танення знову її звільняє; води надходять у криолітозону, циркулюють у ній і частково залишають її. Процеси, що відбуваються в криолітозоні – сезонні, а тому швидкі й наочні.

Хемогенно-метасоматичні процеси формують результати взаємодії глобально розповсюджених підземних вод з навколишніми породами. Ця взаємодія відбувається шляхом розчинення, переносу розчиненого речовини і його відкладання [11]. Універсальною причиною відкладання є перенасичення розчину відносно даного компонента. Тому розділення хемогенних і метасоматичних процесів – просто данина традиції.

Різниця у температурах плавлення льодових і силікатних порід обумовлює співіснування в певному інтервалі температур льоду, що вже розплавився, і ще не розплавлених силікатів. Цьому температурному інтервалу й відповідають умови хемогенно-метасоматичних процесів (рис. 6).

Хімічне вивітрювання відбувається під дією ґрунтових вод. *Руйнування* ґрунтовими водами зазнають мінеральні індивіди, породні тіла й формаційні поклади вихідного субстрату. Руйнування доходить до формування нових радика-

лів і іонів, у формі яких і відбувається перенесення і *рекомбінація* отриманих продуктів. З них *створюються* нові колоїдні (аморфні) утворення, мінерали, гірські породи й формаційні поклади кір вивітрювання.

Карстові процеси відбуваються в місцевостях, складених карбонатними, сульфатними й іншими розчинними породами. Формування карсту відбувається під дією тих же факторів, що й кір вивітрювання. *Руйнування* карстовими водами зазнають вихідні мінеральні індивіди, породні тіла й формаційні поклади. Руйнування доходить до формування нових радикалів і іонів, у формі яких і відбувається перенос і *рекомбінація* отриманих продуктів розчинення. З них *створюються* нові аморфні утворення, мінеральні індивіди, новостворені й реліктові породні тіла, а також і формаційні поклади натічних печерних утворів.

Евапоритові процеси починаються з *руйнівної* роботи хімічного вивітрювання в басейнах водойм кінцевого стоку. З вихідного субстрату виносяться розчинні компоненти, що супроводжується розкладанням не тільки мінеральних індивідів, але й окремих радикалів. *Рекомбінація* й перенос продуктів розчинення відбувається у формі радикалів (в основному аніонів) і іонів (частіше це – катіони). З них при випаровуванні *створюються* нові розчинні сполуки, мінеральні індивіди, апосоми й резистери, які в сукупності утворюють хемогенні формаційні поклади.

Діагенетичні процеси є результатом хімічної взаємодії вод, похованих в осадах, з самими осадами. Це перетворює пухкі теригенні осади в щільні зцементовані гірські породи. Поховані в осадах води виносять розчинні компоненти, *руйнуючи* тією чи іншою мірою вихідні зерна, породні тіла й формаційні поклади, утворюючи нові сполуки. *Рекомбінація* й перерозподіл про-

дуктів розчинення відбувається у формі радикалів (в основному аніонів), іонів (катионів) і молекул (частіше газів). З них у сприятливих умовах *створюються* нові нерозчинні колоїдні частки,

хемогенні мінеральні індивіди, апосомі й резистери, які в сукупності утворюють діагенетичні стратиформні формаційні поклади, що просочують осадовий чохол.

Ранги теп	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный			
Формационный	+		+
Породный	+		+
Минеральный	+		+
Молекулярный	+	+	+
Атомарный		+	

Екзогенні процеси (хімічне вивітрювання, карст, евапоритові процеси, діагенез / Exogenous processes (chemical weathering, karst, evaporite processes, diagenesis)

Ранги теп	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный			
Формационный	+		+
Породный	+		+
Минеральный	+		+
Молекулярный	+	+	+
Атомарный		+	

Перехідні процеси (катагенез) / Transitional processes (catagenesis)

Ранги теп	Разрушение	Рекомбинация	Создание
Оболочечный			
Формационный	+		+
Породный	+		+
Минеральный	+		+
Молекулярный	+	+	+
Атомарный		+	

Ендогенні процеси (гідротермальні – тектоногенні, плутоногенні і вулканогенні) / Endogenous processes (hydrothermal - tectonogenic, plutonogenic and volcanogenic)

Рис. 6. Зіставлення матриць хемогенно-метасоматичних процесів / Fig. 6. Comparison of matrices of chemogenic and metasomatic processes

Катагенетичні процеси охоплюють глибокі горизонти осадового чохла й розвинені глобально. В умовах підвищених температур і тисків напірні води частково *руйнують* теригенні шаруваті формаційні поклади й поховані в них органічні рештки, перетворюючи їх у релікти розчинення й заміщення. *Рекомбінація* й міграція речовин у ході катагенезу відбувається переважно у водорозчиненому стані – у вигляді молекул, радикалів і іонів. *Створюються* різнорангові новотвори – від аморфних компонентів вугілля і бітумів до повного заміщення глинистих формацій з утворенням стратиформних формаційних покладів.

Тектоногенні гідротермальні процеси охоплюють усю товщину земної кори в складчастих областях. Термальні води частково *руйнують* більш давні формаційні поклади, змінюючи їх породні й мінеральні тіла. *Рекомбінація* й міграція речовин у ході гідротермального процесу відбувається у водорозчиненому стані – у вигляді молекул, радикалів і іонів. *Створюються* різнорангові новотвори – приповерхні аморфні й колоїдні напливи, парагенезиси гідротермальних мінералів, які утворюють метасоматичні породні тіла, зонально побудовані вертикально-протяжні формаційні поклади (від мігматитових полів на нижніх горизонтах до відкладів термальних джерел на поверхні).

Плутоногенні гідротермальні процеси розвиваються в оточенні інтрузивних масивів. Відбувається часткове *руйнування* більш давніх фо-

рмаційних покладів із заміщенням і розчиненням їх породних і мінеральних тіл до окремих молекул, іонів і радикалів. Саме в такій формі й відбувається міграція й *рекомбінація* розчинених речовин у гідротермальних потоках. У результаті *створюються* різнорангові новотвори – мінеральні індивіди різних розмірів (від мікроскопічних у роговиках до гігантських у пегматитах), зонально побудовані метасоматичні породні тіла, великі формаційні поклади вертикального розвитку.

Вулканогенні гідротермальні процеси розвиваються в оточенні вулканоплутонічних споруд. Вони частково *руйнують* більш давні формаційні поклади із заміщенням деяких породних і мінеральних тіл і вилуговуванням з них окремих компонентів, які у вигляді молекул, іонів і радикалів переносяться й *рекомбінують* у гідротермальних потоках. На їхніх висхідних гілках *створюються* нові хімічні сполуки у вигляді колоїдів, мінеральних індивідів, гідротермальних породних тіл і великих зональних формаційних покладів.

Загальний характер хемогенно-метасоматичних процесів як процесів розчинення й перевідкладення розчиненого матеріалу робить їх уніфікованими. Порівняння їх матриць (рис. 6) показує, що вони однотипні. Це відноситься як до екзогенних процесів (хімічного вивітрювання, формування карсту й евапоритів), так і до ендогенних (гідротермальних).

Аналіз показує, що процеси катагенезу не

можуть бути віднесені повністю до екзогенних або ендегенних. Вони хімічно перетворюють результати екзогенного осадконакопичення, використовуючи ендегенне тепло й тиск. Катагенез є сполучною ланкою між екзогенними ("хемогенними") і ендегенними ("метасоматичними") процесами, маючи з ними всі поступові

переходи й поєднуючи їх у єдину систему. Матриця процесів катагенезу ідентична матрицям і екзогенних, і ендегенних процесів.

Порівняння перетворювальних можливостей процесів. Розглянувши їхні можливості окремо, ми можемо проаналізувати все їх різноманіття в цілому (таблиця 1).

Таблиця 1 / Table 1

Загальна типізація геологічних процесів / General typification of geological processes

Типи процесів	Загальні діючі фактори	Групи процесів
ТЕРИГЕННІ	зміни температури	фізичне вивітрювання
		кріотурбаційні
	вітер	еолові
		експлозивні
	схили рельєфу	колюв'яльні
		крипові
		зсувні
	льодовикове виорювання	екзараційно-моренні
	текучі води на суші	флювіогляціальні
		делюв'яльні
		пролюв'яльні
		алюв'яльні
ОРГАНОГЕННІ	хвилі акваторій	хвилеприбійні
	припливи й відливи	ваттові
	морські течії	глибоководно-намівні
	наземна рослинність	грунтоутворюючі
	заболочування	болотоутворюючі
МЕТАМОРФІЧНІ	відмирання кістякових організмів	органогенно-уламкові
	утворення бентосних колоній	рифоутворюючі
	мантійні потоки	мантійно-потокові (геодинамічні)
	регіональні деформації кори	регіональні динамометаморфічні
	локальні щільнісні інверсії	солянокупольні
	льодовикові потоки	гнейсово-купольні
КРИСТАЛІЗАЦІЙНІ	падіння метеоритів	внутрішньо льодовикові
	плавлення силікатних порід	кратерні (імпакті)
ХЕМОГЕННО-МЕТАСОМАТИЧНІ	плавлення льоду	вулканоплутонічні
	просочування атмосферних вод під землею	криогенні
	випаровування вод	хімічне вивітрювання
	поховання придонних вод	карстові
	занурення водоносних товщ	евапоритові
	деформації водоносних товщ	діагенетичні
	інтрузії магми у водоносні товщі	катагенетичні
		тектоногенно-гідротермальні
		плутоні-, вулканогенно-гідротермальні

Практично кожній групі процесів відповідає певний діючий фактор природного середовища. Наприклад, припливно-відпливні течії породжують ватти; діяльність колоніального бентосу – зростання рифів; падіння метеоритів – імпакті кратери, і т.п. Деякі фактори породжують кілька груп процесів – наприклад, вітер, схили рельєфу, поверхневі й ґрунтові води, та ін. Деякі групи

процесів, у свою чергу, вимагають декількох факторів одночасно (наприклад, вулканогенно-уламкові процеси – дії й вітру, і вулканічного виверження; глибоководно-намівні процеси вимагають і морських течій, і діяльності планктону, та ін.).

Теригенні процеси руйнують переважно формаційні поклади й породні тіла до уламків і

зерен. Деякі процеси здатні руйнувати тією чи іншою мірою й мінеральні зерна обкатуванням і стиранням. Руйнування вихідного субстрату до окремих молекул під силу тільки експлозивним процесам, але це пов'язане з їхнім магматичним початком.

Переміщення уламкового матеріалу відбувається переважно саме у вигляді уламків і зерен. Не усім теригенним процесам доступне переміщення великих ерозійних відокремлень – не вистачає енергії.

Незалежно від здатності теригенних процесів до руйнування й транспортування уламкового матеріалу, усі вони формують шари й шаруваті формації. Жоден з теригенних процесів не здатний самотійно утворити планетарну оболонку. Тільки усі разом вони формують стратисферу.

Загальним для всіх теригенних процесів є те, що при їхньому протіканні не утворюються нові мінеральні індивіди. Тільки руйнуються, переносяться, обкочуються й сортуються зерна із кристалів, сформованих ще при утворенні вихідних порід. Деяким виключенням виглядає алювіальний процес, оскільки в річковому переносі беруть участь і розчинені речовини. Але відкладання їх – це вже хомогенні процеси. Також особняком стоїть група експлозивних процесів, оскільки в ній руйнування вихідного субстрату доходить до молекулярного й навіть іонного рівня (до плавлення). Але в цьому випадку це руйнування відноситься не до теригенного, а до магматичного процесу. Експлозія є його побічним результатом, що формує шаруватий формаційний поклад (туфів). Приклади алювіального й експлозивного процесів указують нам на можливі й навіть обов'язкові *взаємодії процесів різного походження*.

Органогенні процеси можуть руйнувати або не руйнувати вихідний твердий субстрат. Це залежить від умов проживання організмів. Механічного руйнування й розчинення в ході біогенного вивітрювання зазнають породи під дією організмів-грунтоутворювачів, які зариваються, й свердлячого бентосу.

Переміщення утвореного пухкого мінерального матеріалу відбувається в процесі біотурбацій. Але більшість речовин у біосфері циркулює в розчиненому виді – у вигляді іонів і радикалів. Це свідчить про інтенсивність біогеохімічних процесів. Таку глибину перетворення забезпечує обов'язкова участь вод (розчинів) у біогенних процесах.

У результаті життєдіяльності організмів в обов'язковому порядку утворюються нові речовини (органічні й неорганічні). На суші з них утворюються не мінеральні індивіди, а аморфні тіла мінералоїдів (зокрема, гумусові). Їхні пара-

генезиси можуть формувати породні тіла аморфного складу (грунти) і навіть формаційні поклади торфовищ. Але слід особливо підкреслити, що ці сухопутні органогенні утворення формуються тільки *після смерті* вихідних рослинних організмів за рахунок життєдіяльності (в остаточному підсумку) бактерій. І для самих бактерій ці тіла мінералоїдів є "відходами" життєдіяльності, а не складовими частинами їх організмів. Біогенний круговорот викидає їх у навколишнє геологічне середовище, де вони стають субстратом для подальших інтенсивних хомогенних процесів (зокрема, формування вугілля).

У товщі води й на морському дні характер утворювальної діяльності організмів інший. У них утворюються справжні біогенні мінеральні індивіди – нехай дрібні, але утворюючі парагенези; формуються породні тіла (кістякові залишки, "органомінеральні агрегати", по [7]). На цьому процес ускладнення біогенних геологічних об'єктів може й завершуватися, як у планктоні. Але бентосні організми можуть формувати й набагато більш складні геологічні об'єкти – аж до планетарних сегментів (біогенні смуги, складені зрослими органогенними спорудами). Жоден теригенний процес на це не здатний. Таким чином, глибина переробки вихідного субстрату, швидкість круговороту речовин і рангові результати органогенних процесів у цілому перевершують теригенні.

Щодо результатів органогенних процесів слід також зазначити наступне. Неважко бачити, що, наприклад, діяльність бентосу по створенню геологічних об'єктів можлива тоді й тільки тоді, коли самі *організми живі*. Після їхньої смерті починається руйнування і їх кістяків, і навіть великих органогенних споруд. Тому ті геологічні результати, які ми отримуємо від органогенних процесів, автоматично діляться на:

- *утвори смерті*, які формуються на суші й частково в морі; вони утворюються по органічних залишках якими-небудь більш пізніми "накладеними" процесами – найчастіше не органогенними;

- *утвори життя*, винятково морського походження; вони утворюються самим організмами в ході їхньої життєдіяльності.

У морі планктонне породоутворення, при всьому його найширшому розповсюдженні й інтенсивності біогенного кругообігу, має настільки дрібні результати (мінеральні кістяки мікроорганізмів), що їх майже не видно неозброєним оком. І тільки *після їхньої смерті* відбувається накопичення цих реліктів на морському дні у вигляді органогенно-уламкових формаційних покладів – але вже теригенного генезису. Це ж стосується й усіх вапняків-черепашників, на-

митих хвилями. Так мінеральна речовина, створена біосферою, з неї виходить і відкладається в стратисфері – і зараз, і в минулому.

Тому до *утворів життя*, тобто властиво до органогенних ("організмом народжених"), можна віднести тільки органогенні споруди (на рівні формаційних покладів) і біогенні смуги (на рівні планетарних оболонок і сегментів).

Метаморфічні процеси здатні руйнувати вихідні формаційні поклади, породні тіла й мінеральні індивіди. Імпактні процеси також здатні викликати появу недовговічних розплавів, руйнуючи тверді тіла до іонів і радикалів.

Рекомбінація фрагментів субстрату відбувається на рівні швидкоплинної виникаючої "твердотільної плазми" з роз'єднаних радикалів і молекул [13, 15]. Це породжує численні механохімічні реакції. Переміщення матеріалу охоплює також кристалокласти й тектонічні лінзи, а також в окремих випадках тектонічні блоки й навіть цілі планетарні сегменти (мантійні потоки). Перегрупування зруйнованих фрагментів відбувається в різних масштабах часу. Практично миттєво (за частки секунди) перегрупуються активізовані радикали. Рухи мантійних потоків тривають десятками - сотнями мільйонів років.

Утворювальна робота метаморфічних процесів масштабна. Утворюються тіла від кристалобластів до формаційних покладів. Мантійні потоки й регіональні деформації кори здатні формувати також планетарні оболонки й сегменти.

Метаморфічні процеси виявляються визначальними для виникнення й еволюції планет. Завдяки метеоритному бомбардуванню планета утворюється й росте, завдяки метаморфічним потокам вона розділяється на оболонки й сегменти. Їхнє формування генерує основний тепловий потік Землі й структурує надра планети. Інші геологічні процеси запускаються, використовуючи результати метаморфічних процесів – тепло, що генерується, формування рельєфу, дегазацію, відділення води від "кам'яного ядра" і ін. Генерація тепла метаморфічними процесами в багатьох випадках є настільки надлишковою, що породжує плавлення порід, тобто магматизм.

Кристалізаційні (магматичні та криогенні) процеси в силу своєї специфіки фазових переходів досить однорідні. Вони в ході плавлення руйнують вихідний субстрат – від мінеральних індивідів та утворених при цьому молекул аж до цілих планетарних оболонок і сегментів. Значно деструктуються й плавляться океанічні плити, що поринають у мантію; можливе також повне руйнування криолітозон.

Переміщення розплавів можуть захоплювати ксенокристали, ксеноліти й ксенолітні блоки, переносючи їх із глибин до поверхні. Можливі й

переміщення залізистих нижньомантійних розплавів униз, до земного ядра, що виводить такі магматичні процеси за межі сьогоденних можливостей спостереження.

Кристалізація розплавів може породжувати нові аморфні речовини, магматогенні й льодові кристали, магматоліти й льодові жили, вулканоплутонічні споруди й гідролаколіти. У сукупності вони можуть утворювати нові планетарні сегменти – вулканоплутонічні пояси, океанічні плити, криолітозони. Можливо, що і ядро Землі сформоване цими ж процесами.

Кристалізаційні процеси переробляють вихідний субстрат глибше, чим метаморфічні – аж до рівня атомів і іонів. По цьому параметру з метаморфічних процесів з ними може зрівнятися тільки утворення ударних кратерів, оскільки в них також ненадовго виникають розплави (з утворенням тагамітів). Перенос матеріалу в процесах плавлення здійснюється переважно у вигляді рідин і рідше – окремими кристалами й/або у вигляді породних тіл (магматичних ксенолітів і їх криогенних аналогів).

Матриці вулканоплутонічних і криогенних процесів досить подібні, незважаючи на вкрай різні умови їх прояву. Відмінності зводяться до неможливості криогенних процесів руйнувати цілі сегменти планети. Але це – тільки особливість *сучасної* геологічної епохи Землі, що переживає льодовиковий період. На Землі були цілі геологічні періоди (наприклад, з юри по палеоген), коли льодів на Землі зовсім або майже зовсім не було – криолітозони руйнувалися.

Хемогенно-метасоматичні процеси при всій їхній різноманітності мають однорідну рангову характеристику. Це пов'язане зі специфікою міжфазної хімічної взаємодії. Масштаби прояву хімічних процесів у надрах дозволяють руйнувати (з повним або частковим розчиненням) мінеральні індивіди, породні тіла й формаційні поклади.

Перенесення матеріалу здійснюється тільки в розчиненому стані – в іонно-радикальній (атомно-молекулярній) формі. Хемогенно-метасоматичні процеси зв'язують між собою екзогенні й ендегенні процеси, продовжуючись як з поверхні на глибину, так і із глибин до поверхні. Вони також беруть участь у регулюванні теплового балансу Землі.

З розчинів утворюються нові мінеральні індивіди, породні тіла (апосоми) і формаційні поклади. Матриці показують, що жоден з хемогенно-метасоматичних процесів не може *самостійно* утворити оболонку або сегмент Землі. Але у сукупності регіональні формаційні поклади, сформовані окремими хемогенно-метасоматичними процесами за 4 млрд. років, утворили гло-

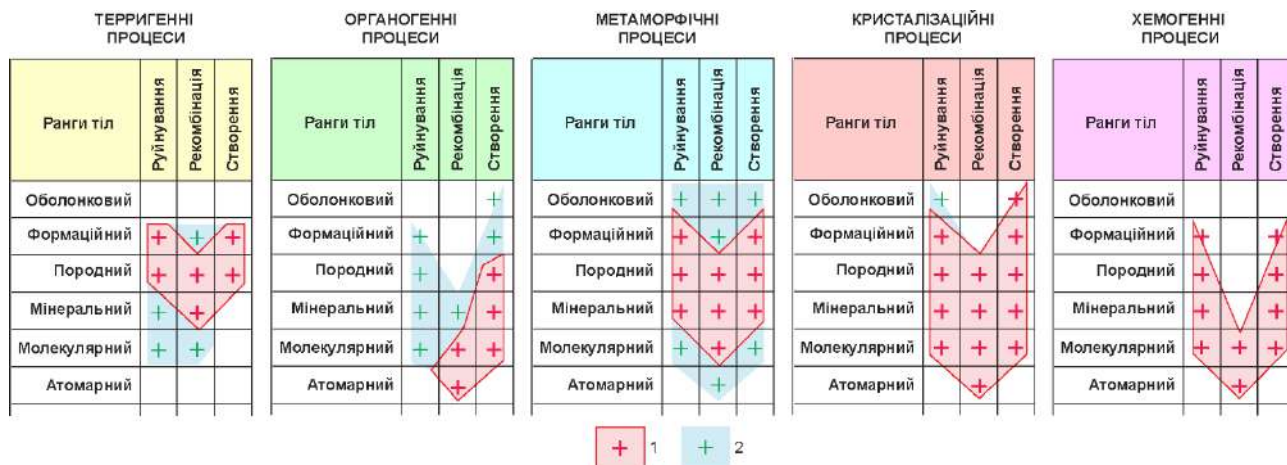
бальну ажурну хемогенно-метасоматичну оболонку ("метасомосферу" [4]). Вона має сітководну (губчасту) форму, просочуючи інші земні оболонки й сегменти.

Інтенсивність і масштабність проявлення процесів того чи іншого типу обумовлюють ранги геологічних тіл, які доступні їм при перетвореннях. Порівняння матриць різних груп процесів одного генетичного типу показало наступне:

- існують ранги об'єктів, які обов'язково руйнуються, рекомбінуються (переносяться) і створюються даними однотипними процесами;

- існують ранги об'єктів, які доступні для переробки й новостворення тільки деяким групам процесів цього типу.

У зведених характеристиках процесів перші групи рангів становлять "ядро" генетичного типу процесів, а другі – його "периферію" (рис. 7).



Наукова новизна. На основі аналізу механізмів протікання геологічних процесів проведено їхню типізацію – об'єднання в п'ять непересічних генетичних типів. На підставі теорії будови геологічних тіл розроблені матриці перетворень таких тіл у ході геологічних процесів. Для кожного геологічного процесу складена своя матриця. Матриці процесів дозволили на єдиній основі проаналізувати перетворювальні можливості процесів кожного генетичного типу й виявити те

загальне, що властиве процесам даного типу. Єдиний підхід також дозволив зіставити різні генетичні типи між собою.

Висновки. Перетворювальні можливості геологічних процесів і їх типів різняться. Зокрема, це стосується можливостей утворення нових мінералів, необхідних промисловості. Таке емпіричне узагальнення може послужити основою вдосконалювання теорії рудоутворення.

Список використаної літератури

1. Александров Ю.В. Введение в физику планет. – Київ : Вища школа, 1982. – 304 с.
2. Аллісон А., Палмер Л. Геологія. – М.: Світ, 1984. – 450 с.
3. Аглонов С.В. Геодинаміка. – Вид. С-П. ун-ту, 2001. – 345 с.
4. Горайнов С.В. Ієрархія різних геологічних тіл. – Харків, 2001. – 564 с.
5. Горайнов С.В. Формалізація та підтвердження закону зміни силової організації новостворених природних тіл // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2010. – Вип. 32. – С. 18-26.
6. Іванік О.М., Менасова А.Ш., Крочак М.Д. Загальна геологія. – Київ. – 2020. – 205 с.
7. Корато А.А. Введення у біомінералогію. – С-П.: Надра, 1992. – 280 с.
8. Марков О.В. Народження складності. Еволюційна біологія сьогодні: несподівані відкриття та нові питання. – Litres (LimPec) – 2018.
9. Островський В.Є., Кадишевський Є.А. Узагальнена гіпотеза походження найпростіших елементів живої матерії, трансформація первинної атмосфери та утворення покладів гідрату метану // Успіхи фізичних наук, 2007. – Т. 177, №2. – С. 183-206.
10. Паранько І.С., Сіворонов А.О., Євтехов В.Д. Загальна геологія. – Кривий Ріг: Мінерал. – 2003. – 464 с.
11. Поспелов Г.Л. Парадокси, геолого-фізична сутність та механізми метасоматозу. – Н.: Наука, 1973. – 355 с.

12. Розенбуш Р. Описова петрографія. – Л.: Горгеонафтіздат, 1934. – 720 с.
13. Слензак О.И. Локальні структури зон напруг докембрія. – Київ.: Наукова думка. – 1984. – 104 с.
14. Сорохтін О.Г., Ушаков С.А. Розвиток Землі. Ред. В.А. Садовничий. – Вид. МДУ, 2002. – 560 с.
15. Чиков Б.М. Зсувне стрес-структурування в літосфері: різновиди, механізми, умови (огляд проблеми) // *Геологія та геофізика*, 1992. – №9. – С. 3-39.
16. Aadland T., Sadler P.M., Helland-Hansen W. Geometric interpretation of time-scale dependent sedimentation rates // *Sedimentary Geology*, V. 371, 2018. – Pp. 32-4. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.04.003>
17. Gingerich Philip D. Rates of geological processes. – *Earth-Science Reviews*, V. 220, 2021, 103723. <https://doi.org/10.1016/J.Earscirev.2021.103723>
18. Ingebritsen St. E., Sanford W. E., Neuzil Ch. E. Groundwater in Geologic Processes. – Cambridge University Press, 2006. <https://doi.org/10.1017/9780511807855>
19. Melosh H.J. Impact cratering: a geologic process. – Oxford University Press, NY., 1989. – 245 p.
20. Електронний ресурс. URL: <https://v-kosmose.com/fotografii-kosmosa/fotografii-obektov-solnechnoy-sistemy/>

Transformative capabilities of geological processes

Sergey Goryainov

PhD (Geology and Mineralogy),

Associate Professor, Department of Fundamental and Applied Geology,

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

Statement of a general problem. Geological processes create the dynamic structure of the Earth. This structure is composed of a hierarchical system of geological bodies. But the relationship of geological processes with this system of geological bodies has not yet been analyzed.

Analysis of the latest research and publications. Back in the 19th century it has been established that geological processes come down to the transformation of some geological bodies into others in stages: 1) destruction of the original substrate; 2) recombination of fragments; 3) constructing new geological bodies from them. A hierarchical structure of many geological bodies has been revealed, including successive ranks: 1) mineral, 2) rock, 3) formational and 4) Earth shells. The entire variety of geological processes is grouped into 5 types according to the mechanisms of their occurrence and the results obtained: 1) terrigenous, 2) organogenic, 3) metamorphic, 4) crystallization (magmatic and cryogenic), 5) chemogenic and metasomatic.

An unresolved part of the overall problem. Bodies that are destroyed and formed as a result of the process necessarily belong to one or another rank. The rank possibilities of transformation of geological bodies by geological processes have not yet been analyzed.

The purpose of the article is to analyze the transformative capabilities of geological processes in the aspect of those objects that enter the geological process, are transformed in it and form the final result.

Research methods. The basis of the comparative analysis was the ranks of geological bodies and non-geological ranks of objects (molecular and atomic), since they also participate in geological processes. Combinations of bodies of different ranks at different stages of the process were depicted in the form of a diagram - a matrix. Matrices of individual processes allowed us to move on to the analysis of this type of process. After this, the conversion capabilities of different types were compared.

Main results of the study. First, the transformative capabilities of each process were considered separately, then the processes of a given genetic type were compared, then the types were compared with each other. Terrigenous processes do not form new mineral individuals and are capable of forming a planetary shell (stratisphere) only together. Organogenic processes form new minerals and rock bodies, but only benthos can form segments of the planet (biogenic bands). Metamorphic processes form new minerals, rocks and formations, and mantle flows and folding processes form planetary shells. Magmatic and cryogenic processes can not only form new minerals, but also form planetary shells. Chemogenic and metasomatic processes, forming new minerals, rocks and formations, form a planetary metasomatic shell only together, and not separately.

Scientific novelty. Based on the theory of the structure of geological bodies, matrices of their transformations in geological processes have been developed. Each geological process has its own matrix. The matrices made it possible to compare the transformative capabilities of individual processes and all five genetic types of processes with each other.

Conclusions. The transformative capabilities of geological processes and their types differ. In particular, this concerns the possibilities for the formation of new minerals needed by industry. Such an empirical generalization can serve as the basis for improving the theory of ore formation.

Keywords: geological bodies; geological processes; scientific systems; establishing relationships between scientific facts.

References

1. Aleksandrov Yu.V. (1982). *Introduction to planetary physics*. Kyiv, Higher School, 304.

2. Allison A., Palmer L. (1984). *Geology*. M., Mir, 450.
3. Aplonov S.V. (2001). *Geodynamics*. Ed. St.-Pt. University, 345.
4. Goryainov S.V. (2001). *Hierarchy of natural geological bodies*. Kharkiv, 564.
5. Goryainov S.V. (2010). *Formalization and confirmation of the law of change in the force organization of newly formed natural bodies*. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (32), 18-26.
6. Ivanik O.M., Menasova A.Sh., Krochak M.D. (2020). *General geology. Tutorial*. Kyiv, 205 [in Ukrainian].
7. Korago A.A. *Introduction to biomineralogy* (1992). St.-Pt., Nedra, 280.
8. Markov A.V. (2018). *The birth of complexity. Evolutionary biology today: unexpected discoveries and new questions*. Litres (LitRes).
9. Ostrovsky V.E., Kadyshovich E.A. (2007). *A generalized hypothesis of the origin of the simplest elements of living matter, the transformation of the primary atmosphere and the formation of methane hydrate deposits*. Uspekhi fizicheskikh nauk, 177, 2, 183-206.
10. Paranko I.S., Sivoronov A.O., Yevtekhov V.D. (2003). *General geology. Tutorial*. Kryvyi Rih, Mineral, 464 [in Ukrainian].
11. Pospelov G.L. (1973). *Paradoxes, geological-physical essence and mechanisms of metasomatism*. Novosib., Nauka, 355.
12. Rosenbush G. *Descriptive petrography* (1934). L., Gorgeoneftizdat, 720.
13. Slenzak O.I. (1984). *Local structures of Precambrian tension zones*. Kiev, Scientific opinion, 104.
14. Sorokhtyn O.G., Ushakov S.A. (2002). *Development of the Earth. Textbook*. Ed. V.A. Sadovnychy. M., MSU Publishing House, 560.
15. Chikov B.M. (1999). *Shear stress-structure formation in the lithosphere: variations, mechanisms, conditions (overview of problems)*. *Geology and geophysics*, 9, 3-39.
16. Aadland T., Sadler P.M., Helland-Hansen W. (2018). *Geometric interpretation of time-scale dependent sedimentation rates*. *Sedimentary Geology*, 371, 32-4. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.04.003>
17. Gingerich Philip D. *Rates of geological processes* (2021). *Earth-Science Reviews*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103723>
18. Ingebritsen St. E., Sanford W. E., Neuzil Ch. E. (2006). *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9780511807855>
19. Melosh H.J. *Impact cratering: a geologic process* (1989). Oxford University Press, NY, 245.
20. Electronic resource. URL <https://v-kosmose.com/fotografii-kosmosa/fotografii-obektov-solnechnoy-sistemy/>

Received 26 June 2024
Accepted 21 November 2024

Проблеми пошуків та діагностики карбонатитів на території України

Василь Загнітко

д. геол.-мін. н., професор, кафедра геології родовищ корисних копалин, ННІ «Інститут геології», Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

e-mail: zagnitkow@i.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-5238-0813>

Достовірно установлені карбонатити на території України мають притаманні цьому класу порід характеристики, зокрема, вони збагачені досить широким спектром рідкісних хімічних елементів, найбільш характерні це рідкісноземельні елементи, стронцій, барій, ніобій, тантал, цирконій. Окрім того вони містять типоморфні мінерали такі як апатит, нефелін, лужні піроксени та амфіболи, тантало-ніобати, рідкісноземельні карбонати та ін. Достовірними ознаками карбонатитів є також особливі ізотопно-геохімічні дані, зокрема, ізотопний склад карбону, кисню, стронцію. На першому місці серед вищезгаданих карбонатитів, за розміром та різноманітністю мінералізації, стоїть Чернігівський масив, карбонатити якого є типовими представниками цієї групи порід. Велика частина карбонатних порід, які мають окремі ознаки карбонатитів не можна віднести до цього класу, оскільки вони не відповідають вибраним критеріям і не містять слідів ендеогенних джерел. Такими об'єктами можна вважати кальцифіри, мармури, скарни та апатит-вмісні породи Середнього Побужжя, (карбонатні асоціації Завалівсько графітового родовища, магнетитові кальцифіри Молдовського залізрудного родовища, карбонатні жили з хромітом Капітанівського родовища, Троянівський апатитовий прояв) флогопітові кальцифіри Верхнього Побужжя (Лукашівський прояв), а також численні метаморфічні карбонатні прояви Приазовського та Інгулецького мегаблоків (Мармурова ділянка Мангуського залізрудного родовища, карбонатні товщі Куксунгурського залізрудного родовища, кальцифіри Старокримської ділянки на периферії лужних масивів, Казанковський прояв та ін.) У цих породах визначено невисокі вмісти рідкісних елементів, відсутність типоморфних мінералів, а їх ізотопно-геохімічні характеристики, як правило, далекі від «карбонатитових». Перспективними районами Українського щита на пошуки карбонатитів можна вважати Приазовський, (продовження Хлібодарівської дайки, Південно-Кальницький масив), Малотерсянський масив, та окремі прояви Волинського мегаблоку УЩ (структура Березова Гать). Потребують додаткових досліджень Анадольське та Азовське родовища рідкісних земель, де ще не виявлені карбонатні породи, але існують геохімічні та петрологічні передумови розвитку карбонатитів (існування потужних зон метасоматичних процесів лужного характеру, зокрема фенітизації, наявність високих концентрацій рідкісних елементів та акцесорних рідкісноземельних карбонатів, тощо).

Ключові слова: карбонатні породи, карбонатити, ізотопний склад, геохімічні особливості, рідкісні елементи, Український щит.

Як цитувати: Загнітко Василь. Проблеми пошуків та діагностики карбонатитів на території України / Василь Загнітко // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 55-63. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-04>

In cites: Zagnitko Vasyil (2024). Problems of search and diagnosis of carbonatites on the territory of Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 55-63. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-04> [in Ukrainian]

Вступ. Карбонатитові родовища є важливим джерелом різноманітних корисних копалин, особливо стратегічних натеper рідкісних та рідкісноземельних металів, без яких неможливо уявити прогрес ІТ технологій та найсучасніших винаходів. На цей час в карбонатитах та сумісних з ними породах виявлено великі та унікальні родовища ніобій-танталових, залізних, мідних, рідкісноземельних руд, флюориту, флогопіту, вермикуліту, апатиту, карбонатної сировини, а також цирконію, барію, стронцію, поліметалів. Підвищує цінність та перспективність промислового застосування таких руд їх комплексне зруденіння. Не менш важливим аспектом виключної уваги до карбонатитових родовищ є і теоретичні питання їх генезису, оскільки існували і дотепер підтримуються окремими дослідниками дуже різні, інколи взаємовиключні моделі їх походження.

Постановка проблеми. Питання мінералогії, петрографії, петрології і геохімії лужних по-

рід, карбонатитів і карбонатитоподібних утворень УЩ вивчалась багатьма авторами [1-5,13,15,17,22 та ін.]. Вперше справжні карбонатити в межах Українського щита були описані в Чернігівській зоні розломів Західного Приазов'я у 60-ті роки минулого століття [2]. Подальші дослідження показали, що цей карбонатитовий комплекс та пов'язане з ним родовище є новим для Українського щита типом апатитових та рідкіснометалевих руд. Враховуючи підвищений інтерес до таких порід та родовищ, з того часу з'явилося і дотепер з'являються багато робіт, які намагаються обґрунтувати приналежність знайдок будь-яких карбонатних утворень до цієї унікальної петрологічної та металогенічної групи. При цьому часто не беруться до уваги такі об'єктивні типоморфні ознаки карбонатитів як тектонічні, геохімічні, мінералогічні, петрологічні та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз більш як 500 карбонатитових родовищ

світу, які достовірно діагностовані на даний час і детально охарактеризовані у капітальних монографіях «Карбонатити» [10] та «Karbonatites» [24], можна виділити декілька характерних ознак, які притаманні майже всім карбонатитовим комплексам за нечисельними виключеннями. Узагальнено їх можна представити у наступному вигляді:

1. Практично всі карбонатитові комплекси просторово і генетично пов'язані із лужними комплексами, причому не тільки ультраосновно-лужного а і лужно-сієнітового спрямування як натрієвого, так і калієвого складу.

2. Майже всі ці комплекси виявлені на древніх або молодих платформах незалежно від віку впровадження, який включає діапазон від межі архей-протерозой (Сілінярві у Фінляндії) і до сучасних вулканічних систем (Олдоїньо-Ленгаї, Африка та ін.), причому строгої кореляції кількості цих комплексів з віком тектоно-магматичних циклів не спостерігається, хоча архейських комплексів поки що достовірно не встановлено, протерозойських проявів відкрито порівняно небагато, а найбільш чисельні масиви приурочені до герцинського циклу [23]. Останнім часом з'являються повідомлення про виявлення подібних порід і у геосинклінальних системах (Анди, Тянь-Шань та ін.), але, по-перше, достовірність приналежності їх до карбонатитів частіш за все дискусійна, а по-друге, інколи у складі молодих геосинклінальних комплексів часто присутні фрагменти більш давнього субстрату.

3. Мінералогічні особливості карбонатитів визначаються специфічним складом магматичних та метасоматичних систем, які їх породжують, а саме насиченістю їх леткими компонентами (галогенами, сульфуром, фосфором, карбонатами та іншими спорідненими сполуками), а також інколи дивовижною сумішшю когерентних і некогерентних елементів, літофільних, сидерофільних, халькофільних та ін., металів. Такі умови призводять до кристалізації мінералів часто екзотичного складу, пересичених рідкісними та рідкісноземельними елементами, F, Cl, CO₂, S, P, інколи зі складними формулами ізохімічних заміщень і т.ін. Ілюстрацією до цього можна навести приклади відкритих за останні 30 років мінералів, більше половини із яких були виявлені саме у карбонатитах та лужно-ультраосновних комплексах. Типовими ж мінералами цих порід можна вважати паризит, бастнезит, баделеїт, пірохлор-гатчетоліт, колумбіт-танталіт, рідкісноземельні апатит та флюорит, флогопіт, циркон та інші збагачені рідкісними елементами мінерали. Асоціювати з ними можуть мінерали, які широко розповсюджені в інших породах: олівіні, лужні піроксени та амфіболи, карбонати, слюди, магнетит, гематит, ільменіт. інколи гранати, сфен, сульфід та ін.

4. Геохімічні характеристики, окрім збагачення рідкісними та рідкісноземельними елементами аж до рудних концентрацій, про що зазначено вище, мають чітку специфіку ізотопних співвідношень як легких елементів (C, O, H, N, S), так і важких (Sr, Nd), яка виразно указує на їх мантийну природу, особливо коли всі ці характеристики узгоджено розташовуються у відповідних полях.

Невирішені аспекти загальної проблеми. Тектонічні і петрологічні властивості карбонатитових комплексів пов'язані із глибинною природою масивів, що їх вміщують, тому основними рисами тектонічних структур є приуроченість до крупних порушень земної кори, що дренують мантию (глибинних розломів, рифтових зон, плюмових осередків та ін.). Петрологічні моделі карбонатитових, як і ультраосновно-лужних масивів, найкраще узгоджуються із гіпотезами часткового плавлення мантийного субстрату або своєрідного «мантийного метасоматозу» [23]. Ці моделі підтверджені багатьма фактами, хоча, як у кожному правилі, бувають і виключення, які, зрештою, теж мають пояснення. Окремою петрологічною проблемою є моделі мобілізації субстрату комплексів, що попадають у глибинні зони субдукції (які, як відомо, можуть заглиблюватися у мантию до 700 км), ці моделі часто вносять сумніви і навіть аргументовані заперечення теоретично строго вивіреною схемою еволюції мантийної речовини. Особливо актуальною є проблема діагностики і генетичної інтерпретації карбонатних порід, що знаходяться серед високометаморфізованих порід гранулітової та амфіболітової фацій, де вони часто набувають ознак ендегенних утворень, особливо при накладанні на них потужних метасоматичних процесів.

Метою даної статті є аналіз існуючих протиречливих моделей генезису карбонатвмісних асоціацій на території України (в основному на Українському Щиті) і пропозиція максимально об'єктивних критеріїв діагностики справжніх карбонатитів. Це дасть можливість більш аргументовано і ефективно проводити пошуки цих надзвичайно важливих порід з точки зору наявності в них стратегічних корисних копалин.

Викладення основного матеріалу. Спробуємо проаналізувати окремі приклади об'єктів, що пропонувалися різними авторами в якості карбонатитів на території, в основному Українського щита та його схилів з точки зору їх відповідності означеним критеріям (рис. 1, табл. 1).

Ці головні критерії можна коротко звести до наступних:

1. Геолого-структурні. Прояви знаходяться в межах лужних масивів, або неподалік від них, де проявлений вплив лужного магматизму на вмісні

породи (лужний метасоматоз, фенітизація, альбітизація та ін.). Форма залягання карбонатних тіл виражена у просторі у вигляді дайок, чітких жил чи прожилків переважно карбонатного складу.

2. Мінералогічні критерії. Наряду з карбонатними мінералами мають бути продукти впливу лужних і летких компонентів: апатит, рідкісноземельні карбонати, флогопіт, флюорит, лужні амфіболи і піроксени, тантало-ніобати та ін.

3. Ізотопні критерії. Ізотопний склад карбону у карбонатах має бути у межах $-2,5-10,5\text{‰}$ (PDB) з невеликим відхиленням в окремих зразках різних генерацій. Ізотопи кисню теж знаходяться в доволі вузькому діапазоні $6-15\text{‰}$

(SMOW). Ізотопний склад стронцію ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$) не має перевищувати 0,7065 для порід, вік яких менше 2400 млн. років. Для архейських і ранньопротерозойських асоціацій можливі суттєво понижені значення (до 0,7016), що пов'язано з особливостями еволюції мантії на межі архей-протерозой.

4. Геохімічні критерії. Карбонатні асоціації містять підвищені, аж до рудних, кількості рідкісноземельних (сума REE не менше 350 г/т) та рідкісних елементів: Ta, Nb, Zr, Sr. Відповідність цим критеріям для більшості карбонатних проявів, які в різний час пропонувались у якості карбонатитів (рисунок), наведена у таблиці 1.

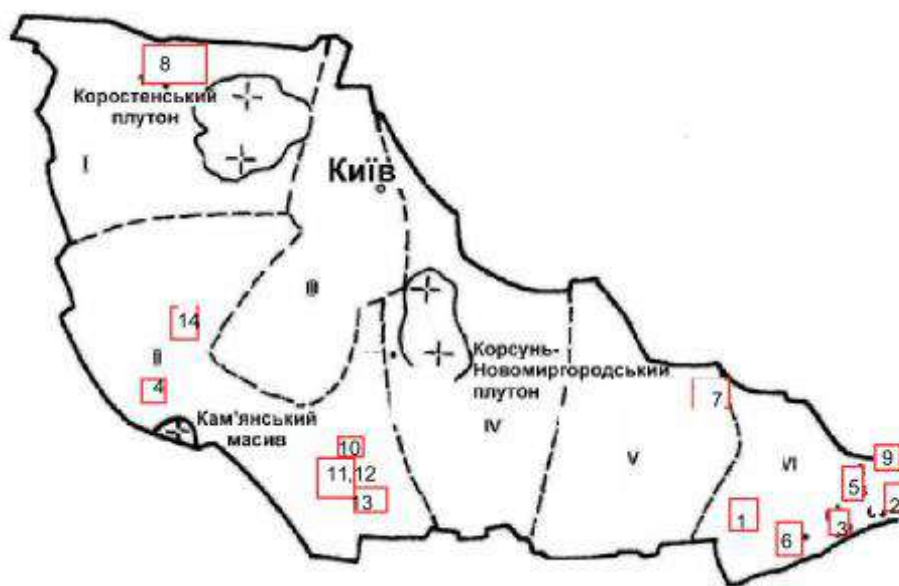


Рис. 1. Розташування проявів карбонатних порід на території Українського щита (назви в таблиці, римські цифри – номери геоблоків: I – Волинський, II – Дністерсько-Бузький, III – Росинсько-Тікицький, IV – Ігульський, V – Середньопридніпровський, VI – Приазовський) / Fig. 1. Location of carbonate rock occurrences on the territory of the Ukrainian Shield (names in the table, Roman numerals – geoblock numbers)

Певною мірою еталонним прикладом карбонатитів на території України можна вважати Чернігівський (Новополтавський) комплекс, який за всіма ознаками відповідає визначенню цього класу порід і включає всі факти, що підтверджують відповідний генезис. Навіть не зовсім характерний для карбонатитів лінійний, а не кільцевий, структурний характер цього масиву, має своє тектонічне і петрологічне пояснення [14].

Головними різновидами карбонатитів Чернігівського комплексу в визначенні [2,14] послідовності формування є сьовіти, альвікіти, бефорсити, фоскорити та кімберлітові карбонатити. За геохімічними характеристиками вони також повністю відповідають ендегенним утворенням з мантії джерелом всіх основних компонентів (табл.). Усі генетичні аспекти цього комплексу дуже багато обговорювались в чисельних стат-

тях, дисертаціях та монографіях тому повторювати ці дані немає потреби.

На відміну від порід Західного Приазов'я карбонатити Східного Приазов'я представлені малопотужними жилоподібними та дайкоподібними тілами. Перш за все це Петрово-Гнутівська флюорит-карбонатна жила, вперше описана як прояв паразита. На думку авторів [17] ця жила має карбонатитову природу та розглядається ними як карбонатитова дайка. На користь цього свідчить як селективно церієвий склад рідкісних земель, в тому числі у складі флюориту та карбонату, так і фенітизація вмисних порід, що характерно для карбонатитів. Петрово-Гнутівська флюорит-карбонатна жила, яка має паразитову мінералізацію, в цілому подібна до рідкісноземельних карбонатитів комплексу Маунтін-Пас, про який згадувалось раніше, Баюнь-Обо та ін. [23,24].

Таблиця 1 / Table 1

Відповідність карбонатних проявів критеріям діагностики карбонатитів
 (+ відповідає; - не відповідає; ~ частково відповідає; ? дані відсутні) /
 Correspondence of carbonate manifestations to the diagnostic criteria for carbonatites
 (+ corresponds; - does not correspond; ~ partially corresponds; ? data missing)

Місце знаходження (масив, прояв)	Геологічна ситуація (геолого-структурний критерій)	Мінералогічний критерій (характерні мінерали)	Ізотопні критерії			Геохіміч. критерій Сума TR %, (г/т)
			$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰ PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{‰ SMOW}}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
1.Чернігівський кар- бонатитовий масив	Крутопадаючі дайки різної потужності, до 100м у лужному масиві +	карбонати, апатит, паризит магнетит, нефелін флогопіт +	-3,0- -8,1 +	5,9- +13,5 +	0,70162 +	до 3,9% +
2.Петрово-Гнутівська флюорит-карбонатна дайка	Дайка (0,3–2,85 м) серед граносієнітів, су- проводжується зонами лужного метасоматозу +	Кальцит, паризит, флюорит +	-5,5- -8,1 +	10,1– +16,6 +	0,70621 ~	до 4,39% +
3.Хлібодарівський кар'єр	Малопотужні жили (5–50 см) серед чарнокітів поблизу лужного масиву +	Кальцит, доломіт паризит, лужні амфіболи та піроксени +	-2,4– -8,5 +	8,5–13,2 +	0,702585 +	до 0,2% +
4.Проскурівський масив	Жили до 0,8 м у складі лужного масиву +	Кальцит, флюорит apatит, флогопіт ~	0,5- +1,7 -	10,5- 11,2 +	0,70435 +	(до 120) -
5.Октябрьський масив	Малопотужні жили (до 0,8 м) серед лужних порід, та нефелінових сієнітів +	Кальцит, іноді сиде- рит, доломіт, флогопіт, лужні амфіболи та піроксени +	-5,1– -8,6 +	6,2–14,1 +	0,7024– 0,7029 +	(589– 3345) +
6.Південно- Кальчицький масив	Малопотужні (до 0,2м) дайкоподібні жили в сієнітах +	кальцит, сидерит флюорит +	-5,8- -7,2 +	9,9 12,7 +	0,70623 ~	(1450) +
7.Малотерсянський масив	Жили потужністю від 5 см до 16 м в лужному масиві +	Кальцит, іноді сидерит, доломіт, анкерит ~	-5,6– -10,6 +	10,7– 21,0 ~	0,70232 +	(2300– 20000) +
8.Волинський мегаблок, Березова Гать	Прожилки до 10 см в зонах лужного метасоматозу +	Карбонати, апатит ~	-6,5 -15,8 +	8,5-17,4 ~	0,70290- 0,70355 +	?
9.Покрово- Кирівський масив	Ефузивні брекчії, прожилки ~	Карбонати, апатит ~	-9,1- +2,8 ~	10,2- 19,4 ~	0,70536 ~	(до 5000) +
10.Завалівське графі- тове родовище	Потужні товщі серед гнейсів (до 300 м) -	Карбонати, флогопіт, олівін -	-0,1- +1,2 -	19,8- 21,5 -	0,70632 ~	(85) -
11.Молдовське родовище заліза	Потужні (до 100 м) ділянки серед гнейсів, залізистих кварцитів -	Карбонати, магнетит, олівін, флогопіт -	-1,5 -4,8 ~	11,9- 14,8 ~	0,70712 -	(35) -
12.Капітанівське хромітове родовище	Жили, ксеноліти серед ультрабазитів ~	Карбонати, хроміт, піроксени ~	-1,5- +4,7 -	14,2- 18,4 -	?	(42) -
13.Троянківський апатитовий прояв	Пластоподібні тіла різної потужності (до 30 м) -	Карбонати, апатит ~	+3,5- +5,8 -	17,5- 21,3 -	0,70483 ~	(87) -

14.Лукашівський флогопітовий прояв	Карбонатні тіла серед чарнокітів (до 30-40 м) -	Карбонати, апатит, флогопіт ~	-0,5 +4,8 -	16,9- 22,6 -	0,70822 -	(54) -

До карбонатитів належать також кальцитові дайки та жили з егірином та апатитом Хлібодарівського кар'єру, відкриті автором у 1981р. і описані у [4,8]. Про карбонатитову природу цих утворень свідчать: високий вміст стронцію (1-3 %), підвищений - рідкісних земель, наявність таких характерних мінералів карбонатитів, як апатит, пірохлор, монацит, ізотопно-геохімічні дані (табл.), а також екзоконтактові ореоли фенітизації повздовж них. На південному продовженні дайки однією свердловиною, пробуреною за рекомендацією автора, встановлені карбонатні тіла потужністю до 1,0 м з паризитом, але за відсутністю фінансування подальші пошукові роботи не були продовжені.

Формаційна приналежність Хлібодарівських кальцитових дайок і жил і Петрово-Гнутівської флюорит-карбонатної дайки потребує подальшого вивчення. Всі ці породи збагачені рідкісними землями, стронцієм та іншими типовими для карбонатитів елементами (табл.), що зближує їх з утвореннями Чернігівського масиву [4].

Однією із ознак наявності карбонатитів є процес інтенсивної фенітизації вмісних гранітоїдів (та інших силікатних, особливо кварцвмісних порід). Зокрема, Хлібодарівська карбонатитова дайка, яка розтинає чарнокіти та кристалічні сланці, утворює фенітові ореоли, що деколи в 2-3 рази потужніші за самі карбонатні тіла в чарнокітах, але зовсім не залишають ореолів у кристалосланцях.

У Проскурівському масиві спостерігаються феніти лужно-сієнітового, граносієнітового або лужно-гранітного складу, які відокремлюють нефелінові породи від гранітоїдів рами [14]. Вони також згадуються у роботі [21] як "безфельдшпатоїдні" сієніти, "очкові кварцові сієніти". Акцесорні мінерали цих порід представлені апатитом та карбонатом. В Проскурівському масиві встановлено карбонатні прояви у формі жил потужністю до 80 см, які пов'язані із зоною брекчування середньозернистих ійоліт-малінітів. За своїм складом ці прояви було віднесено до своєрідних порід типу апатитових сьовітів. За ізотопними даними кисню та даними рентгенолюмінесцентного аналізу рідкісноземельних активаторів Ce^{3+} , Eu^{2+} , Sm^{3+} в апатитах, ці карбонатні прояви вважаються карбонатитоподібними породами, в той час як ізотопно-карбонати дані та підвищені співвідношення ізотопів стронцію свідчать про суттєву корову складову цих асоціацій.

За даними [11] Октябрьський масив має в своєму складі карбонатвмісні, суттєво карбонатні породи та тектонічні брекчії, які зцементовані

карбонатом. Усі ці різновиди зустрічаються серед основних, ультраосновних, лужних порід, в тому числі нефелінових сієнітів. Частіші за все карбонатні прояви пов'язані з габро та піроксенітами, які зазнали найсильніших та найглибших змін. У цьому випадку розрізняють карбонат-польовошпат-слюдисті (по габро) та карбонат-біотит-амфіболові (по піроксенітах) різновиди. Характерною рисою всіх карбонатних проявів Октябрьського масиву є наявність в них апатиту, циркону, пірохлору, які асоціюють з кальцитом. Це свідчить про те, що формування цих порід супроводжувалося апатит-рідкіснометалевою мінералізацією, що є типовою ознакою карбонатитів. Карбонатні утворення значно збагачені стронцієм, ітрієм, цирконієм, ніобієм, лантаном, церієм. Значення $\delta^{13}\text{C}$ та $\delta^{18}\text{O}$ карбонатів Октябрьського масиву відповідають типовим карбонатитам, а співвідношення $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ свідчать про глибинне джерело карбонатної речовини (табл. 1).

Кременівський масив, який входить до складу Південно-Кальчицького комплексу, представлений сієнітами, кварцовими сієнітами і гранітами. В межах масиву (зокрема в Кальчицькому кар'єрі) спостерігаються карбонатні жили та відокремлення потужністю до 0,5м., які іноді вміщують флюорит. Жили складаються з кальциту, інколи анкериту та сидериту, збагачені рідкісними землями. Варто відзначити, що в межах Південно-Кальчицького масиву відкрито унікальне Азовське рідкісноземельно-цирконієве родовище, а неподалік Анадольське родовище TR. Ці родовища, на думку деяких дослідників [22] теж пов'язані із карбонатитовим магматизмом, хоча суттєвих карбонатних проявів у їх межах поки що не виявлено.

Малотерсянський лужний масив складається головним чином із нефелінових та лужних сієнітів. В межах західного контакту масиву встановлено широкий розвиток процесів фенітизації з утворенням порід проміжного складу між вмісними гнейсо-мігматитами та лужними сієнітами. Тут також були виявлені жильні тіла карбонатних порід, які утворились на думку [23], внаслідок заміщення дайкових тіл. Геохімічними особливостями карбонатитів Малотерсянського масиву, за даними згаданих вище авторів, є збагаченість їх барієм, літієм, рубідієм, цинком, молібденом, важкими лантанідами та ітрієм в складі РЗЕ. Наші ізотопні дані теж свідчать про ендегенну природу, принаймні частини із цих утворень. Ситуація ускладнена тим, що в розрізі присутні також фрагменти явно метаморфічних кальцифірів, які за геохімічними та іншими ха-

рактеристиками подібні до карбонатних порід приазовської серії.

Північно-західна частина Українського щита (Волинський мегаблок) також може бути перспективною на знаходження проявів карбонатитів. В 80-ті роки поблизу Коростеньського плутону (с. Березова Гать) знайдено незвичні для даного регіону лужні метасоматити егірин-альбітового складу. За даними [13] дослідження речовинного складу цих метасоматитів дозволяє розглядати їх як феніти, не відкритого ще карбонатитового комплексу. На користь цього свідчать також прояви мельтейгітів з фенітами екзоконтактового ореолу арфедсоніт-егірин-альбітового складу в районі смт Городниця, які ідентичні фенітам Березової Гаті. Окремі прожилкові тіла карбонатного складу серед цих порід мають геохімічні характеристики, близькі до карбонатитів.

Розвиток складного за своєю будовою Покрово-Киріївського масиву, пов'язаний із герцинським етапом формування Донбасу. Масив складений лужними та сублужними інтрузивними, екструзивними (дайковими) та ефузивними породами, які інтенсивно змінені калішпатизацією, альбітизацією, егіринізацією, хлоритизацією, серпентинізацією і зкварцюванням. Карбонатні утворення, які можна співставити за речовинним складом із карбонатитами, мають жило- та дайкоподібні тіла, що залягають серед метасоматично змінених порід лужного та сублужного складу. Деякі автори розрізняють магматичні та метасоматичні (рідкіснометалеві і безрудні) карбонатити, виділяють також ефузивну фацію [22]. Геохімічні дані не підтверджують карбонатитову природу цих порід, а зв'язок їх з лужними породами можна пояснити метасоматичним впливом багатих леткими компонентами лужно-базальтоїдних магм.

Кальцифіри та мармури Середнього Побужжя дуже гетерогенні не тільки за своїм складом, але і за походженням, а це давало підстави для прояву багатой геологічної фантазії щодо генетичних схем. У різні роки пропонувались метаморфічні моделі навіть з палеогеографічними реконструкціями осадових обстановок [8] і залишків бактерій [16], метасоматичні схеми шляхом перетворення ультрабазитів в кальцифіри [6] і, нарешті карбонатити [12]. Зокрема, у якості "карбонатитів" пропонувались кальцифіри і мармури Завалля [12], карбонатно-магнетитові асоціації Молдовського родовища [18,20], своєрідні карбонатні лінзи і жили із хромітом Капітанівського родовища [1], апатит-карбонатні асоціації Троянківського прояву.

Більша частина їх (хашувато-завалівська світа бузької серії) має ранньопротерозойський вік, що визначається датуванням розгнейсованих

чарнокітоїдів (можливо ефузивів?), які залягають в одному розрізі із карбонатними породами в Завалівському графітовому кар'єрі [8]. Кальцифіри та мармури присутні тут як потужні (до 800 м) товщі у складі бузької серії. За ізотопним складом ці карбонатні породи відповідають первинноосадовим утворенням, при цьому відрізняються дуже вузькими діапазонами значень $\delta^{13}\text{C}$ та $\delta^{18}\text{O}$ ($0.5 \pm 0.5 \text{ ‰}$ та $20.5 \pm 0.5 \text{ ‰}$ відповідно).

В той же час багато карбонатних порід, які раніше вважались складовими бузької серії, за нашими даними, є насправді метасоматичними утвореннями за рахунок карбонатизації ультрабазитів, що відбувалася, в свою чергу, за умов масового вивільнення CO_2 під час глибокого метаморфізму глинисто-карбонатних асоціацій, або пластичного переміщення карбонатних мас. Це стосується перш за все карбонатних тіл Капітанівського хромітового родовища, де вони часто містять вкрапленість хроміту за мізерних кількостей рідкісних елементів, як і ультрабазити уявного субстрату.

Карбонатно-магнетитові кальцифіри, які в деяких публікаціях останнім часом пропонується віднести до карбонатитів, [18] - це, вірогідно, частково пластично мобілізовані переважно карбонатні маси які, як правило, не відповідають своєму первинному розташуванню, а переміщені на невеликі відстані [9]. За ізотопним складом вони наближаються до ендегенних утворень, але можна прослідкувати чітку ізотопну зональність, що в цілому відповідає метасоматичній, або вказує на домішки ендегенної складової, апріорі присутньої у метасоматизуючих розчинах.

Апатитовий прояв біля с.Троянка на Середньому Побужжі за деякими параметрами схожий на замінене апатитове родовище Селігдар на Алданському Щиті, яке багато дослідників вважали карбонатитовим. Однак дослідження В. М. Гулія та наші ізотопні дані показали повну неспроможність такого припущення, [3]. Троянківський прояв виявився повним геохімічним аналогом Селігдарського родовища, отже і для цього прояву можуть бути заперечені будь-які карбонатитові моделі.

Прояви карбонатних порід серед чарнокітів, гіперстенових та біотитових гнейсів в районі Верхнього Побужжя були виявлені в багатьох ділянках і детально описані в [21]. Особливий інтерес в контексті порівняння з карбонатитами представляють доволі потужні прояви карбонатних порід, збагачених флогопітом, поблизу с. Лукашівка. Були навіть повідомлення про наявність у них нефеліну [21], що незвично для метаморфічних кальцифірів і притаманно карбонатитам. У свій час навіть були виділені кошти на

пошуки карбонатитів у цьому районі. Детальні дослідження цих порід, включаючи наші ізотопно-геохімічні (табл.), не підтвердили ендегенну природу цих утворень і проояв був прийнятий у ДКЗ як флогопітовий. Подібну природу мають багаточисельні прояви у Верхньому Побужжі (райони Гнівани, Тиврова, Голосково, Сабарова, Жежелева, Калинівки та ін. [8]. Інколи ці карбонатні тіла розтягнуті по зонах тектонічних порушень, що справляє враження жильних або дайкоподібних форм, але ні метасоматичного впливу на вмісні породи, ні збагачення характерними мінералами чи рідкісними елементами, які вказували б на їх ендегенну природу, не виявлено.

Висновки. Таким чином, карбонатні породи, виявлені на території України, які в різний час пропонувались у якості карбонатитів, за групою визначених критеріїв можна розділити на 3 групи:

1. Масиви і прояви, що повністю відповідають критеріям і можуть бути інтерпретовані як класичні карбонатити, що відрізняються за специфічними характеристиками, зокрема, вони можуть бути збагачені або дещо збіднені спектром певних хімічних елементів, що пояснюється різними генетичними нюансами (фації глибинності, металогенічна специфіка, лужна спеціалізація і т. ін.). До них належать Чернігівський (Новополтавський) масив, Хлібодарівський прояв, жили і дайки Октябрського масиву, Петрово-Гнутівська дайка, Малотерсянський масив.
2. Прояви, що частково відповідають критеріям, оскільки мають гібридні ізотопні та інші характеристики, що пояснюється змішуванням корових і мантіїних джерел, накладанням вторинних структур і процесів, гіпергенний вплив та ін. Такими можна вважати карбонатні жили Проскурівського масиву, прояв Березова Гать.
3. Карбонатні товщі і прояви метаморфічних і метасоматичних асоціацій, які знаходяться серед супракрустальних порід і мають типові або змінні внаслідок тектоно-магматичної активізації відповідних блоків геолого-структурні, мінералогічні та ізотопні характеристики, які можуть набувати ознак, близьких до карбонатитових. До цієї групи можна віднести багаточисельні ксеноліти та пласти, що асоціюють із чарнокітами, ендербітами, ультраметаморфічними та метасоматичними гранітами або перешаровуються з іншими метаморфічними утвореннями: Лукашівський флогопітовий прояв, Молдовське та інші родовища залізистих кальцифірів і мармурів Середнього Побужжя та Приазов'я, Троянківський прояв апатит-вмісних кальцифірів та інші.
4. Виходячи із закономірностей розташування карбонатитових проявів, перспективними для пошуків нових родовищ можна вважати Приазовський мегаблок (продовження, коріння або відгалуження Хлібодарівської та Петрово-Гнутівської дайок, карбонатні прояви Південно-Кальчицького масиву у тому числі можливо пов'язані із рідкісноземельними Азовським та Анадольським родовищами), зона зчленування Приазовського та Середньодніпровського мегаблоків (Малотерсянський масив), та Волинський мегаблок УЩ (структура Березова Гать).

Список використаної літератури

1. Воеводін В.Н. О классификации эндогенных карбонатных пород // Отечественная геология, 2006, №6, с. 72-76.
2. Глевасский Е.Б., Кривдик С.Г. Докембрийский карбонатитовый комплекс Приазовья. – Киев, Наук. думка, 1981, с.227.
3. Гулий В.Н., Загнитко В.Н., Парфенова А.Я. Сравнительная характеристика карбонат-апатитовых ассоциаций Украинского и Алданского щитов // Полезные ископаемые – формирование, прогноз, ресурсы, С.-Пб., 5-8 июня 1999 г. СПбГУ. – С. 155.
4. Дубина О.В., Кривдик С.Г., Вишневський О.А. Мінералогія і петрологія карбонатитів і фенітів Хлібодарівського прояву // Мінералогічний журнал, 2024, 46 (1): 45-66 <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.46.01.045>
5. Ентин В. А., Гинтов О. Б., Мычак С. В., Юшин А. А. Структура Молдовского железорудного месторождения (Украинский щит) по геолого-геофизическим данным и его возможная эндогенная природа // Геофизический журнал, 2015. –Т. 37, №4, с.3-18.
6. Еришов В.А. Ультраосновные породы Украины и связанные с ними полезные ископаемые // Петрографические провинции, изверженные и метаморфические горные породы. М.: Издательство АН СССР, 1960, с. 183-193.
7. Жуков Г.В., Вархатов В.А., Сахацкий И.И. Об открытии фосфатной минерализации в Западном Приазовье // Геологический журнал, 1973, Т. 33, вып. 5, с. 144-146.
8. Загнитко В. Н., Луговая И.П. Изотопная геохимия карбонатных и железисто-кремнистых пород Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1989, с. 316.
9. Загнитко В.М., Гоголев К.І. Нестандартні моделі перетворення залізорудних формацій в енде- та екзогенних умовах. Матеріали конференції «Залізорудні родовища України: сучасні проблеми та перспективи розробки». – Київ, 2024 р. – С.41-45.
10. Карбонатиты. Науки о Земле. Под ред. О. Таттла, Дж. Гиттинса. М.: Мир. 1969г., 486 с.

11. Ковалев Е.М., Стрекозов С.Н., Загнитко В.Н., Луговая И.П. Карбонатные породы Октябрьского щелочного массива (Украинский щит) // Известия АН СССР, сер. геол., 1988, №7, с. 128-133.
12. Коломиец Г.Д. Новые данные о протоплатформном карбонатитовом магматизме Украинского щита // Тезисы докладов IV регионального петрографического совещания по Европейской части СССР. – Петрозав., 1987, с.44.
13. Кривдик С.Г., Ткачук В.И. Формационная принадлежность щелочных метасоматитов Березовой Гати // Доклады АН УССР, сер. Б, 1987, №1, с. 13-16.
14. Кривдик С.Г., Ткачук В.И. Петрология щелочных пород Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1990, с. 407.
15. Кривдік С.Г., Дубина О.В., Довбуш Т.І. та ін. Sr^{87}/Sr^{86} в апатитах із лужних і основних порід Українського щита // Мінералогічний журнал, 2011. – Т. 33, №3, с. 55-70.
16. Лазуренко В.И., Рябенко В.А. Хорунжий В.Я. Некоторые разновидности ископаемых водорослей из докембрийских карбонатных пород // Геологический журнал, 1977. – Т. 37, №2, с. 121-125.
17. Марченко Е.Л., Коньков Г.Г., Васенко В.И. О карбонатитовой природе Петрово-Гнатовской флюорит-карбонатной дайки Приазовья // Доклады АН УССР, сер. Б, 1980, №1, с. 24-27.
18. Поповченко С.Е., Корниенко П.К. Квалификационные признаки карбонат-ультрабазитовых массивов Украинского щита // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Геологія. Географія», 2014. Вип. № 15. – С. 2-17.
19. Самойлов В.С., Коваленко В.И. Комплексы щелочных пород и карбонатитов Монголии // Труды сов.-монг. научно-исслед. геол. экспед. Выпуск 35. – М.: Наука, 1983. – С. 152-159.
20. Усенко О.В. Еволюція складу мантіїних флюїдів у докембрії (на прикладі залізистих формацій Українського щита) // Геофізичний журнал, 2022. – № 2, Т. 44, с. 3-28. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256263>
21. Царовский И.Д., Брацлавский П.Ф. Нефелиновые породы верхнего Побужья // Доклады АН СССР, 1980. – Т. 255, №2, с. 424-427.
22. Царовский И.Д., Брацлавский П.Ф. Нефелиновые породы Днестровско-Бугского района. – Киев: Наук. думка, 1980, с. 46 (препринт АН УССР Ин-т. геохимии и физики минералов).
23. Шеремет Є.М., Кривдік С.Г., Стрекозов С.М., Дубина О.В., Сетая Л.Д. До питання щодо генезису Анадольського рідкісноземельного родовища (Україна) // Мінералогічний журнал, 2016, 38 (4): 75-85 <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.04.075>
24. Шраменко И.Ф., Стадник В.А. Осадчий В.К. Геохимия карбонатитов Украинского щита. – Киев: Наук. думка, 1992, с. 212.
25. Carbonatites. Genesis and Evolution. Edited by Keith Bell. London. Unwin Hyman. 1989. – P. 618.
26. Le Bas, M.J., Kellere, J., Kejie, T. et al. Carbonatite dykes at bayan Obo, inner Mongolia, China. Mineralogy and Petrology, 46, 1992. – P. 195–228. <https://doi.org/10.1007/BF01164647>

Problems of search and diagnosis of carbonatites on the territory of Ukraine

Vasyl Zahnitko

DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Department of Geology of Mineral Deposits,
Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

Reliably established carbonatites on the territory of Ukraine have characteristics inherent in this class of rocks, in particular, they are enriched with a fairly wide range of rare chemical elements, the most characteristic are rare earth elements and strontium, niobium, tantalum, zirconium. In addition, they contain typomorphic minerals such as apatite, nepheline, alkaline pyroxenes and amphiboles, tantalum-niobates, rare earth carbonates, etc. isotope and geochemical data, in particular, the isotopic composition of carbon, oxygen, strontium.

Problem statement. Most of the carbonate rocks that have certain characteristics of carbonatites cannot be attributed to this class, since they do not meet the selected criteria and do not contain traces of endogenous sources. An important problem is the choice of objective criteria for diagnosing endogenous carbonatites and, on their basis, to outline promising areas for the search for new manifestations and deposits.

Unresolved aspects of the problem. The genetic position of many manifestations of carbonate rocks remains uncertain. Such objects can be considered calciphyres, marbles, skarns and apatite-containing rocks of the Middle Pobuzhzhia (carbonate associations of the Zavalovskoye graphite deposit, magnetite calcifers of the Moldovan iron ore deposit, carbonate veins with chromite of the Kapitanovskoye deposit, Troyaniv apatite manifestation) phlogopite calciphyres of the Upper Pobuzhzhia (Lukashiv manifestation), as well as numerous metamorphic carbonate manifestations of the Priazovsky and Ingulets megablocks (Marble section of the Mangusky iron ore deposit). deposits, carbonate strata of the Kuksunguri iron ore deposit, calciphyra of the Starokrymska area on the periphery of alkaline massifs, Kazanovsky manifestation, etc.)

The purpose of this article is to analyze the existing contradictory models of the genesis of carbonate-containing associations on the territory of Ukraine (mainly on the Ukrainian Shield) and to propose the most objective criteria for diagnosing true carbonatites. This will make it possible to conduct a more reasoned and effective search for these extremely important rocks from the point of view of the presence of strategic minerals in them.

Presentation of the main material. In the first place among the reliably diagnosed carbonatites, in terms of size and variety of mineralization, is the Chernihiv alkaline-ultrabasic-carbonatite massif, the carbonate associations of which are typical representatives of this group of rocks. In addition, the Khlebodarovsky manifestation, veins and dikes meet

certain criteria Oktyabrsky massif, Petrovo-Gnutivska dike, part of the carbonate rocks of the Malotersyansky massif.

Conclusions. Promising areas of the Ukrainian shield for the search for carbonatites can be considered Pryazov-sky, (continuation of the Khibodariivska dike, Yuzhno-Kalchytskyi massif), Malotersyansky massif, and some manifestations of the Volyn megablock of the Shch (Berezova Gat structure). The Anadol'skoye and Azov deposits of rare earths, where carbonate rocks have not yet been discovered, but there are geochemical and petrological prerequisites for the development of carbonatites (the existence of powerful zones of metasomatic processes of an alkaline nature, in particular phenitization, the presence of high concentrations of rare elements and accessory rare earth carbonates, etc.)

Keywords: carbonate rocks, carbonatites, isotopic composition, geochemical features, rare elements, Ukrainian Shield.

References

1. Voevodin V.N. (2006). On the classification of endogenous carbonate rocks. *Otechestvennaya Geologiya*, 6: 72-76.
2. Glevassky E.B., Kryvdik S.G. (1981). Precambrian carbonatite complex of the Azov region. Kiev, Naukova Dumka, 227.
3. Guliy V.N., Zahnitko V.N., Parfenova A.Ya. (1999). Comparative characteristics of carbonate-apatite associations of the Ukrainian and Aldan shields. *Minerals – formation, forecast, resources*, St.-Pt., June 5-8, 155.
4. Dubyna O.V., Kryvdik S.G., Vyshnevskiy O.A. (2024). Mineralogy and Petrology of Carbonatites and Phenites of the Khibodarovsky Manifestation. *Mineralogical journal*, 46 (1): 45-66. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.46.01.045>
5. Entin V.A., Gintov O.B., Mychak S.V., Yushin A.A. (2015). Structure of the Moldovan iron ore deposit (Ukrainian shield) according to geological and geophysical data and its possible endogenous nature. 37, 4, 3-18.
6. Ershov V.A. (1960). Ultrabasic rocks of Ukraine and associated minerals. Petrographic provinces, igneous and metamorphic rocks. M., Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 183-193.
7. Zhukov G.V., Varkhatov V.A., Sakhatsky I.I. (1973). On the discovery of phosphate mineralization in the Western Azov region. *Geological journal*, 33, 5: 144-146.
8. Zahnitko V.N., Lugovaya I.P. (1989). Isotope geochemistry of carbonate and ferruginous-siliceous rocks of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova Dumka, 316.
9. Zahnitko V.M., Gogolev K.I. (2024). Non-standard models of transformation of iron ore formations in endo- and exogenous conditions. Materials of the conference "Iron ore deposits of Ukraine: modern problems and prospects for development". Kyiv, 41-45.
10. Carbonatites. *Earth Sciences* (1969). Ed. O. Tuttle, J. Gittins. M.: Mir., 486.
11. Kovalev E.M., Strekozov S.N., Zahnitko V.N., Lugovaya I.P. (1988). Carbonate Rocks of the Oktyabrskogo Alkaline Massif (Ukrainian Shield). *Academy of Sciences of the USSR, ser. Geology*, 7, 128-133.
12. Kolomiets G.D. (1987). New data on the protoplatform carbonatite magmatism of the Ukrainian shield. Theses of the reports of the IV regional petrographic conference on the European part of the USSR. Petrozav., 44.
13. Krivdik S.G., Tkachuk V.I. (1987). Formational belonging of alkaline metasomatites of Berezovoy Gati. B, 1, 13-16.
14. Kryvdik S.G., Tkachuk V.I. (1990). Petrology of alkaline rocks of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova Dumka, 407.
15. Kryvdik S.G., Dubyna O.V., Dovbush T.I. et al. (2011). Sr^{87}/Sr^{86} in apatites from alkaline and basic rocks of the Ukrainian Shield. *Mineralogical Journal*, 33, 3, 55-70.
16. Lazurenko V.I., Ryabenko V.A., Khorunzhiy V.Y. (1977). Some varieties of fossil algae from Precambrian carbonatite rocks. *Geological journal*, 37, 2, 121-125.
17. Marchenko E.L., Konkov G.G., Vasenko V.I. (1980). On the carbonatite nature of the Petrovo-Gnutovskaya fluorite-carbonate dike of the Azov region. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, ser. B*, 1, 24-27.
18. Popovchenko S.E., Kornienko P.K. (2014). Qualification signs of carbonate-ultrabasic massifs of the Ukrainian shield. *Bulletin of the Dnepropetrovsk University. Series "Geology. Geography"*, 15, 2-17.
19. Samoilov V.S., Kovalenko V.I. (1983). Complexes of alkaline rocks and carbonatites of Mongolia. *The Works of the Soviets. Scientific research*, 35. M. Nauka, 152-159.
20. Usenko O.V. (2022). Evolution of the composition of mantle fluids in the Precambrian (on the example of ferruginous formations of the Ukrainian shield). *Geophysical Journal*, 2, 44, 3-28 <https://doi.org/10.24028/gj.v44i2.256263>
21. Tsarovskiy I.D., Bratslavsky P.F. Nepheline breeds of the upper Pobuzhya. *Doc. Academy of Sciences of the USSR*, 1980, T 255, No. 2, pp. 424-427.
22. Tsarovskiy I.D., Bratslavsky P.F. (1980). Nepheline breeds of the Dniester-Bug district. Kyiv: Naukova Dumka, 46 (preprint of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Geochemistry and Physics of Minerals).
23. Sheremet E.M., Kryvdik S.G., Strekozov S.M., Dubyna O.V., Setaya L.D. (2016). On the Genesis of the Anadol Rare Earth Deposit (Ukraine). *Mineralogical Journal*, 38 (4): 75-85 <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.04.075>
24. Shramenko I.F., Stadnik V.A., Osadchiy V.K. (1992). Geochemistry of Carbonatites of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova Dumka, 212.
25. Carbonatites. *Genesis and Evolution* (1990). Edited by Keith Bell. London. Unwin Hyman, 630.
26. Le Bas, M.J., Kellere, J., Kejie, T. et al. (1992). Carbonatite dykes at bayan Obo, inner Mongolia, China. *Mineralogy and Petrology*, 46, 195-228. <https://doi.org/10.1007/BF01164647>

Groundwater pollution risks assessment in Ukraine-Poland transboundary aquifers

Halyna Medvid¹

PhD (Geology), Head of the Laboratory of Geoecology Problems,

¹ Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine,

e-mail: halmedvid@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-5059-245X>;

Liubov Yanush²

MSc (Geology), Leading Engineer,

² Subsidiary Enterprise of PJSC NJSC "Nadra Ukrainy" Zahidukrgeologiya, Lviv, Ukraine,

e-mail: liubovyanush@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-4225-8646>;

Tatiana Solovey³

DSc (Geography), Associate Professor,

³ Polish Geological Institute – National Research Institute,

Department of Groundwater Recognition and Protection, Warszawa, Poland,

e-mail: tatiana.solovey@pgi.gov.pl,  <https://orcid.org/0000-0001-8949-4075>;

Vasyl Harasymchuk¹

PhD (Geology), Senior Researcher, Laboratory of Geoecologic Problems,

e-mail: v_harasymchuk@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-4377-2655>

ABSTRACT

Problem statement. For states that share a common border it is important to have reliable and up-to-date information on the condition of groundwater used for water supply. Transboundary aquifers (TBA) are rather a complicated object for controlling, monitoring research and management due to inherent transboundary flows. Within the framework of the international project EU-WATERRES, the development of a concept for coordinated management and harmonized monitoring of the TBA at the border areas of Ukraine and Poland has been launched. Among many aspects of the project's research scope, it was important to study the risks of groundwater pollution. The study of potential scenarios of anthropogenic impact within the aquifers will make it possible to predict changes in the quantitative and qualitative parameters of transboundary groundwater, which, in turn, will allow qualitative planning of economic activities with minimal risks.

The purpose of the study is to qualitatively assess the risks of pollution of transboundary groundwater used for drinking water supply taking into account their vulnerability and the overall anthropogenic pressure.

The research methodology is to analysis the cumulative impact of hazards and the degree of vulnerability of transboundary aquifers using the index-rating method as well as to map pollution risks using the overlay method.

Research results. The substantial volume of groundwater in the transboundary catchments between Ukraine and Poland (85.3%) is classified as vulnerable and very vulnerable. Within the Polish territory, their share is 99.9%, and within the Ukrainian territory it amounts to 79.5%. In contrast, the study area is marked by a low degree (4.74%) of groundwater pollution hazards. High and very high hazards in Ukraine account for 6.5% of the study area, and in Poland to 0.55%. The calculations and risk mapping showed that low vulnerability minimizes the impact of pollution hazards, and in the absence of anthropogenic pressure the risk may be modest. This is especially important for assessing the quality of groundwater in the main useful aquifers (MUA), which is a valuable water supply resource for both countries. The Roztochchia area is a vivid example of a territory where high anthropogenic pollution hazards are offset by the low vulnerability of the Lower Neogene aquifer, resulting in a significant reduction in risks.

Scientific novelty of the research. For the first time, an assessment of groundwater pollution risks for the Polish-Ukrainian transboundary area was carried out. The results of the research can be used in the management and protection of transboundary groundwater between Ukraine and Poland.

Keywords: transboundary aquifers, anthropogenic impact, groundwater vulnerability, hazards and risks of pollution.

In cites: Medvid Halyna, Yanush Liubov, Solovey Tatiana, Harasymchuk Vasyl (2024). Groundwater pollution risks assessment in Ukraine-Poland transboundary aquifers. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 64-75. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-05>

Introduction. There are 1,386 million km³ of water on the planet Earth, but only 2.5% of it is fresh water that can be used by the humankind. In addition, more than half of the fresh water volume is in the form of glaciers and snow caps. That is, humans can use only about 1% of the planet's total water resources (surface and underground), which is actually very little. Therefore, groundwater is an important water supply resource along with surface

water. However, they are a difficult object to control, monitor and manage. Their peculiarity is transboundary flows invisible to people. So, it is important for neighboring countries to have reliable and up-to-date information on the condition of groundwater, which is shared by both countries and migrates in both directions. The issue of studying and continuously monitoring the condition of water resources in transboundary water basins requires

arranging international cooperation in this sphere. Assessment of transboundary anthropogenic pressure on groundwater has been an object of interest to the European Union (EU) for decades. The EU legislation aimed at creating a framework for the protection and sustainable management of water resources includes the Water Framework Directive (WFD). It sets out objectives and measures to achieve good water status in EU Member States (EU, 2000). To support its implementation, EU Member States have developed a common strategy that focuses on methodological issues related to common understanding of technical and scientific implications of the WFD. These recommendations are aimed at promoting a harmonized approach among the community states to the assessment and management of transboundary water resources. To date, countries bordering the EU and heading towards the full membership in the European Union are actively involved in the implementation of the said strategy.

Problem statement. The task of developing the concept of coordinated management and harmonized monitoring of transboundary aquifers was faced by a team of researchers from five countries participating in the international project “EU-WATERRES: European Integrated Management System for Transboundary Groundwater Resources and Anthropogenic Hazards”, funded by Iceland, Liechtenstein and Norway through the European Economic Area Grant Fund and the Norwegian Regional Cooperation Grant Fund.

Among many aspects of the project's research, the study of groundwater contamination risks was important. Risks are defined as the likelihood of undesirable events that could lead to negative consequences. The study of potential scenarios of anthropogenic impact within the aquifers will make it possible to predict changes in the quantitative and qualitative parameters of transboundary groundwater, which, in turn, will allow for qualitative planning of economic activities with minimal risks.

Review of previous studies. Over the past decades, various models and approaches have been developed and tested to assess the quality of groundwater, its internal and specific vulnerabilities, anthropogenic pressure, and pollution risks.

Groundwater vulnerability is most often assessed using the DRASTIC, GOD, and SI methods. The advantages and disadvantages of the most popular index-based methods are analyzed and presented by the authors (Fannakh & Farsang, 2022). The globally recognized method of qualitative assessment of groundwater vulnerability to pollution is DRASTIC (Aller et al., 1987), although some shortcomings have also been identified in its application. These relate mainly to the use of qualitative

parameters, overestimation of the vulnerability of porous media compared to fractured media, and the specific vulnerability of groundwater in certain types of aquifers.

Researchers often adapt the DRASTIC method to their data or objectives by considering additional indices of the internal vulnerability assessment framework, such as land use type (L) (Zhang et al., 2022; Kozłowski & Sojka, 2019), nitrate pollution (Ravindranath & Thirukumaran, 2021), nitrate nitrogen (Shrestha et al., 2016), or petroleum products (Fang et al., 2022). Sometimes they replace several indices with others or remove certain indices due to insufficient sensitivity or inaccurate data (Zhang et al., 2022; Kazakis & Voudouris, 2015).

Some researchers combine two different index-based methods to compare results (Abdullah et al., 2016; Campoverde-Muñoz et al., 2023). The DRASTIC method can be used both for regional studies and for processing a large dataset, as the authors did to assess groundwater vulnerability and risk at the pan-African scale (Ouedraogo et al., 2016).

The SINTACS method, which is an evolution of the DRASTIC method, is also widely used to determine groundwater vulnerability. According to authors (Canora, et al., 2022), it better suits Mediterranean hydrogeological environments. The anthropogenic impact can be taken into account using the SINTACS-LU method, in which the land use parameter (LU) is added (Noori, et al., 2019).

To assess the vulnerability of karst aquifers, the PI method is applied. This is a GIS approach to mapping groundwater vulnerability with a special focus on karst aquifers. Vulnerability is classified based on the product of two factors: The I-factor takes into account infiltration regimes (lithology, fractures, soil classes, aeration zone capacity, aquifer recharge), and the P-factor indicates the effectiveness of protective cover (Zwahlen, 2003; Goldscheider et al., 2000; Aliewi & Al-Khatib, 2015).

To calculate the pollution hazard index, the POSH (Origin Surcharge Hydraulically Pollutant) method is usually engaged, which is based on two easily assessed characteristics: the origin of pollutants (agricultural land, urban agglomerations and rural areas without centralized sewage, landfills and wastewater discharge sites) and their hydraulic impact on the environment (diffuse or point) (Foster et al., 2002; Campoverde-Muñoz et al., 2023).

Risk assessment, compared to vulnerability and contamination hazard assessments, is much more accurate because it takes into account both of these factors. The concept involves combining a groundwater vulnerability map with a pollution hazard map. In other words, the risk of contamination will depend on both potential contaminants and ground-

water vulnerability (Daly et al., 2002; Campoverde-Muñoz et al., 2023; Shrestha et al., 2016). Attempts are being made to conduct multidimensional, spatio-temporal, and long-term serial assessments of groundwater pollution risks. For example, Haoli Xu with colleagues have proposed a new comprehensive method that combines the advantages of cloud computing for remote sensing, long-term groundwater modeling using Modflow + MT3DMS, and GIS technology to effectively address the problem (Xu et al., 2023). There are also proposals to consider not only the vulnerability of groundwater and the pollution hazards, but also to take into account the value of the groundwater function, which is determined by its quality and reserves (Fang et al., 2022). The high importance of the groundwater function, according to the authors, is that the territory shows significant reserves and high quality of groundwater, so it has a greater sensitivity and susceptibility of groundwater to pollution.

However, qualitative assessment of the pollution risk is widely used. Polish researchers Robert Duda with colleagues also proposed their own qualitative classifications of the potential impact of the main forms of land use on groundwater quality and the risk of groundwater pollution (Duda et al., 2020). So, in order to obtain a more accurate assessment of groundwater pollution risk that would better match the specifics of land use, the authors recommend developing a quantitative method. It should combine a quantitative assessment of the potential impact of land use with a quantitative as-

essment of the internal vulnerability of groundwater to pollution. In particular, it is proposed to assess the internal vulnerability of groundwater per the time of infiltration of conservative pollutants through the vadose zone. The quantitative assessment of internal vulnerability, first performed by us for the Polish-Ukrainian transboundary area, was also based on the calculation of the time of contamination penetration through the aeration zone.

The purpose of the study is to qualitatively assess the risks of pollution of transboundary groundwater used for drinking water supply, taking into account their vulnerability and the overall anthropogenic pressure.

The methodology of the study is to analyze the cumulative impact of hazards and the degree of vulnerability of transboundary aquifers using the index-rating method, as well as to map pollution risks using the overlay method.

The research area hydrographically belongs to the transboundary groundwater reservoirs (TGR) of the Buh, San and Dniester (Fig. 1). It is located on both sides of the Polish-Ukrainian border along its entire length from the Carpathians in the south to Polissia in the north. The 537 km long border between Poland and Ukraine passes through the Eastern Beskydy, Northern Subcarpathia, Lublin-Lviv Upland, Volyn-Podillia Upland, and Volyn Polissia. The total area of the study area is 26,073 km², of which 15,575 km² falls within the Buh catchment, 4,569 km² within the San catchment, and 5,929 km² within the Dniester catchment (Solovey et al., 2021).

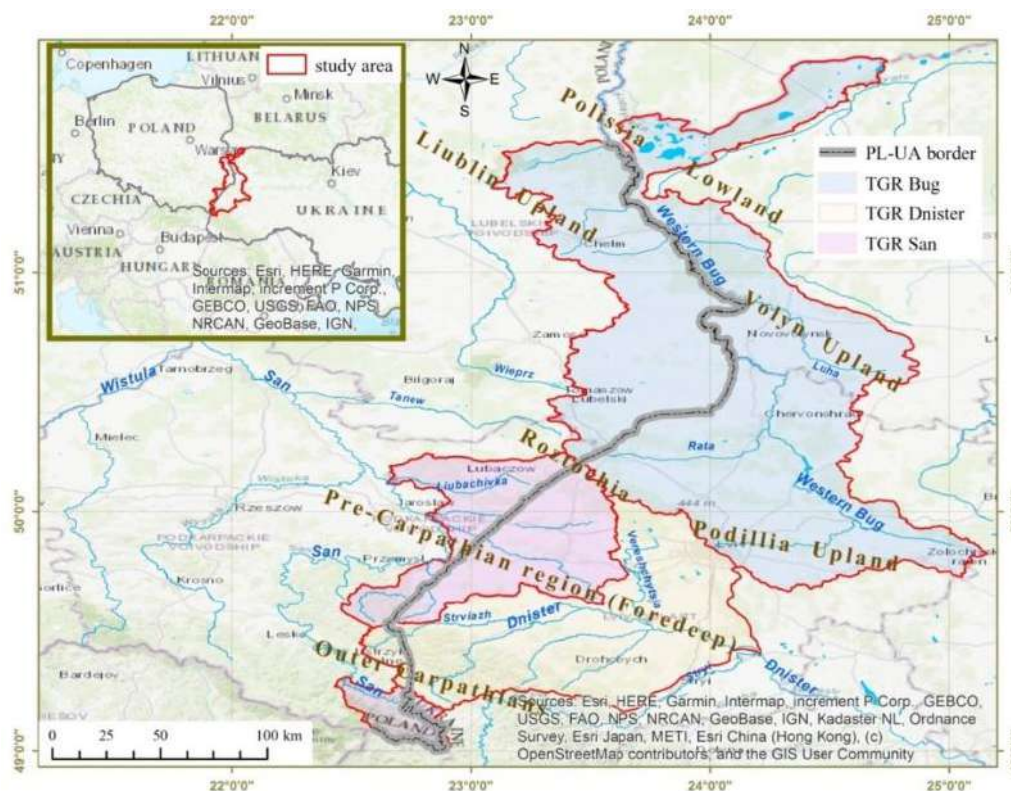


Fig. 1. Location of the research area

Results of the study. The risks of pollution of transboundary aquifers in the study area were assessed by analyzing the cumulative impact of the hazard and the degree of vulnerability of these aquifers. The risk mapping methodology involves an overlay method against the groundwater vulnerability map and the hazard map.

GIS technology was used for calculations and mapping. The territory was divided into calculation blocks with a constant sampling step of 1,000 m. As

a result, a discretization grid consisting of 27,024 calculation blocks was created (Fig. 2). Hydrogeological data from the funds of the Subsidiary Enterprise Zahidukrgeologiya and open data on potential sources of pollution were used for the research.

The groundwater pollution risk assessment was carried out stage-wise (Medvid et al., 2023; Solovey et al., 2023). The first stage of the study was a quantitative assessment of the internal vulnerability of groundwater in the Polish-Ukrainian transboundary

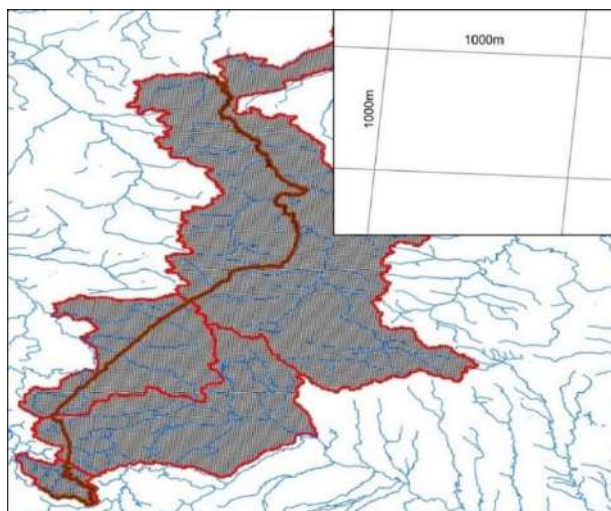


Fig. 2. Computational grid of the study area within the catchment area of the Buh, San and Dniester rivers

area. The degree of vulnerability of groundwater in the study area was assessed by calculating the time of water infiltration through the aeration zone using the Bindemann formula, modified by T. Matsoshchuk (Matsoshchuk, 1999) as follows:

$$t = \frac{m \times W_0}{\sqrt[3]{i^2 \times k_z}},$$

where t is the infiltration time of precipitation through the aeration zone, days; m – the thickness of the aeration zone, m; W_0 – the volumetric moisture of sediments in the aeration zone, i – the annual effective infiltration, $i = P \times k^*$, m/day (where P is the precipitation indicator, m/day; k^* – the coefficient of effective infiltration); k_z – the vertical infiltration coefficient of the aeration zone, m/day.

Vulnerability classification per the time of pollutants migration from the surface was carried out and reported in article (Medvid et al., 2023), which provides a detailed description of the calculation methodology and results. Initially, the vulnerability was calculated for the main aquifers identified within the EU-Waterres project.

The Poland-Ukraine transboundary aquifers include the unconfined aquifer of alluvial Quaternary sediments (alQ) and the unconfined-confined aquifer of Upper Cretaceous sediments (K2). In addition, in the Ukrainian part of the study area, there is a confined aquifer of Lower Neogene sediments (N1), and in the northern part of the Polish study

area there is an unconfined aquifer in undivided Upper Cretaceous-Quaternary sediments (K2-Q) (Fig. 3).

However, for the calculation of pollution risks, the territory qualified with the absence of MUAs was also taken into account (Fig. 3), as sporadic local groundwater used by the local population in households is widespread in this area. These include low-flow, unconfined horizons, mainly Quaternary ones, in the plain territory of the Precarpathian artesian basin and layer-fracture waters of the folded Carpathian system in Cretaceous and Paleogene flysch deposits. These groundwaters have been added to the category of unprotected, highly vulnerable groundwaters, as they occur close to the surface and are not covered by impermeable sediments. The issue of their protection and prevention from pollution is no less important.

The resulting vulnerability map of the first aquifers from the surface of the study area is shown in Figure 4.

The territorial statistical distribution of groundwater vulnerability classes is as follows. Within the better half of the study area (85.3% of the area) groundwater is classified as vulnerable and very vulnerable (Fig. 5a). Comparison of the distribution of vulnerability in the Polish and Ukrainian parts of the transboundary area shows that the categories of vulnerable and highly vulnerable ground-

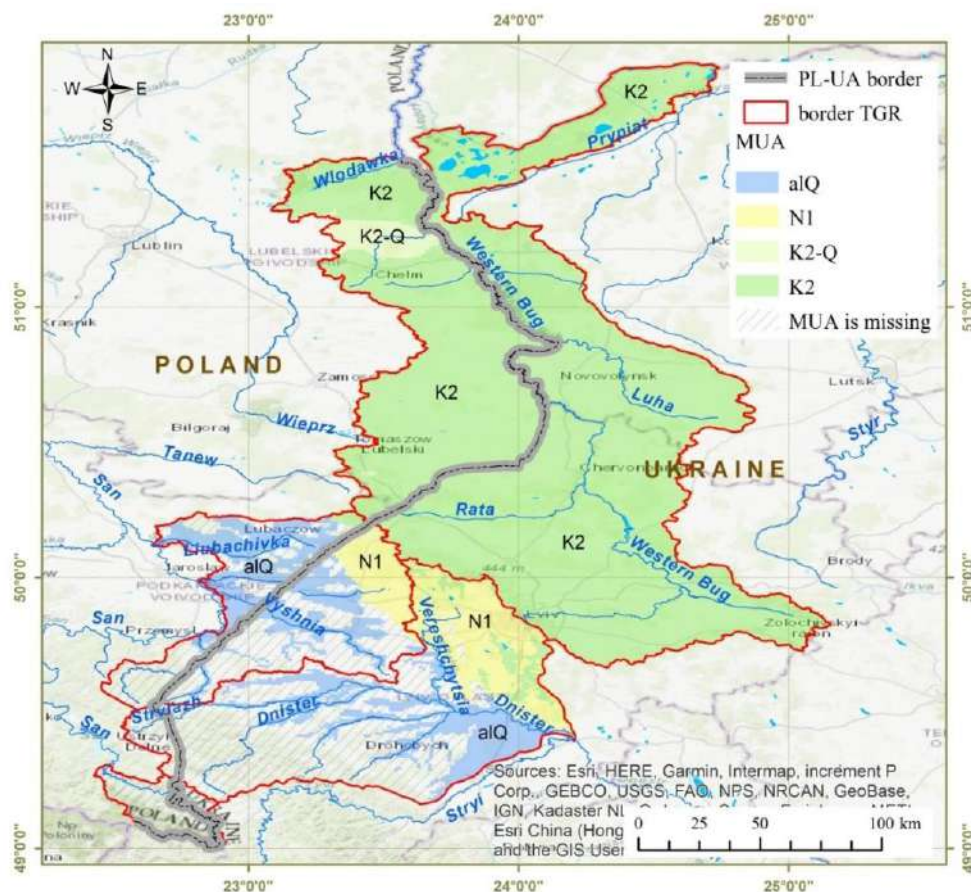


Fig. 3. Map of the main useful aquifers

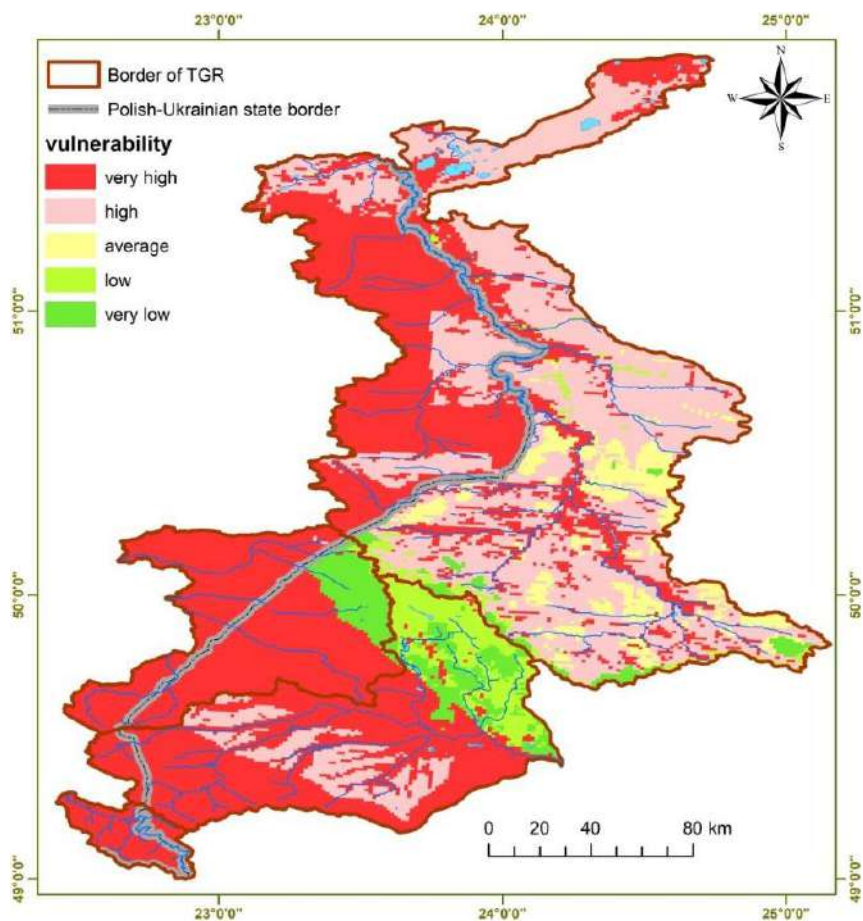


Fig. 4. Map of groundwater vulnerability

water are characteristic of almost the entire Polish territory (99.9%), while in Ukraine this percentage is 79.5 (Fig. 5b).

We present separately the results of the statistical distribution of groundwater vulnerability for MUAs. The unconfined alluvial Quaternary aquifer (alQ) and the undivided Upper Cretaceous-Quaternary aquifer (K2-Q) are the most vulnerable. (Figures 6a and 6b). The Upper Cretaceous aquifer (K2) is less vulnerable, and the Lower Neogene aquifer is

the most resistant to pollution (naturally protected) as compared to the others (Figures 6d and 6c).

To assess the risks within the Polish-Ukrainian transboundary territory, the vulnerability of groundwater was additionally indexed into 5 classes (Table 1).

The assessment and mapping of groundwater pollution hazards were performed by identifying potential diffuse and point sources of pollution and calculating their total pressure while assigning them ranks and weights, as described in (Solovey et al., 2023).

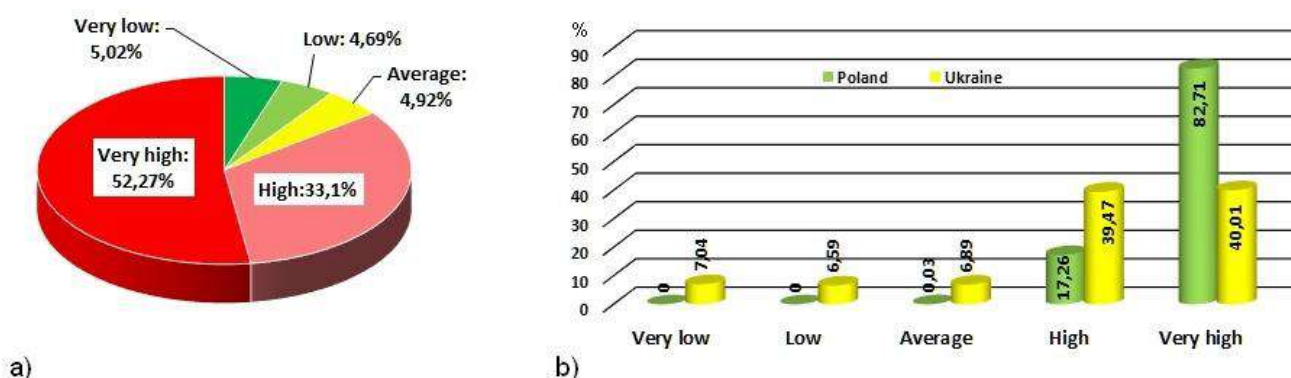


Fig. 5. Distribution of groundwater vulnerability by class: a) within the Polish-Ukrainian cross-border area; b) comparative for the Polish and Ukrainian parts of the cross-border area

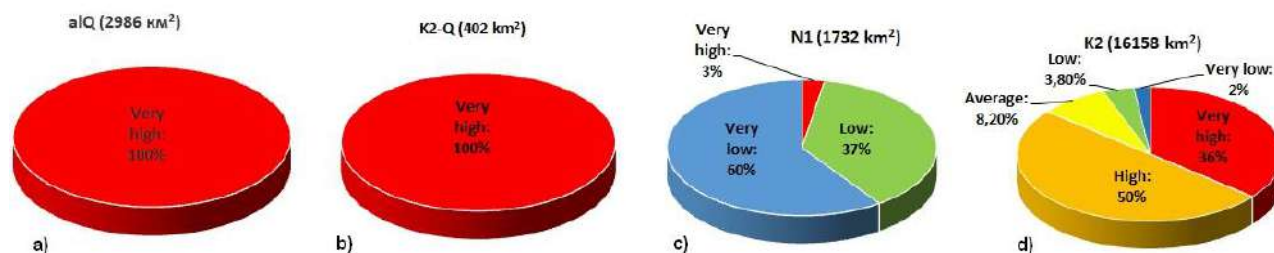


Fig. 6. Distribution of vulnerability classes for MUAs: a) alluvial Quaternary; b) Upper Cretaceous-Quaternary; c) Lower Neogene (Miocene); d) Upper Cretaceous

Table 1

Indexing of groundwater vulnerability classes

Vulnerability classes	Vulnerability Index
Very high	5
High	4
Average	3
Low	2
Very low	1

The score of total pressure of diffuse and point sources of pollution (GW hazard) within each computational cluster was calculated using the formula:

$$GW \text{ hazard} = \frac{(\sum HLi \times F) + (\sum W \times R)}{n},$$

where HLi are hazard indicators of diffuse pollutants for the land use categories presented in Tab.1; F is the proportion of a given land use category in the computational cluster area, W – the point impact index weight; R – the rank of point impact index; n

– the number of indicators included in the assessment in a given cluster (in our case, $n=5$ of which 3 are diffuse and 2 are point ones).

To classify the total degree of anthropogenic pressure we used the division of groundwater pollution hazards into 6 classes proposed by Stevanovich (Table 2) (Stevanović & Marinović, 2020).

As a result, a map of the spatial distribution of total anthropogenic pressure index values or a map of groundwater pollution hazards was created (Fig. 7).

Table 2

Classification of pollution hazards	
GW hazard classes	Hazard Index
No hazard	0 - 0.10
Very Low	0.11 - 0.20
Low	0.21 - 0.30
Moderate	0.31 - 0.50
High	0.51 - 0.70
Very High	0.71 - 1.00

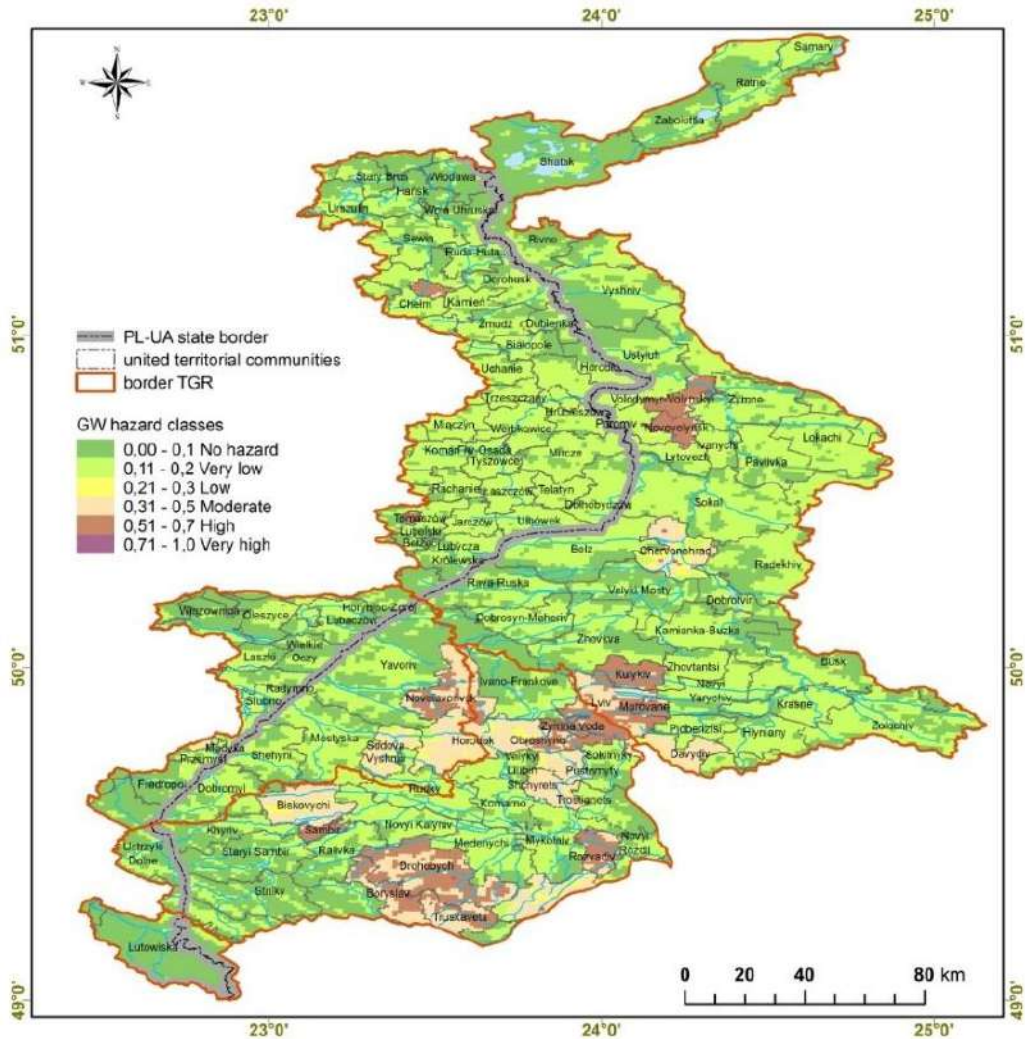


Fig. 7. Map of groundwater hazard – cumulative anthropopressure

The results of the distribution of pollution hazards classes are presented in the form of diagrams in Figures 8 and 9. In general, the study area is characterized by an insignificant degree of pollution hazards: high and very high levels of pollution hazards account for 4.74% of the transboundary area (Fig. 8a). However, the level of total anthropogenic pressure on groundwater in the Ukrainian part of the transboundary area significantly exceeds the pollution hazards on the Polish side. Areas with a high and very high degree of pollution hazards in Ukraine account for 6.5% of the study area, while in Poland – only 0.55% (Fig. 8b).

The distribution of high and very high degrees of pollution hazards within the MUAs areas is as follows: aquifer of Lower Neogene sediments (N1) - 15.07%; alluvial Quaternary sediments (alQ) - 7.2%, Upper Cretaceous (K2) - 2.95 %. MUAs in undivided Upper Cretaceous-Quaternary sediments are outside the zone of pollution hazards (Figs. 9a-9d). At the final stage, the actual assessment of the probability of harmful effects or risks of pollution was performed, which is the main purpose of the study. The assessment of the risks of pollution of transboundary aquifers in the study area was carried out by analyzing the cumulative impact of the pollu-

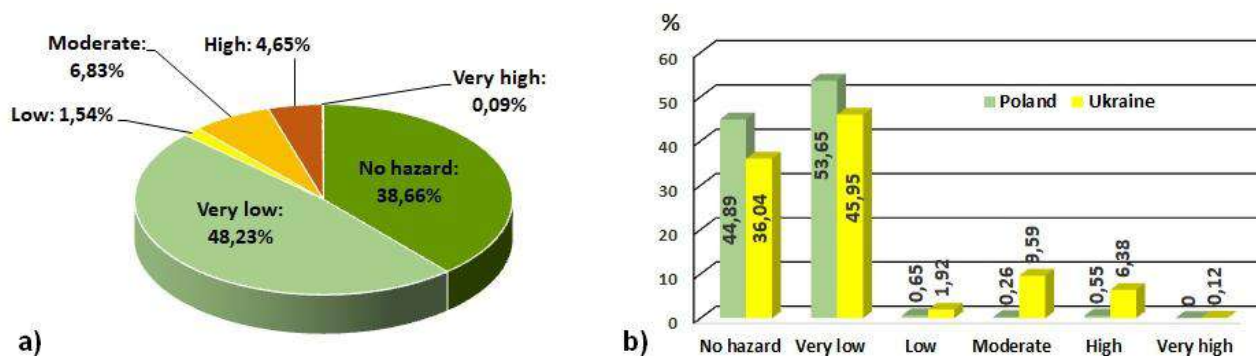


Fig. 8. Distribution of pollution hazards by class: a) within the Polish-Ukrainian transboundary area; b) comparative for the Polish and Ukrainian parts of the transboundary area

tion hazards and the degree of vulnerability of these aquifers. Low vulnerability of groundwater can minimize the impact of a high degree of hazard. Conversely, in the absence of anthropogenic activities in a catchment area with a high degree of vulnerability the risk may be modest. The risk mapping methodology involves an overlay method based on the groundwater vulnerability map and the hazard map.

The pollution risk index was calculated using the formula:

$$\text{GW Risk index} = \text{Hazard index} * \text{Vulnerability index}$$

To construct the map, the obtained values of groundwater risk indices were categorized into 6 classes (Table 3).

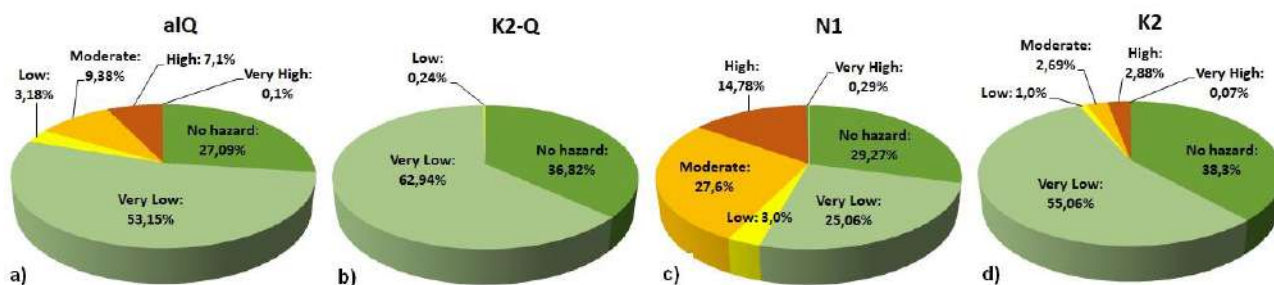


Fig. 9. Distribution of hazards classes for MUAs: a) Alluvial Quaternary; b) Upper Cretaceous-Quaternary; c) Lower Neogene (Miocene); d) Upper Cretaceous

Table 3

Classification of pollution risks	
GW risk classes	GW risk index
No risk	0.0 – 0.5
Very low	0.51 - 1.0
Low	1.1 - 1.5
Moderate	1.51 - 2.0
High	2.1 - 2.5
Very high	2.51 - 3.9

In general, the first two categories can be considered “no risk”, the next two as “potentially at risk”, and the last two as “at risk”.

The results of the risk assessment of groundwater pollution in the study area are presented in Fig. 10.

The proportion of groundwater pollution risk classes (Figs. 11, 12) shows that aquifers on 90.12% of the study area are in the zone of no pollution risk, on 6.17% - are at potential risk, and only on 3.71% of the area groundwater is at risk of pollution (Fig. 11a).

The probability of harmful consequences from undesirable events is much higher in the Ukrainian

part of the territory, i.e. here the risk of pollution extends to 5.01% of the territory, and 8.46% of the area is potentially at risk, while in the Polish part it is 0.61% and 0.76%, respectively. The qualification “no risk” for the Ukrainian territory corresponds to 86.53% of the area, while for the Polish territory - 98.63% (Figure 11b).

The highest risk of pollution among MUAs is inherent in the Alluvial-Quaternary one: 8.04% of the area is at risk and 11.73% is under potential risk (Fig. 12a). The figures for the Upper Cretaceous and Lower Neogene horizons are much lower: 2.35 and

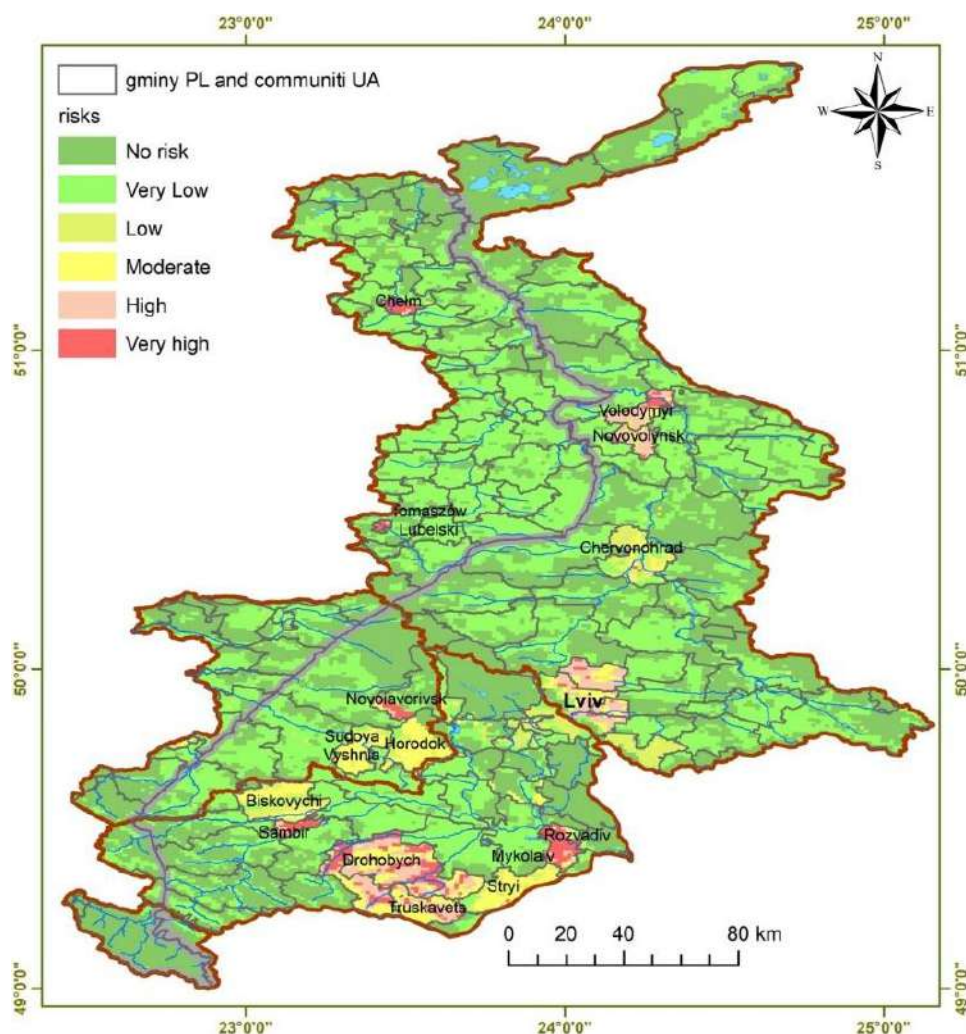


Fig. 10. Map of groundwater risks

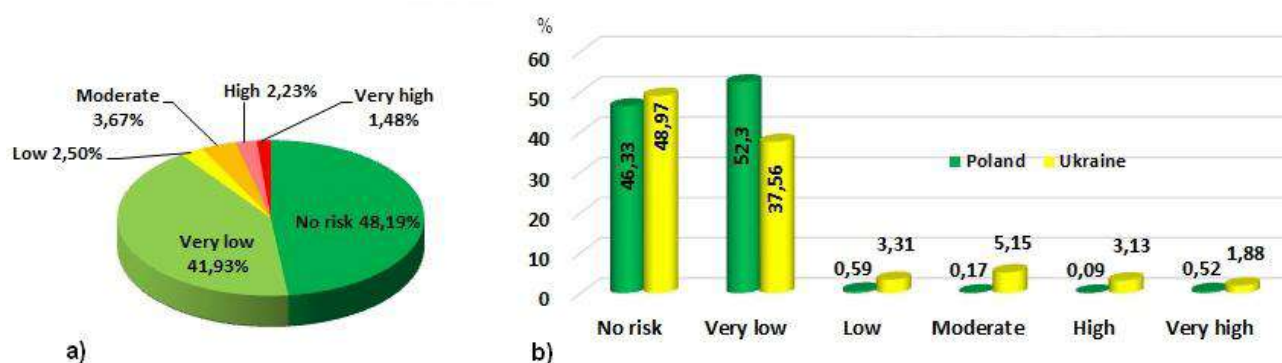


Fig. 11. Distribution of pollution risks by class: a) within the Polish-Ukrainian transboundary area; b) comparative for the Polish and Ukrainian parts of the transboundary area.

0.64 % of the area is at risk and 2.99 and 7.85 % is at potential risk, respectively (Figures 12d and 12c). Groundwater in the undivided Upper Cretaceous-Quaternary sediments is practically not at risk of pollution, despite its high vulnerability, due to the absence of hazards (Fig. 12b).

Conclusions. Great amount of groundwater in the transboundary catchments between Ukraine and Poland (85.3%) is classified as vulnerable and very vulnerable. Within the Polish territory, their propor-

tion is 99.9%, and within the Ukrainian territory - 79.5%. In contrast, the research area is marked by a low degree (4.74%) of groundwater pollution hazards. High and very high hazards in Ukraine account for 6.5% of the study area, and in Poland – 0.55%.

The calculations and risk mapping have shown that low vulnerability minimizes the impact of pollution hazards, and in the absence of anthropogenic pressure the risk may be modest. This is especially important for assessing the quality of groundwater

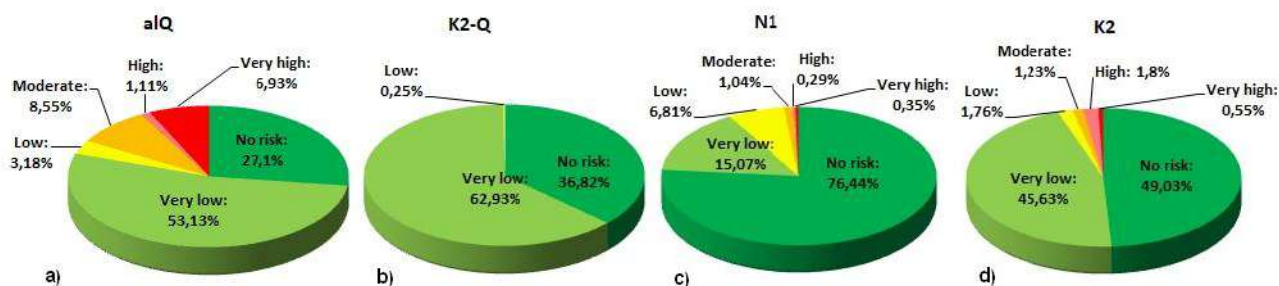


Fig. 12. Distribution of risk classes for MUAs: a) Alluvial Quaternary; b) Upper Cretaceous-Quaternary; c) Lower Neogene; d) Upper Cretaceous

in MUAs, which are valuable water supply resources for both countries. The Roztochchia is a prime example of an area where high anthropogenic pollution hazards are offset by the low vulnerability of the Lower Neogene aquifer, resulting in a significantly reduced risk. This tendency to mitigate the hazards of groundwater pollution by low aquifer vulnerability is inherent in a number of territorial communities in Volodymyr, Novovolynsk, Kulykiv, Lviv, Zymna Voda, Sokilnyky, Obroshyne, Novoyavorivsk, Rozvadiv, Sambir, Drohobych, Boryslav,

and Truskavets on the Ukrainian side and in the most urbanized communes in Poland – Chełm and Tomaszów Lubelski. On the other hand, large areas of highly vulnerable unconfined aquifers do not fall into the zone of significant risks due to the absence of significant anthropogenic pressure hazards.

The results of the research can be used to ensure the management and protection of transboundary groundwater over the in-between territory of Ukraine and Poland.

References

1. Abdullah, T., Ali, S., Al-Ansari, N. and Knutsson, S. (2016). Groundwater Vulnerability Using DRASTIC and COP Models: Case Study of Halabja Saidasdiq Basin, Iraq. *Engineering*, 8, 741–760. doi: <https://doi.org/10.4236/eng.2016.811067>
2. Aliewi, A. & Al-Khatib, I.A. (2015). Hazard and risk assessment of pollution on the groundwater resources and residents' health of Salfit District, Palestine, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4(B), 472–486. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.006>
3. Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R.H., and Hackett, G. (1987). DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Setting. USEPA Report 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, 252.
4. Campoverde-Muñoz, P., Aguilar-Salas, L., Romero-Crespo, P., Valverde-Armas, P.E., Villamar-Marazita, K., Jiménez-Oyola, S., Garcés-León, D. (2023). Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area-Ecuador. *Sustainability*, 15(1): 403. <https://doi.org/10.3390/su15010403>
5. Canora, F., Muzzillo, R., Sdao, F. (2022). Groundwater Vulnerability Assessment in the Metaponto Coastal Plain (Basilicata, Italy). *Water*, 14(12): 1851. <https://doi.org/10.3390/w14121851>
6. CORINE 2018 (CLC, 2018). <https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0>
7. Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S., Goldscheider, N., Neale, S., Popescu, I., Zwahlen, F. (2002). Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*, 10, 340–345. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0185-1>
8. Duda, R., Klebert, I., Zdechlik, R. (2020). Groundwater Pollution Risk Assessment Based on Vulnerability to Pollution and Potential Impact of Land Use Forms. *Pol. J. Environ. Stud.* 2020, 29(1): 87–99. <https://doi.org/10.15244/pjoes/104362>
9. EU, (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60>
10. Fang, Z., Liu, Z., Zhao, S., Ma, Y., Li, X., Gao, H. (2022). Assessment of Groundwater Contamination Risk in Oil-field Drilling Sites Based on Groundwater Vulnerability, Pollution Source Hazard, and Groundwater Value Function in Yitong County. *Water*, 14, 628. <https://doi.org/10.3390/w14040628>
11. Fannakh, A., Farsang, A. (2022). DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. *Environ Sci Eur* 34, 77. <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00646-8>
12. Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington, 104.
13. Goldscheider, N., Klute, M., Sturm, S., Hötzl, H. (2000). The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 46(3): 157–166.

14. Kazakis, N. & Voudouris, K.S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525: 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.035>
15. Kozłowski, M., Sojka, M. (2019). Applying a Modified DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: A Case Study in Central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(3): 1223–1231. <https://doi.org/10.15244/pjoes/84772>
16. Macioszczyk, T. (1999). Czas przesączania pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych. *Przegląd Geologiczny*, 47(8): 731–736.
17. Medvid, H., Yanush, L., Solovey, T., Panov, D., & Harasymchuk, V. (2023). Assessment of groundwater vulnerability within the cross-border areas of Ukraine and Poland. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology*, 58: 73–84. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-06>
18. Noori, R., Ghahremanzadeh, H., Kløve, B., Adamowski, J. F., & Baghvand, A. (2019). Modified-DRASTIC, modified-SINTACS and SI methods for groundwater vulnerability assessment in the southern Tehran aquifer. *Journal of Environmental Science and Health*, 54(1): 89–100. <https://doi.org/10.1080/10934529.2018.1537728>.
19. Ouedraogo, I., Defourny, P., Vanclooster, M. (2016). Mapping the groundwater vulnerability for pollution at the pan-African scale. *Science of The Total Environment*, 544: 939–953. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.135>
20. Ravindranath, I., & Thirukumaran, V. (2021). Spatial mapping for Groundwater Vulnerability to Pollution Risk Assessment Using DRASTIC Model in Ponnaiyar River Basin, South India. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2): 355–364. <https://doi.org/10.15421/112132>
21. Shrestha, S.L., Semkuyu, D.J., Pandey, V.P. (2016). Assessment of groundwater vulnerability and risk to pollution in Kathmandu Valley, Nepal. *Science of The Total Environment*, 556: 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.021>
22. Solovey, T., Janica, R., Medvid, H., Yanush, L., Kolos, H. (2023). Assessment of groundwater pollution hazards within the Polish-Ukrainian borderland. *XVII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 7–10 November 2023, Kyiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520028>
23. Solovey, T., Janica, R., Przygodzka, M., Harasymchuk, V., Medvid, H., Poberezhskyy, A., Janik, M., Stupka, O., Teleguz, O., Panov, D., Pavliuk, N., Yanush, L., Kharchyshin, Y., Borozdins, D., Bukovska, I., Demidko, J., Valters, K., Bikše, J., Delina, A., Polikarpus, M. (2021). Assessment of the resources of transboundary groundwater reservoirs for 2 pilot areas. 97 p. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.36265.52322/1>
24. Stevanović, Z. & Marinović, V. (2020). A methodology for assessing the pressures on transboundary groundwater quantity and quality – experiences from the Dinaric karst. *Geologia Croatica*, 73(2): 107–118. <https://doi.org/10.4154/gc.2020.08>
25. Xu, H., Yang, X., Wang, D., Hu, Y., Cheng, Z., Shi, Y., Zheng, P., Shi, L. (2023). Multivariate and spatio-temporal groundwater pollution risk assessment: A new long-time serial groundwater environmental impact assessment system. *Environmental Pollution*, 317: 120621. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120621>
26. Zhang, O., Li, P., Lyu, Q., Ren, X., He, S. (2022). Groundwater contamination risk assessment using a modified DRATICL model and pollution loading: A case study in the Guanzhong Basin of China. *Chemosphere*, 291(1): 132695. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132695>.
27. Zwahlen, F. (Ed.). (2003). *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 297.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Ризики забруднення підземних вод транскордонних водозбірних басейнів між Україною і Польщею

Галина Медвідь¹

к. геол. н., керівник Лабораторії проблем геоекології,

¹ Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна;

Любов Януш²

пров. інженер,

² ДП "Західукргеологія" ПрАТ НАК "Надра України", Львів, Україна;

Тетяна Соловей³

д. геогр. н., професор, ³ Польський геологічний інститут –
Національний науково-дослідний інститут, Варшава, Польща;

Василь Гарасимчук¹

к. геол. н., ст. наук. співроб. Лабораторії проблем геоекології

Для держав, що мають спільний кордон, важливо мати достовірну і актуальну інформацію про стан транскордонних підземних вод, що використовуються для водопостачання. В рамках міжнародного проекту "EU-WATERRES" було розпочато розробку концепції скоординованого управління та гармонізованого моніторингу транскордонних водоносних горизонтів (ТВГ) прикордонних територій України та Польщі. Серед багатьох аспектів досліджень проекту важливим було вивчення ризиків забруднення підземних вод. Авторами проведено оцінку ризиків забруднення транскордонних водоносних горизонтів між Україною і Польщею шляхом аналізу кумулятивного впливу загрози та ступеня вразливості цих горизонтів. Переважна більшість підземних вод транскордонних водозбірних басейнів між Україною і Польщею (85,3 %) класифікуються як вразливі і дуже вразливі. У межах польської території їх частка становить 99,9 %, в межах української – 79,5 %. На противагу цьому територія досліджень характеризується незначним ступенем (4,74 %) загроз забруднення підземних вод. Високий і дуже високий ступінь загроз в Україні становлять 6,5 % досліджуваної території, у Польщі – 0,55 %. Проведені розрахунки і побудова карти ризиків показали, що низька вразливість мінімізує вплив загроз забруднення, а за умов відсутності антропогенного навантаження, ризик може бути незначним. Це особливо важливо для оцінки якісного стану підземних вод основних корисних водоносних горизонтів (ОКВГ), які є важливим ресурсом водопостачання для обох країн. Зона Розточчя є яскравим прикладом території, де високі антропогенні загрози забруднення нівелюються низькою вразливістю водоносного горизонту нижньонеогенових відкладів, внаслідок чого ступінь ризику суттєво знижується. Така тенденція до нівелювання загроз забруднення підземних вод низькою вразливістю водоносного горизонту притаманна низці територіальних громад Володимира, Нововолинська, Куликова, Львова, Зимної Води, Сокільників, Оброшиного, Новояворівська, Розвадова, Самбора, Дрогобича, Борислава та Трускавця зі сторони України та в найбільш урбанізованих гмінах Польщі – Хелмі та Томашуві Любельському. З іншого боку, великі площі дуже вразливих безнапірних водоносних горизонтів не потрапляють до зони значних ризиків через відсутність значних загроз антропогенного тиску. Результати проведеної оцінки ризиків забруднення дадуть змогу передбачити зміни якісних параметрів транскордонних підземних вод, що може бути використано в ході забезпечення управління та захисту підземних вод на польсько-українському прикордонні.

Ключові слова: підземні води, транскордонні водоносні горизонти, антропогенний вплив, вразливість водоносного горизонту, загрози і ризики забруднення.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 2 серпня 2024 р.

Прийнята 10 жовтня 2024 р.

Impact of the Petrivsko-Kreminsky deep fault on the fluid migration in rocks of the Svyatohirsk brachyanticline

Anton Pyvovarov

MSc (Earth Science), V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: anton.pyvovarov.2002@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0005-5188-5472>

ABSTRACT

Introduction. Deep regional faults serve as primary pathways for fluid mass migration in the Dnipro-Donetsk aulacogen, particularly affecting fold faults and anticline structures. The interaction between heated fluid migration and structural development is evident in the Svyatohirsk brachyanticline structure and the Petrivsko-Kreminsky deep fault, where numerous geochemical and thermohydrodynamic inversions demonstrate their systematic influence on adjacent structures.

Problem definition. This study examines how the Petrivsko-Kreminsky deep fault and its secondary fractures impact hydrogeochemical and thermohydrodynamic processes in the Svyatohirsko-Kamyanska deposit area. The periodic tectonic activation of crustal-mantle centers intensifies heat and mass transfer in fluid flows, particularly in unloading zones along deep faults, where rapid and impulsive migration of heated fluid masses occurs, transporting rock particles and charged ions from underlying strata and the basement.

Purpose of the article. The research aims to analyze the impact of the Petrivsko-Kreminsky regional deep fault on the Svyatohirsk brachyanticline structure and its associated geological processes, focusing on the mechanisms of fluid migration and their influence on rock formations.

Analysis of recent research. Previous studies have documented significant thermohydrodynamic anomalies in Upper Cretaceous sediments, with temperatures ranging from 23°C to 27°C compared to background temperatures of 10°C to 12°C.

Tectonical configuration. The Svyatohirsk brachyanticline, formed during the Palatinate phase of Hercynian tectogenesis, contains numerous discontinuous faults attached to the Petrivsko-Kreminsky deep fault. Modern tectonic movements are reflected in varying uplift rates: 1.4-2.9 mm/year for the hanging wing and 5.2-11.1 mm/year for the lying wing, creating visible relief differences.

Deep fault impact on fluid migration. These fault structures facilitate vertical fluid and heat flow migration from deeper crustal and mantle layers. This results in localization of hydrogeochemical inversions, evidenced by groundwater enrichment with endogenous elements (helium, radon, argon, CO₂). The isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$: 5-8‰) indicates thermometamorphic origin and deep degassing processes from the mantle. The activity of deep faults has impacted the lithological composition, increasing reservoir rock density through pyritization, ferruginousness, secondary quartz, and carbonation processes.

Geological model and practical significance. Deep-seated fractures act as conduits for heated fluid migration, disrupting natural thermal gradients and causing thermohydrodynamic inversions. These processes contribute to secondary mineralization and cementation of fracture networks within reservoir rocks, significantly influencing the region's lithological characteristics. The model reveals that during both current and future tectonic activations, this process will continue intermittently, though with progressively less impact on the cement substance, while leading to accumulation of endogenous gas. The correlation between inversions and tectonic structures offers significant potential for identifying geological features and predicting hydrocarbon accumulations, particularly in areas where deep fault zones intersect with anticline structures.

Keywords: Svyatohirsk brachyanticline, Petrivsko-Kreminsky deep fault, fluid migration, heated fluid flows, thermos- and mass- migration.

In cites: Pyvovarov Anton (2024). Impact of the Petrivsko-Kreminsky deep fault on the fluid migration in rocks of the Svyatohirsk brachyanticline. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 76-84. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-06>

Introduction. Deep regional faults are the primary pathways for the migration of fluid masses. The Dnipro-Donetsk aulacogen is characterized by the co-sedimentary development of various geological structures, including anticlines, monoclines, and faulting, with notable disjunctive apophyses of deep faults. Throughout its entire history of formation and development, deep faults have exerted a continuous and systematic influence on adjacent structures. This impact is particularly pronounced in fold faults, especially anticline structures, which significantly contribute to the accumulation of transported fluid flows [1].

The interaction between the migration of heated fluid masses and the further development of structures, both lithologic-facies and geodynamic, is

clearly evident in the case of the Svyatohirsk brachyanticline structure and the Petrivsko-Kreminsky fault. This interaction is substantiated by the presence of numerous manifestations of geochemical and thermohydrodynamic inversions within the brachyanticline.

Thus, comprehending the continuous and systemic interaction between deep faults and anticline structures is a crucial element in modeling the lithologic and structural features of the region. A thorough correlation analysis is necessary for the accurate prediction of the fluid dynamic parameters of rocks and structures that are influenced by regional deep faults.

Problem definition. Previous studies have indicated that the location of the Svyatohirsk structure

on the anticline is a fundamental factor in the formation of the features and composition of Lower Permian and Carboniferous sediments [1]. However, the author argues that the periodic tectonic activation of crustal-mantle centers, associated with the Svyatohirsk brachyanticline structure and its adjacent areas, amplifies the ongoing processes of heat and mass transfer in fluid flows. These processes are particularly intensified in the unloading zones formed along deep faults, which facilitate the rapid and impulsive migration of heated fluid masses. These fluids transport rock particles from underlying strata and the basement, along with charged ions, in the form of heat. This mechanism is central to establishing a plausible model of the Svyatohirsk structure [5].

Purpose of the article. The purpose of this article is to examine the impact of the Petrivsko-Kreminsky regional deep fault on the Svyatohirsk brachyanticline.

Analysis of recent research. The presence of regional deep faults and their impact on other intra-aulacogenic structures has been substantiated in the scientific publications of V. Suyarko, O. Bartashchuk, and V. Gavrysh. V. Sukhov conducted direct practical research on the Svyatohirsk brachyanticline, during which he identified thermohydrodynamic anomalies in the Upper Cretaceous sediments (K_2) [5].

Tectonical configuration. The Svyatohirsk brachyanticline is an integral component of the

Dnipro-Donetsk paleorift, situated in its southeastern part, and represents a Paleozoic fold formed through consedimentary development. This structure was created during the Palatinate phase of Hercynian tectogenesis and subsequently underwent several stages of evolution during sedimentation in the Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic eras [9].

In relation to the Paleozoic sediments, the Svyatohirsk brachyanticline structure is conventionally located within the Pivnichno-Volvenkivsko-Torsko-Drobyshivske anticline, which contributed to the formation of the Kamyanska, Spivakivska, Torsko-Drobyshivska, Pivnichno-Volvenkivska, and Svyatohirsk anticlines. The anticline is bordered to the north by the Bilohirsko-Kamyanskyi trough and to the south by the Komyshuvachsko-Lymanska syncline.

Seismic surveys conducted by JSC Ukr-gasvydobuvannya have identified numerous discontinuous faults, likely to be disjunct apophyses of the Petrivsko-Kreminsky deep fault [5]. These findings are complemented by the author's research, which mapped the presence of discontinuous deep faults within the Kamyanska brachyantic fault, part of the Svyatohirsk region (Fig. 1).

Correlation of the lineaments and deep faults. It is well-established that riverbeds are often aligned along fracture zones in the Earth's crust, which are the result of deep faults originating from the mantle. In the study area, two major rivers – the Syverskyi Donetsk and the Oskil – are present, with

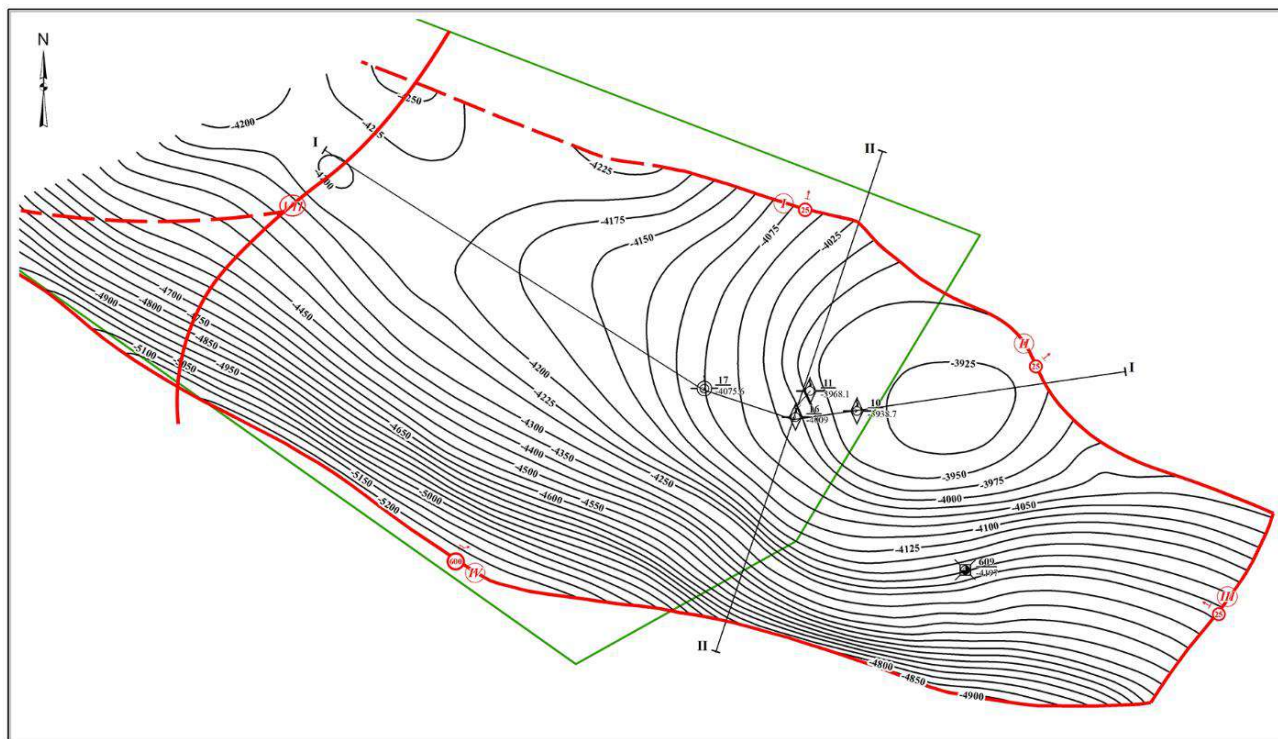


Fig. 1. Structural map of the Svyatohirsk Brachyanticline (based on UkrNDIGas materials (year 2019) with additions by the author (year 2021))

the former being a tributary of the latter. This suggests that the riverbeds coincide with a point where two multidirectional fault zones intersect, corresponding to the courses of these rivers (Fig. 2) [3].

According to the classification of deep faults in the Dnipro-Donetsk aulacogen, the Petrivsko-Kreminsky fault is categorized as a deep fault (as per V. Suyarko [7]) and plays a crucial role in controlling upward fluid flows and geodynamic stresses, including those affecting the Svyatohirsk brachyanticline. The existence of this fault is corroborated by the spatial orientation of cracks, which are perpendicular to the directions of geodynamic stresses that have occurred during various stages of tectonic activation of the structure.

Modern tectonic movements are reflected in the varying rates of uplift of the wings of the brachyanticline: the hanging wing rises at a rate of 1.4–2.9 mm/year, while the lying wing rises at a rate of 5.2–11.1 mm/year, a difference that is clearly visible in the relief of the region [5]. Earlier studies suggested that the location of the Svyatohirsk structure on the anticline was the main factor influencing the formation of the features and composition of Lower Permian and coal deposits. However, the authors propose that the periodic tectonic activation of crustal-mantle centers near the Svyatohirsk brachyanticline promotes the heat and mass transfer of fluid flows in the unloading zones created by deep faults. These faults facilitate the impulsive migration of heated fluid masses, which transport rock particles

from underlying strata and the basement, as well as energetically charged ions in the form of heat [4, 5].

Geochemical and thermohydrogeodynamic inversions are the result of deep fault activity, which saturates aquifers with endogenous fluids and heat flows. Water from shallow wells within the Svyatohirsk brachyanticline demonstrates hydrogeodynamic inversion, characterized by increased concentrations of chlorides and trace elements of deep origin (such as mercury, helium, argon, iodine, bromine, etc.), as well as significant pressure in the hydrogeothermal field.

The activity of deep faults has also impacted the lithological composition of the region, increasing the density of reservoir rocks, particularly sandstones. This is evidenced by the composition of their cement mass, which includes pyritization, ferruginousness, secondary quartz, and carbonation.

The deep fault impact for a fluid migration. The influence of the Petrivsko-Kreminsky fault and its numerous disjuncts results in a hydraulic connection between all aquifer complexes, facilitated by the vertical discharge of fluids along the faults. Tectonogenic fractures act as conduits for the migration of fluid masses, which are accelerated by the mantle heat flow, thereby activating convection processes within the aquifers. This process is accompanied by dehydration and secondary mineralization of cement, leading to the observed hydrogeochemical inversion in the Svyatohirsk area [8].

Research conducted by V. Suyarko and V. Sukh-

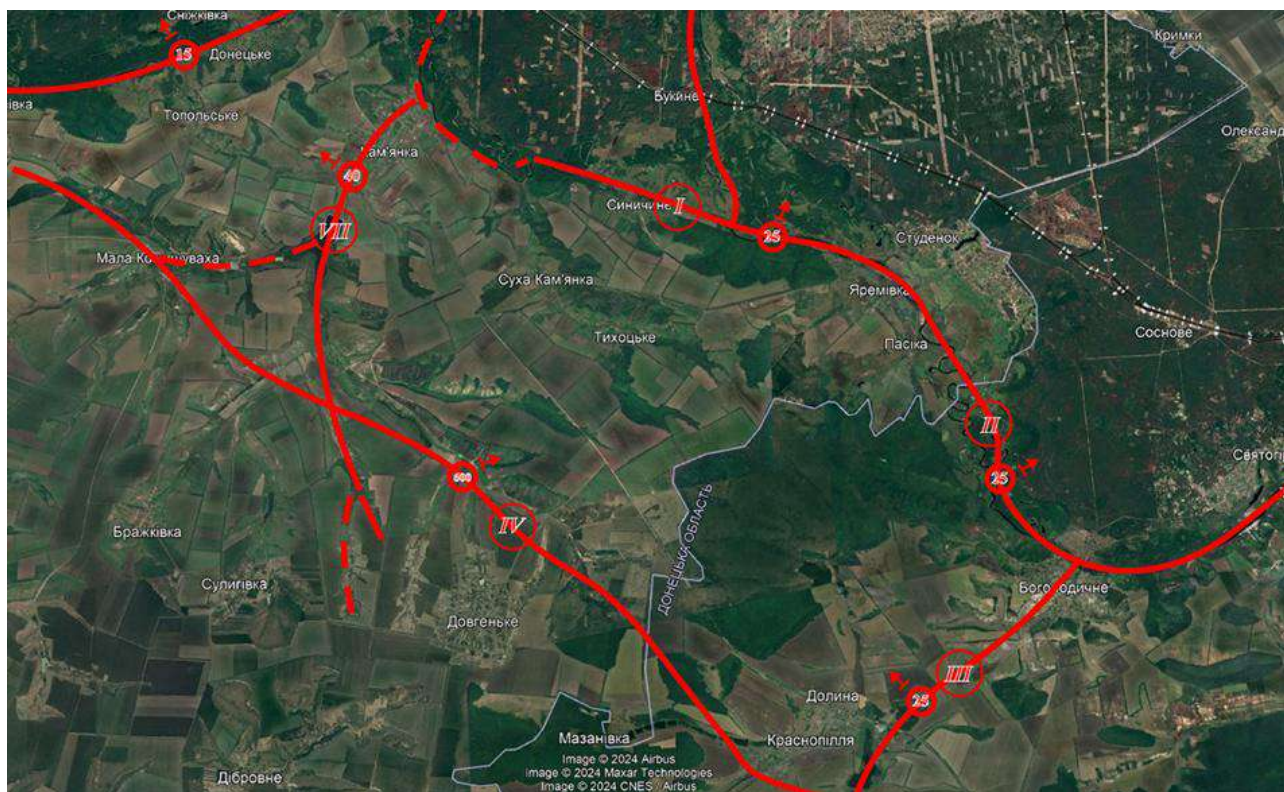


Fig. 2. Schematic diagram of the location of tectonic fault zones and their correlation with linearities on satellite images (made by Anton Pyvovarov, 2024)

khov identified thermohydrodynamic anomalies in Cretaceous and Jurassic rocks, with temperatures ranging from 23–27°C compared to a background temperature of 10–12°C. These findings confirm the high activity of the hydrogeothermal field [5]. Such anomalies accelerate catagenetic and metagenetic changes in rocks and promote the secondary cementation of fractures formed during the tectonic activation of the Laramide phase.

Geological model. Metamorphogenic fluids migrating along unloading zones create hypogenic anomalies in the overlying aquifer complexes, as evidenced by the presence of helium, radon, argon, and CO₂ in groundwater [5]. A distinctive feature of hydrogeothermal processes is the saturation of fractures with carbonate-clay cement, which results from the reaction between underlying carbonate rocks and mantle-derived CO₂.

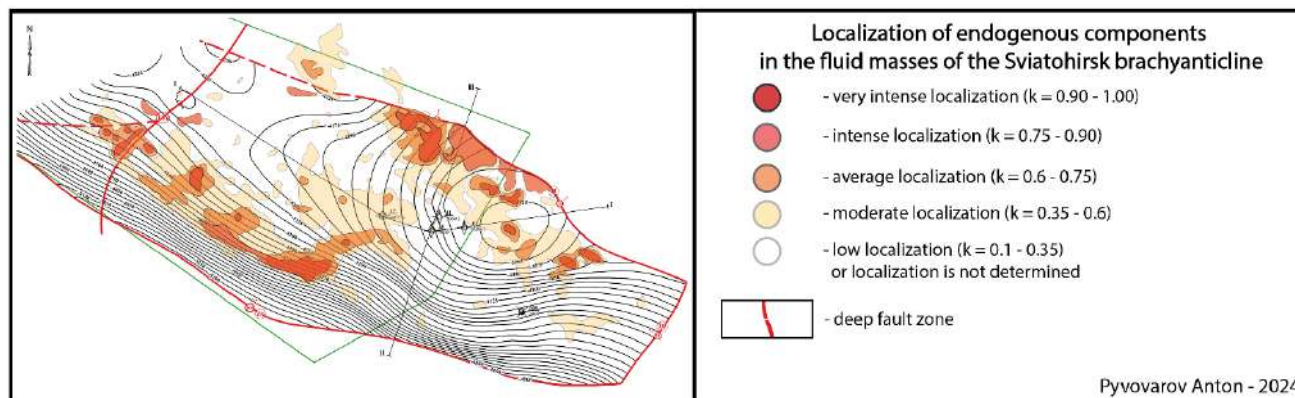


Fig. 3. Schematic map of the localization of endogenous components in the ascending fluid flows of the Svyatohirsk brachyanticline (by Anton Pyvovarov, 2024)

The concentration of CO₂ increases with depth, indicating its endogenous origin, which is characteristic of fluids of thermal genesis, such as metamorphic, hydrothermal, volcanic, and catagenetic fluids. Its isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$: 5–8‰) is consistent with methane carbon (CH₄), confirming mantle degassing and thermometamorphic genesis [4, 9].

The dissolution of endogenous components and their localization in depressional zones signals interval-impulsive tectonic activation and provides evidence for the deep origin of certain hydrocarbons within the Svyatohirsk brachyanticline (Fig. 3). The presence of reservoir rocks and dense fluid reservoirs has facilitated the accumulation of migrated fluids.

Considering the numerical predominance of disjunctive structures and the significant influence of the Petrivsko-Kreminsky fault, the hydraulic interconnectivity of all aquifer complexes has been established. This connectivity arises from vertical unloading along fault zones, facilitating the migration of fluid masses through fractures of tectonic origin. These migrations are intensified by mantle-derived heat flows, which trigger conventional geochemical processes upon entering overlying aquifers. Such processes are characterized by dehydration and the secondary redistribution of minerals into the cement matrix. Consequently, hydrogeochemical inversion of groundwater is observed in the regions of the Svyatohirsk and Kamyanska brachyanticlines [15].

The hydrogeochemical inversion induced by the migration of mantle-derived heated fluids faci-

tated secondary alterations in the lithological composition of the Carboniferous reservoir cement matrix. This is particularly evidenced by the presence of carbonate cement with a high concentration of carbon dioxide (CO₂) enriched in heavy carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$). This geochemical inversion also triggered substantial secondary cementation of tectonic fractures formed during the Palatinate tectogenesis. Supporting this, the uneven distribution of porosity and fracture zones along the Petrivsko-Kreminsky fault highlights the role of these processes. Moreover, the territory of brachyanticlines exhibits scattered, irregular, and anomalous porosity localization, underscoring the influence of ascending flows of heated hydrothermal fluids. These processes ultimately resulted in the occlusion and dense cementation of fractures with carbonate and pyritized-iron cement.

The interdependence between tectonic activation and fluid migration, followed by temporary fluid localization, is a key factor influencing the gas content of the Svyatohirsk brachyanticline. The upward movement of thermal masses, transporting heated fluids enriched with endogenous components from deeper strata, reacts with the formations they pass through (primarily due to temperature) and accumulates in the reservoir formations. During periods of relative dormancy, these fluid masses interact with the surrounding rocks, becoming integrated into the hydrogeochemical and geodynamic systems of the region [29, 30, 34].

Secondary reactions can affect the temperature regime of the reservoir. The temperature difference

between the lower and upper parts of the formation leads to convective fluid movements within the reservoir. Additionally, excessive subcapillary pressure is generated, pushing the fluid to the point of maximum resistance. If the reservoir is isolated, these processes create zones of abnormal reservoir pressure (ARP), which are common in the Svyatohirsk brachyanticline. If the reservoir is not isolated, hydraulic forces induce vertical and, when ARP is released, laminar-vertical fluid flows (including oil and gas) from lower to upper aquifer complexes.

These flows form hydrogeochemical anomalies and accumulate in the next reservoir [16].

During both current and future tectonic activations, this process will continue intermittently, though with progressively less impact on the cement substance (due to the prior erosion of "rapid migration" channels in unloading zones), while leading to an accumulation of endogenous gas. Traps that have already accumulated gas will undergo further intermittent, short-term degassing due to the temporary depressurization of the existing fluid traps (Fig. 4).

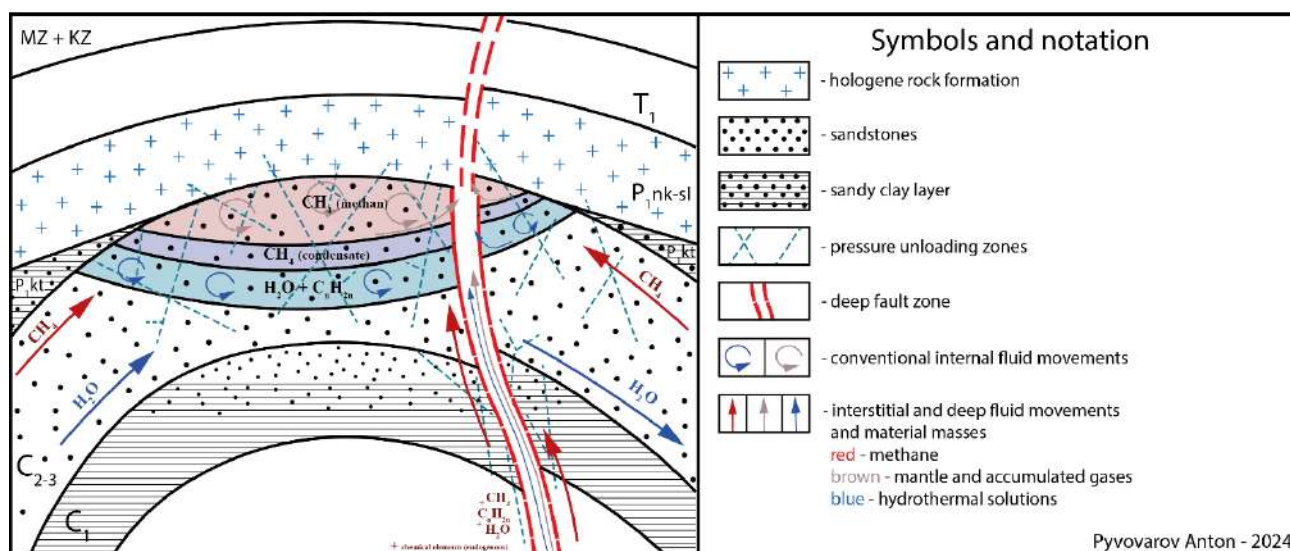


Fig. 4. Schematic model of hydrocarbon accumulation formation within the Svyatohirsk brachyanticline (by Anton Pyvovarov, 2024)

The practical significance. The geological model and methodology for correlating inversions with tectonic structures offer significant potential for identifying geological features and processes within the Earth's crust. By analyzing and correlating various types of inversions, this approach aids in the identification and prediction of hydrocarbon accumulations.

The geodynamic activation of regional deep fault zones is intrinsically linked to centers of heat and mass transfer within the mantle-crustal interface. These processes are driven by degassing phenomena and thermal activity originating from crustal-mantle centers. Such activation induces significant anomalies in geological and hydrogeochemical systems, fostering the development of localized hydrocarbon accumulation zones within anticline structures. Furthermore, these processes facilitate the lithological and petrographic evolution of such zones, characterized by enrichment with hydrothermal solutions that alter the mineralogical and structural composition of the host rocks [17].

A schematic map (Fig. 5) has been developed to delineate the predicted areas for further exploration and prospecting activities. This map incorporates the following key factors:

- The location of hydrogeological complexes relative to deep fault zones;
- Indicators of fracture and pore space within productive horizons;
- Enrichment of aquifer fluids with endogenous components;
- Geochemical types of aquifer complexes;
- Thermohydrodynamic parameters in relation to the zones of disjunctive faults;
- Correlation between hydrogeochemical and thermohydrodynamic inversions;
- Lithological and petrographic composition of reservoir rocks, with particular focus on the filling of fracture and pore spaces with regenerative and clay-carbonate cement.

Conclusions. The research has demonstrated that the fluid dynamic interaction between the brachyanticline structure and the deep fault, along with its apophyses in the form of secondary disjuncts, results in geochemical and thermohydrodynamic inversions. These inversions are driven by heat flows and mantle degassing, which facilitate the interaction between oscillatory and folding movements and fluid migration along depressional zones. Deep faults play a critical role in transporting upward heated fluid masses, leading to hydrogeoche-

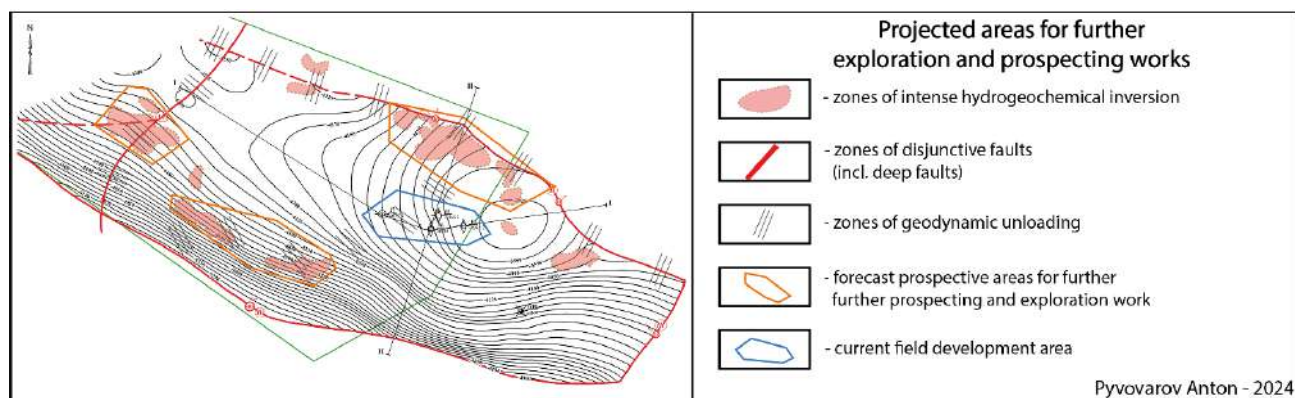


Fig. 5. Schematic map of the projected areas for further exploration and prospecting within the Svyatohirsk brachyanticline (by Anton Pyvovarov, 2024)

chemical anomalies. The heating and disruption of the natural thermal gradient generate thermohydrogeodynamic inversions. The unique lithological composition of the reservoir rocks is characterized by significant cementation of tectonogenic fractures, likely originating during the Palatinate phase of Hercynian tectogenesis, with secondary cementation occurring due to the influence of powerful or localized tectonic activations.

The interplay of hydrogeochemical and thermodynamic inversions has also contributed to lithological transformations, notably the secondary cementation of tectonogenic fractures. These fractures, formed during and after the Palatinate phase of tectonic activation, were progressively sealed by migrating fluid masses. Changes in thermobaric conditions during the post-Laramie tectonic phase further exacerbated this process, resulting in a pronounced decline in porosity and permeability. Hydrothermal anomalies are evident along the entire extent of the Petrivsko-Kreminskyi deep fault zone. The enrichment of aquifer complexes with endogenous components—such as the heavy isotope ^{13}C , mercury, bromine, and iodine—may serve as indicators of

abiogenic hydrocarbon presence. Furthermore, the interval saturation of hydrocarbons is attributed to mantle degassing, which occurs due to the unblocking of migration pathways and the establishment of mantle-crustal heat and mass transfer centers.

A comprehensive understanding of the model's principles, mechanisms, and specific features governing hydrocarbon accumulation within the Svyatohirsk brachyanticline is essential for advancing research on hydrocarbon genesis. This knowledge is critical for predicting potential hydrocarbon-bearing structures not only within the Dnipro-Donetsk Basin but also in other geological contexts worldwide.

Refinement and detailed parameterization of the current model can enhance its applicability to diverse geological formations. This could also substantiate the existence of abiogenic hydrocarbons within geological structures influenced by deep fault zones, frequently observed as lineaments. Such findings could significantly impact hydrocarbon exploration strategies and expand theoretical frameworks for understanding hydrocarbon origins.

Список використаної літератури

1. Барташук О. В., Суярко В. Г. Горизонтальні переміщення геомас у континентальних рифтових геоструктурах (на прикладі Дніпровсько-Донецького палеорифту). Частина 1: Структурні прояви тектонічної течії в фундаменті. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». 2018. № 49. С. 10-23. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-02>
2. Гавриш В. К. Глубинное строение и эволюция Припятско-Днепровско-Донецкого и Кенийского рифтов. Тезисы докладов 27-го МГК, Секция 07 Тектоника. Москва: Наука, 1984. Т. 3. С. 207-208.
3. Барташук О. Системна організація диз'юнктивної тектоніки консолідованого фундаменту Дніпровсько-Донецького палеорифту. Частина 1: Лінеamenti. Вісник ХНУ. Серія «Геологія, географія, екологія». 2016. Вип. 45. С. 14-22. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-02>
4. Helgeson H. C. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Amer. J. Sci. 1969. Vol. 267. P. 729-804. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.267.7.729>
5. Сухов В. В. Гідрогеологічні особливості розвитку суфозії та карсту карбонатних порід на території Святогірського історико-архітектурного комплексу: дис. ... канд. геол. наук. Харків, 2016. 157 с.
6. Белоконов В. Г. Неотектонические движения в Донбассе и их связь со структурными элементами. Материалы по геологии Донецкого бассейна. Москва: Наука, 1968. С. 11-15.
7. Суярко В. Г., Гаврилук О. В. Про джерела надходження та міграцію бром у підземних водах (на прикладі Дніпровсько-Донецького авлакогену). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.

Серія: «Геологія. Географія. Екологія». 2014. № 41(1128). С. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2014-41-11>

8. Суярко В. Г. Прогнозування, пошук та розвідка родовищ вуглеводнів: підручник. Харків: Фоліо, 2015. 26 с.
9. Гавриш В. К. Роль глубинных разломов в формировании структур Днепровско-Донецкой впадины. Геологический журнал. 1965. Т. 25. № 6. С. 13-21.
10. Cowie P. A., Roberts G. P. *Tectonic Faults: Causes, Mechanisms and Consequences*. Wiley-Blackwell, 2001.
11. Brown G. C., Taylor S. D. Hydrothermal systems and geochemistry: Fluid migration along faults and the formation of mineral deposits. *Earth-Science Reviews*. 2007. Vol. 83, No. 3-4. P. 145-174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.04.002>
12. Lister G. S., Davis G. H. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults. *Journal of Structural Geology*. 1989. Vol. 11, No. 1. P. 65-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90036-9)
13. Menzies M., Cox M. *The Tectonic Evolution of Continental Rifts*. Geological Society Special Publication. 2015. Vol. 249. P. 75-101. DOI: <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.249.01.05>
14. Peacock D. C. P., Sanderson D. J. Displacement Transforms and the Aseismic Faulting Process. *Journal of Structural Geology*. 1991. Vol. 13, No. 6. P. 747-752. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90033-F](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90033-F)
15. Corti G., Bonini M. Fault Evolution and Fluid Migration in Continental Rifts: Evidence from the East African Rift. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. Vol. 108, No. B11. P. 2509. DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JB002166>
16. Ingram M., Manning C. Fluid Flow Along Fault Zones in the San Andreas Fault System. *Tectonophysics*. 2000. Vol. 324, No. 1-4. P. 161-172. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00117-X)
17. Morrow C. A., Knipe R. J. *Fault-Related Rocks: A Photographic Atlas*. Wiley-Blackwell, 2015.
18. Sibson R. H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*. 1996. Vol. 18, No. 8. P. 1031-1042. DOI: [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6)
19. Faulkner D. R., Jackson C. A.-L., Lunn R. J. et al. A review of recent developments concerning the structure, mechanics, and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*. 2010. Vol. 32, No. 11. P. 1557-1575. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009>
20. Miller S. A., Nur A., Olgaard D. L. Earthquakes as a coupled shear stress-high pore pressure dynamical system. *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23, No. 2. P. 197-200. DOI: <https://doi.org/10.1029/95GL03691>
21. Scholz C. H. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. 2nd ed. Cambridge University Press, 2002.
22. Taira A., Hill M., Firth J. et al. Sediment deformation and fluid migration in the Nankai Accretionary Prism. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. 1992. Vol. 131. P. 88-103. DOI: <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.131.131.1992>
23. Tobin H. J., Saffer D. M. Elevated fluid pressure and extreme mechanical weakness of a plate-boundary fault. *Nature*. 2009. Vol. 449, No. 7164. P. 76-78. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06064>
24. Wibberley C. A. J., Shimamoto T. Internal structure and permeability of major fault zones: The outcrop study from the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. *Journal of Structural Geology*. 2003. Vol. 25, No. 1. P. 59-78. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00014-7)
25. Audet P., Bürgmann R. Possible control of subduction zone slow-earthquake periodicity by silica enrichment. *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 7. P. 764-769. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2224>
26. Evans J. P., Chester F. M. Fluid-rock interaction in faults of the San Andreas system: Inferences from fault rock geochemistry, fault mechanics, and fault-zone structure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1995. Vol. 100, No. B7. P. 13007-13020. DOI: <https://doi.org/10.1029/94JB03189>
27. Sibson R. H., Rowland J. V. Stress, fluid pressure, and structural permeability in seismogenic crust, North Island, New Zealand. *Geophysical Journal International*. 2008. Vol. 172, No. 3. P. 837-848. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03642.x>
28. Fisher A. T., Becker K. Channelized fluid flow in oceanic crust reconciles heat-flow and permeability data. *Nature*. 2000. Vol. 403, No. 6765. P. 71-74. DOI: <https://doi.org/10.1038/47463>
29. Peacock S. M. Fluid processes in subduction zones. *Science*. 1990. Vol. 248, No. 4953. P. 329-337. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.248.4953.329>
30. Montési L. G. J. Controls on the variation of fault spacing with depth in brittle lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2004. Vol. 109, No. B4. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JB002800>
31. Chester F. M., Evans J. P., Biegel R. L. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1993. Vol. 98, No. B1. P. 771-786. DOI: <https://doi.org/10.1029/92JB01866>
32. Bickle M. J., McKenzie D. The transport of heat and matter by fluids during metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987. Vol. 95. P. 384-392. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00371705>
33. Borradaile G. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*. 1988. Vol. 156, No. 1-2. P. 1-20. DOI: [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90279-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90279-X)

References

1. Bartashchuk, O. V., & Suyarko, V. G. (2018). Horizontal displacements of geomasses in continental rift geostuctures (on the example of the Dnipro-Donetsk paleorift). Part 1: Structural manifestations of tectonic flow in the

- basement. V. N. Karazin Kharkiv National University Bulletin, Series "Geology. Geography. Ecology", 49, 10-23. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-02> [in Ukrainian]
2. Gavrysh, V. K. (1984). Deep structure and evolution of the Prypiat-Dnipro-Donetsk and Kenyan rifts. In Abstracts of the 27th IGC, Section 07 Tectonics (Vol. 3, pp. 207-208). M.: Nauka.
 3. Bartashchuk, O. (2016). System organization of disjunctive tectonics of the consolidated basement of the Dnipro-Donetsk paleorift. Part 1: Lineaments. KhNU Bulletin, Series "Geology, Geography, Ecology", 45, 14-22. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-02> [in Ukrainian]
 4. Helgeson, H. C. (1969). Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. American Journal of Science, 267, 729-804. <https://doi.org/10.2475/ajs.267.7.729>
 5. Sukhov, V. V. (2016). Hydrogeological features of the development of suffosion and karst of carbonate rocks on the territory of Sviatohirsk historical and architectural complex [Doctoral dissertation]. Kharkiv. [in Ukrainian]
 6. Belokon, V. G. (1968). Neotectonic movements in Donbas and their connection with structural elements. In Materials on the geology of the Donetsk basin (11-15). M.: Nauka.
 7. Suyarko, V. G., & Havryliuk, O. V. (2014). On the sources of bromine inputs and migration in groundwater (on the example of the Dnipro-Donetsk aulacogen). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", 41(1128), 70-75. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2014-41-11> [in Ukrainian]
 8. Suyarko, V. G. (2015). Prediction, prospecting and exploration of hydrocarbon deposits: Textbook. Kharkiv: Folio. [in Ukrainian]
 9. Gavrysh, V. K. (1965). The role of deep faults in the formation of structures of the Dnipro-Donetsk depression. Geological Journal, 25(6), 13-21.
 10. Cowie, P. A., & Roberts, G. P. (2001). Tectonic Faults: Causes, Mechanisms and Consequences. Wiley-Blackwell.
 11. Brown, G. C., & Taylor, S. D. (2007). Hydrothermal systems and geochemistry: Fluid migration along faults and the formation of mineral deposits. Earth-Science Reviews, 83(3-4), 145-174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.04.002>
 12. Lister, G. S., & Davis, G. H. (1989). The origin of metamorphic core complexes and detachment faults. Journal of Structural Geology, 11(1), 65-94. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90036-9)
 13. Menzies, M., & Cox, M. (2015). The Tectonic Evolution of Continental Rifts. Geological Society Special Publication, 249, 75-101. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.249.01.05>
 14. Peacock, D. C. P., & Sanderson, D. J. (1991). Displacement Transforms and the Aseismic Faulting Process. Journal of Structural Geology, 13(6), 747-752. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90033-F](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90033-F)
 15. Corti, G., & Bonini, M. (2003). Fault Evolution and Fluid Migration in Continental Rifts: Evidence from the East African Rift. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 108(B11), 2509. <https://doi.org/10.1029/2002JB002166>
 16. Ingram, M., & Manning, C. (2000). Fluid Flow Along Fault Zones in the San Andreas Fault System. Tectonophysics.
 17. Morrow, C. A., & Knipe, R. J. (2015). Fault-Related Rocks: A Photographic Atlas. Wiley-Blackwell.
 18. Sibson, R. H. (1996). Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. Journal of Structural Geology, 18(8), 1031-1042. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(96\)00032-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(96)00032-6)
 19. Faulkner, D. R., Jackson, C. A.-L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J., & Withjack, M. O. (2010). A review of recent developments concerning the structure, mechanics, and fluid flow properties of fault zones. Journal of Structural Geology, 32(11), 1557-1575. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009>
 20. Miller, S. A., Nur, A., & Olgaard, D. L. (1996). Earthquakes as a coupled shear stress-high pore pressure dynamical system. Geophysical Research Letters, 23(2), 197-200. <https://doi.org/10.1029/95GL03691>
 21. Scholz, C. H. (2002). The Mechanics of Earthquakes and Faulting (2nd ed.). Cambridge University Press.
 22. Taira, A., Hill, M., Firth, J., Berner, U., Brückmann, W., Byrne, T., ... & Zhang, J. (1992). Sediment deformation and fluid migration in the Nankai Accretionary Prism. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 131, 88-103. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.131.131.1992>
 23. Tobin, H. J., & Saffer, D. M. (2009). Elevated fluid pressure and extreme mechanical weakness of a plate-boundary fault. Nature, 449(7164), 76-78. <https://doi.org/10.1038/nature06064>
 24. Wibberley, C. A. J., & Shimamoto, T. (2003). Internal structure and permeability of major fault zones: The outcrop study from the Median Tectonic Line in Mie Prefecture, Southwest Japan. Journal of Structural Geology, 25(1), 59-78. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00014-7)
 25. Audet, P., & Bürgmann, R. (2014). Possible control of subduction zone slow-earthquake periodicity by silica enrichment. Nature Geoscience, 7, 764-769. <https://doi.org/10.1038/ngeo2224>
 26. Evans, J. P., & Chester, F. M. (1995). Fluid-rock interaction in faults of the San Andreas system: Inferences from fault rock geochemistry, fault mechanics, and fault-zone structure. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B7), 13007-13020. <https://doi.org/10.1029/94JB03189>
 27. Sibson, R. H., & Rowland, J. V. (2008). Stress, fluid pressure, and structural permeability in seismogenic crust, North Island, New Zealand. Geophysical Journal International, 172(3), 837-848. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03642.x>
 28. Fisher, A. T., & Becker, K. (2000). Channelized fluid flow in oceanic crust reconciles heat-flow and permeability data. Nature, 403(6765), 71-74. <https://doi.org/10.1038/47463>
 29. Peacock, S. M. (1990). Fluid processes in subduction zones. Science, 248(4953), 329-337. <https://doi.org/10.1126/science.248.4953.329>

30. Montési, L. G. J. (2004). Controls on the variation of fault spacing with depth in brittle lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B4). <https://doi.org/10.1029/2003JB002800>
31. Chester, F. M., Evans, J. P., & Biegel, R. L. (1993). Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B1), 771-786. <https://doi.org/10.1029/92JB01866>
32. Bickle, M. J., & McKenzie, D. (1987). The transport of heat and matter by fluids during metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95, 384-392. <https://doi.org/10.1007/BF00371705>
33. Borradaile, G. (1988). Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156(1-2), 1-20. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90279-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90279-X)

Вплив Петрівсько-Кремінського глибинного розлому на міграцію флюїдів в породах Святогірської брахіантикліналі

Антон Пивоваров

Магістр геології нафти і газу (Науки про Землю),
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Досліджено вплив Петрівсько-Кремінського глибинного розлому та його апофіз на формування системи гідрогеохімічних і термогідрогеодинамічних процесів у межах Святогірської брахіантикліналі (Кам'янська площа) Дніпровсько-Донецького авлакогену. Розломні розривні структури визначені як ключові канали вертикальної міграції флюїдів і теплових потоків з глибинних шарів земної кори та мантії. Ця динамічна система призводить до формування зон, що характеризуються вираженими гідрогеохімічними інверсіями, про що свідчить значне збагачення підземних вод ендегенними компонентами, зокрема гелієм, радоном, аргоном і вуглекислим газом (CO₂). У досліджуваних водоносних горизонтах зафіксовано термогідрогеодинамічні аномалії з підвищеними температурами в діапазоні від 23°C до 27°C (при фонових 10°C до 12°C). Такі аномалії стимулюють розвиток конвективних процесів, що своєю чергою пришвидшують катагенетичні та метагенетичні перетворення всього розрізу порід. Ці процеси зумовлюють вторинні літологічні зміни, які проявляються у вигляді цементації умовного порово-тріщинного простору в породах-колекторах, зокрема через перевідкладення карбонатної маси, перенесеної внаслідок взаємодії з агресивним CO₂ із нижчезалягаючих горизонтів. Зони розвантаження, представлені порово-тріщинуватим простором уздовж зони глибинного розлому та його апофіз, виконують роль каналів для висхідної міграції розігрітих флюїдальних мас. Це порушує тривіальний тепловий градієнт і сприяє активізації інтернально-пластових процесів. Крім того, засвідчено, що аномалії вмісту важкого ізотопу вуглецю ($\delta^{13}\text{C}$) у підземних водоносних комплексах свідчать про термально-метаморфічне походження та процеси дегазації, що підтверджує ендегенний характер флюїдальних мас. Подібний характер флюїдів чітко простежується вздовж зони глибинного розлому та його диз'юнктивних апофізів. Комбінація термогідрогеодинамічних та гідрогеохімічних інверсій мають сигніфікативний вплив на процеси катагенезу та метагенезу, що простежується у літолого-фаціальному складі пізньокарбонівих пісковиків (C₃). Кореляція різного роду інверсій та їх систематизація і прив'язка до глибинних розломів і диз'юнктивних тектонічних порушень має важливе значення для розуміння механізмів взаємодії тектонічних структур з гідрогеологічними умовами та можуть бути використані в подальших геологічних дослідженнях і для оцінки ресурсної бази вже з урахуванням флюїдодинамічних параметрів порід-колекторів, що мають систематичний вплив від глибинних розломів і проходять вздовж зони розвантаження.

Ключові слова: Святогірська брахіантикліналь, Петрівсько-Кремінський глибинний розлом, міграція флюїдів, потоки розігрітих флюїдальних мас, тепломасоперенесення.

Надійшла 2 жовтня 2024 р.
Прийнята 10 листопада 2024 р.

Вплив структури мінерального адсорбента на ефективність фракціонування важких ізотопів водню у водних розчинах

Олександр Пушкар'юв ¹,

д. геол. н., ст. наук. співроб., пров. наук. співроб.,

¹ ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,

e-mail: pushkarevigns@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-4382-8620>;

Ірина Севрук ¹,

к. геол. н., ст. досл., заст. директора,

e-mail: irina_mihalovna@ukr.net;  <https://orcid.org/0000-0003-2407-0735>;

Юрій Деміхов ¹

к. геол.-мін. н., ст. наук. співроб., зав. лабораторією,

e-mail: y_demikhov@ukr.net;  <https://orcid.org/0000-0002-3576-6570>;

Олександр Зубко ¹

наук. співроб.

e-mail: zubko2019alex@gmail.com;  <https://orcid.org/0000-0002-2521-8087>;

Віталій Долін ¹,

мол. наук. співроб.,

e-mail: dolinvitaliy@gmail.com;  <https://orcid.org/0000-0002-1962-9277>;

Іван Шраменко ¹,

к. геол.-мін. н., ст. наук. співроб., пров. наук. співроб.,

e-mail: shramenko_ivan@ukr.net;  <https://orcid.org/0000-0002-7010-0934>

Дослідженнями авторів встановлено можливість очищення тритійованої води від тритію з використанням мінеральних адсорбентів. Для визначення залежності фракціонування важких ізотопів водню у тритій-дейтерій-протієвому водному розчині від структури мінерального адсорбента були створені вісім експериментальних водно-мінеральних систем. Як адсорбенти використані: каолінит Глуховецького родовища, (структурний тип 1 : 1), шаруваті силікати структурного типу 2 : 1 – октаедричний монтморилоніт (Черкаське родовище) та тетраедричний сапоніт (Варварівське родовище), палигорськіт Черкаського родовища та сепіоліт із родовища Вікалваро (Іспанія), а також кліноптилоліт Сокириницького родовища. Експерименти виконувалися в стаціонарних умовах. Визначення температурних інтервалів для екстрагування із мінеральної маси фракцій вологи, що відповідають певним структурним позиціям у монтморилоніті, сапоніті, палигорськіті та сепіоліті виконано за допомогою термогравіметричного та диференційно-термогравіметричного аналізів. Зміни співвідношення дейтерію (D) і тритію (T) в робочому розчині експериментальних систем відбувалось залежно від структурного типу мінерального адсорбента. За час взаємодії робочого розчину із мінеральними адсорбентами спостерігалось диференційоване вилучення важких ізотопів водню із розчину. Найбільший зсув ізотопного D/T співвідношення у залишковому розчині був зафіксований в системах із монтморилонітом і сапонітом. В мінеральних адсорбентах ізотопи водню розподілялись залежно від їх структурної будови. Найбільший зсув ізотопного дейтерій/тритієвого відношення в процесі поверхневої адсорбції відбувся в системах із цеолітом і монтморилонітом. У процесі обміну гідроксильними групами між розчином H(DT)O і структурами силікатів субстрату найбільший зсув ізотопного дейтерій / тритієвого відношення стався у палигорськіті, кліноптилоліті й каолініті.

Ключові слова: структура, мінеральний адсорбент, фракціонування, ізотопи водню, водний розчин.

Як цитувати: Пушкар'юв Олександр. Вплив структури мінерального адсорбента на ефективність фракціонування важких ізотопів водню у водних розчинах / Олександр Пушкар'юв, Ірина Севрук, Юрій Деміхов, Олександр Зубко, Віталій Долін, Іван Шраменко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 85-96. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-06>

In cites: Pushkarov Oleksandr, Sevruck Iryna, Demikhov Yuriy, Zubko Oleksandr, Vitaliy Dolin, Shramenko Ivan (2024). Influence of mineral adsorbent on efficiency of fractionation of heavy hydrogen isotopes in aqueous solutions. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 85-96. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-06> [in Ukrainian]

Аналіз останніх досліджень. У процесі штатної експлуатації важководних ядерних реакторів внаслідок активації дейтерію відбувається забруднення уповільнювача (важкої води) тритієм, що потребує заміни уповільнювача. Не менш важливими проблемами є необхідність очищення від тритію дейтерієвої води, яка використовується у ядерній промисловості та підвищення ефек-

тивності технологій концентрування тритію з метою його подальшого використання. Для вирішення цих проблем можуть використовуватися процеси фракціонування ізотопів водню шляхом електролізу водних розчинів [7]. Існують методи ректифікації води, де використовується розділення і фракціонування ізотопів водню. В основі цих методів лежить неоднакова летючість H₂O,

© Пушкар'юв Олександр, Севрук Ірина, Деміхов Юрій, Зубко Олександр,

Долін Віталій, Шраменко Іван, 2024

HDO, DTO і НТО внаслідок різниці температур їх кипіння (патенти USA 4799945, UA 57558). У процесі ректифікації парова фаза збагачується більш летючої H_2O , а рідка фаза - менш летючої важкою формою водню, що обумовлює концентрування дейтерію і тритію в кубовому залишку колони ректифікації. Головним недоліком таких способів є низька ефективність фракціонування ізоотопів з коефіцієнтом близько 1.1, їх висока енергоємність та вибухонебезпечність.

Існують дослідження для оцінки потенційних можливостей ізоотопів водню в методах визначення віку та як індикаторів для ґрунтових і поверхневих вод [15, 20]. У дослідженні показано, що тритій і дейтерій можуть взаємодіяти з глинистими мінералами коли вода дифундує через глину Девідсона, але не наводять даних щодо типу глинистих мінералів породи та впливу їхньої структури на можливість фракціонування важких ізоотопів водню.

У виданні *Environment International* опубліковано результати дослідження щодо фракціонування важких ізоотопів водню у біологічних системах [16], де немає посилань на вплив мінерального субстрату на фракціонування важких ізоотопів водню. Тобто, у даний час відсутні публікації щодо визначення важливості впливу типу і структури мінерального адсорбента на фракціонування важких ізоотопів водню у водних розчинах.

Вирішення проблеми розділення важких ізоотопів водню має важливе значення для очищення технологічних вод на підприємствах паливно-енергетичного комплексу від утвореного в них тритію для повторного використання дейтерію на важководних реакторах. Існуючі способи вилучення важких ізоотопів з води є енергозатратними, та потребують великих матеріальних витрат. Наші попередні дослідження дали змогу встановити можливість очищення мінеральними композитами тритійованої води від тритію [1-6]. Було також виконано короткострокове дослідження можливості очищення дейтерієвої води від тритію в динамічних системах під час її фільтрації крізь мінеральні мембрани, де як адсорбенти використані монтморилонітова, палигоськітова та сепіолітова глини. Враховуючи, що глинисті мінерали є потужними гідроізоляторами, для забезпечення можливості фільтрації водного розчину крізь створені мембрани у мінеральну масу додавали кліноптилоліт.

Разом з тим, залишились невизначеними залежність ступеня фракціонування важких ізоотопів водню від особливостей глинистих мінералів різних структурних типів та вклад у цей процес кліноптилоліту у виконаних нами динамічних експериментах. Для виокремлення впливу різних

мінералів на процес фракціонування ізоотопів водню у водному розчині заплановані експерименти виконувались в стаціонарних умовах з використанням дейтерій-третієвої води і у термін, що надавав змогу досягти рівноваги у водно-мінеральних системах.

Метою досліджень є визначення впливу структури мінерального адсорбента на ефективність фракціонування важких ізоотопів водню у водних розчинах.

Матеріали і методи. Експериментальні системи були створені з використанням порід, утворених глинистими мінералами різних структурних типів, а саме: каолінітом Глуховецького родовища (Україна), монтморилонітовою і палигорськітовою глинами (далі монтморилоніт і палигорськіт) Черкаського родовища (Україна), сапонітом Варварівського родовища (Україна), сепіолітом з родовища Вікалваро (*Vicálvaro*) (Іспанія) та кліноптилолітом Сокириницького родовища цеолітів (Україна). Головними структурними елементами глинистих мінералів є гексагональні сітки кремній-кисневих тетраедрів, з'єднаних з також гексагональними сітками алюміній (магній, залізо) – кисень – гідроксильних октаедрів [12]. Відмінність мінеральних різновидів полягає в тому, що структурні елементи в них сполучаються дещо по-різному.

У структурному типі 1 : 1, представником якого є каолініт, в елементарному структурному пакеті одна кремній-киснева тетраедрична сітка зчленовується з однією октаедричною сіткою. У октаедричній алюмо-кисневій сітці найближче оточення іонів алюмінію складається з чотирьох ОН-груп і двох іонів кисню, які є спільними для обох сіток кожного шару [12]. Суміжні шари в такому мінералі розміщуються таким чином, що гідроксильні групи октаедричної сітки одного шару стикаються з кисневими атомами тетраедричної сітки суміжного шару і між ними виникають водневі зв'язки типу О-Н, які заважають розбухання пакета кристалічної ґратки. В результаті молекули води і обмінні катіони не можуть проникати в міжпакетний простір і тому каолініт має невелику ємність обміну ($3 \cdot 10^{-3} - 15 \cdot 10^{-3}$ моль/100 г).

Разом з тим, в умовах зволоженості мінералу молекули важкої води можуть заповнювати шпарини між мінеральними частинками з формуванням початкового адсорбційного шару. Далі можливе включення механізмів ізоотопного обміну за рахунок взаємодії OD- і OT-груп з дисоційованих молекул важкої води з внутрішніми ОН-групами в приповерхневих сітках Al-гідроксильних октаедрів у кристалах каолініту.

У макромолекулярних пакетах мінералів типу 2 : 1, представлених в експериментальних

системах монтморилонітом і сапонітом (група смектитів), між двома гексагональними сітками алюміній-кремній-кисневих тетраедрів розташована одна октаедрична алюміній-киснево-гідроксильна (в монтморилоніті) або магній-киснево-гідроксильна (в сапоніті) сітка [12]. У діоктаедричному монтморилоніті в центральному шарі з кожних трьох октаедрів тільки два заселені тривалентними катіонами (Al^{3+} , Fe^{3+}), які впорядковано чергуються з вакантними октаедрами. У триоктаедричному сапоніті в октаедричному шарі знаходяться двовалентні іони Mg^{2+} і вакантні позиції в ньому відсутні.

Поверхні елементарних пакетів монтморилоніту і сапоніту покриті атомами кисню, тому зв'язок між пакетами слабкий, де діють Ван-дер-Ваальсові міжмолекулярні сили. Між пакетами знаходяться молекули води, за рахунок яких на поверхні мінеральних часток формується подвійний дифузний шар (Wersin, 2004). Вхідження молекул робочого розчину в міжшаровий простір монтморилоніту прискорюється, коли розбухає суха мінеральна маса під час її контакту з водною фазою унаслідок збільшення відстані між структурними пакетами в монтморилоніті від 9,6 до 28 Å і дещо менше в сапоніті. При цьому створюються умови для регідrataції обмінних катіонів (Na, K, Ca, Li та ін.), вилученню їх з гексагональних кілець структури в міжшаровий простір і збільшенню можливості для обміну протона структурної ОН-групи мінералу з важкими ізотопами водню молекул HDO і НТО розчину.

Структура мінералів зі стрічково-канальною структурою утворюється спареними кремній-кисневими ланцюжками піроксенового типу [8]. Стрічки за своєю будовою подібні структурним шарам силікатів типу 2 : 1, а їх товщина становить 0,92–0,94 нм. Ширина стрічок в палигорськіті становить близько 1,2 нм, а в сепіоліті 1,8 нм. Стрічки з'єднуються між собою вздовж осі "с" атомами кисню так, що створюють в площині "ав" квінаксную (шахову) структуру [18]. Триповерхові стрічки в структурі палигорськіті і сепіоліту чергуються з цеолітними каналами, де знаходяться молекули води двох типів. Один тип пов'язаний з координаційно ненасиченими іонами на бічних стінках каналів (це координаційно зв'язана вода). Інший тип води не пов'язаний з якимиись кристалографічними місцями і тільки заповнює цеолітні порожнини (цеолітна вода).

Сепіоліт родовища Вікалваро є типовим представником мінералів зі стрічково-канальною структурою [9]. Мінерал має величину елементарної комірки $13,37 \times 26,95$ Å, в якій розмір каналів дорівнює $3,7 \times 10,6$ Å [14], характерний голчастий габітус кристалів довжиною до 4–5

мкм, що у суцільних масах утворюють сплутано-волокнисту мікротекстуру. Обмінна катіонна ємність мінералу коливається в межах 4–40 мг-екв/100 г. У водно-мінеральних системах за взаємодії палигорськіті та сепіоліту з водним розчином молекули важкої води можуть проникати крізь канали мінеральної структури та обмінюватись з протієвими молекулами цеолітної і координаційно зв'язаної води.

Детальна характеристика кліноптилоліту та можливість його використання для вилучення тритію із водних розчинів наведена у публікації [6].

Для підготовки експериментальних систем були подрібнені наважки використаних мінеральних речовин масою 150 г до розміру часток 0,01–0,025 мм. Мінеральні адсорбенти були переведені у Na-форму. Для цього мінеральна субстанція витримувалась протягом трьох діб у 1 N розчині NaCl, після чого її декантували, промивали дистильованою водою для видалення залишків сольового розчину. Отриманий матеріал поміщали у скляні посудини та заливали 500 см³ дистильованого робочого розчину протій-дейтерій-тритієвої води із вмістом дейтерію 0,495 % і питомою активністю тритію 6678 Бк·дм⁻³. Досягнення рівноважного стану в двофазних водно-мінеральних експериментальних системах забезпечувалось стаціонарним режимом в закритому об'ємі за довготривалої взаємодії фаз. Тривалість експериментів складала близько 300 діб. Міжфазовий перерозподіл ізотопів водню визначався шляхом вимірювання їх вмісту у водному залишку і в мінеральному середовищі. Для цього, після закінчення експериментів із декантованого залишкового розчину були відібрані проби на визначення вмісту дейтерію і тритію. Оцінювання ступеня фракціонування ізотопів водню у різних структурних позиціях глинистих мінералів виконано за допомогою спеціального устаткування [6].

Сутністю цього методу є використання герметичних металевих контейнерів та нагрівального пристрою із контрольованим режимом прогрівання фіксованих наважок мінеральної маси, відібраних після проведення експериментів (рис. 1).

Визначення температурних інтервалів для екстрагування із мінеральної маси фракцій вологи, що відповідають певним структурним позиціям у монтморилоніті, сапоніті, палигорськіті та сепіоліті виконано за допомогою прецизійного термогравіметричного (DT) та диференційно-термогравіметричного (DTG) аналізів на приладі *Derivatograph Q 1500-D* (фірма MOM, Угорщина). Роботи на деріватографі виконувалися відповідно до прийнятої для даних досліджень методики [13]. Термограми знімалися при лінійній швидкості нагрівання 10°C/хв в діапазоні температур

20–1030 °C у повітряному середовищі (аналітик Кошелєв М.В., н.с., Інститут проблем матеріалознавства НАН України). Режим прогрівання као-

лініту для видалення різних структурних типів вологи було визначено за літературними даними [12].

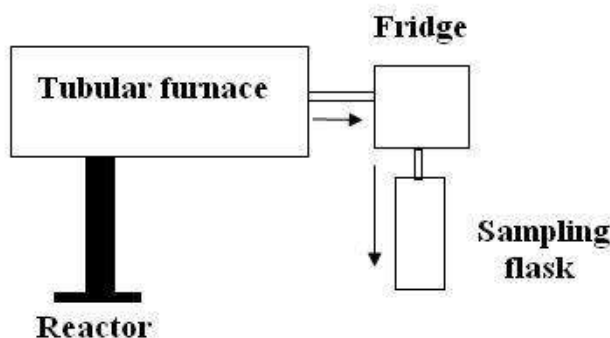


Рис. 1. Принципова схема устаткування для термогравіметричного видалення вологи з мінеральних наважок /

Fig. 1. Schematic diagram of equipment for thermogravimetric dehumidification from mineral samples

У процесі нагрівання монтморилоніту більша частина міжшарової води виділяється в інтервалі від 100 до 200 °C з ендотермічним піком за температури 140 °C (рис. 2, а). Деяка її кількість зберігається до температури 300 °C. Загалом із повітряно-сухого монтморилоніту на цій стадії видалається волога, що складає до 13,5 % маси мінералу.

Подальше прогрівання призводить до руйнування структури монтморилоніту з повільним виділенням конституційної води (ОН), що фіксується двома ендотермічними піками за 512 і 710 °C. На цій стадії мінерал втрачає ще близько 4,5 % своєї маси. Базальна міжшарова відстань зменшується приблизно до 9,8 Å і відбувається зміна параметрів a і b кристалічної ґратки (0).

Дегідратація сапоніту протікає в декілька стадій (рис. 2, б). Порова та поверхнево адсорбована вода, що накопичились у мінеральній масі

унаслідок взаємодії із тритійованою водою в ході експерименту, видаляються за нагрівання до 100–110 °C. В температурному інтервалі 110–300 °C із мінералу екстрагується міжшарова вода з ендотермічним піком за температури 140–142 °C. На цій стадії мінерал втрачає ~12 % своєї маси. Далі починається процес дегідроксолації з ендотермічними піками за 578 °C, 760 °C і 846 °C. Процес аналогічний тому, що спостерігається під час прогрівання монтморилоніту, але з деякими відмінностями, що пов'язані із особливостями структурної будови сапоніту. До того ж, мінерал втрачає ще орієнтовно 5 % своєї маси. За 578 °C базальна міжшарова відстань у сапоніті зменшується до 9,7 Å [17]. Подальша усадка структури відбувається у ході прогрівання до температур вище 750 °C, коли міжшарова відстань зменшується до 9,5 Å.

У палигорскіті й сепіоліті після видалення

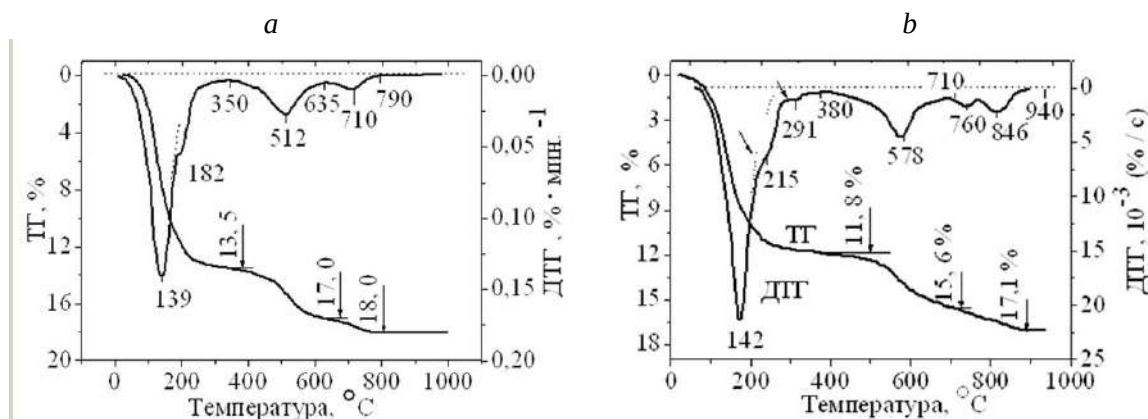


Рис. 2. Результати DT та DTG аналізів для мінералів структурного типу 1:2: монтморилоніту (а) і сапоніту (б) /

Fig. 2. Results of DT and DTG analyzes for minerals of structural type 1:2: montmorillonite (a) and saponite (b)

порової та поверхнево адсорбованої води (100–110 °C) майже без перерви починається випаровування цеолітної води, що знаходиться в кана-

лах структури мінералів. Для палигорскіту цей процес відбувається в температурному інтервалі 110–238 °C з ендотермічним піком за температу-

ри 122 °C (рис. 3, а). При цьому мінерал втрачає близько 14 % своєї маси.

Подальше прогрівання в температурному інтервалі 238–345 °C (з ендотермічним піком за температури 284 °C) призводить до мобілізації дещо міцніше зв'язаної зі стінками каналів гід-

ратної води (ОН₂) і втрати ще ~2 % маси мінералу. Руйнування структури палигорськіту із видаленням з неї гідроксильних груп відбувається в температурному інтервалі 345–860 °C з ендотермічним піком за температури 452 °C та з втратою маси мінералу ~5 %.

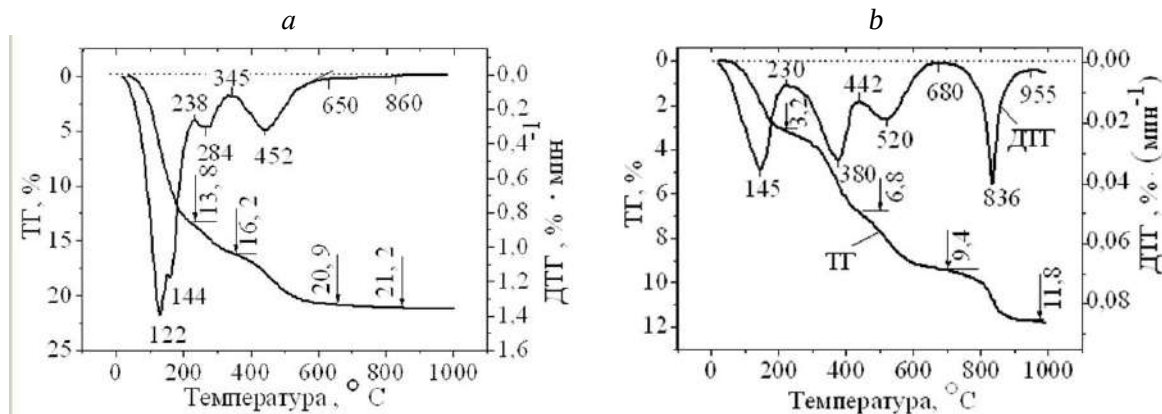


Рис. 3. Результати DT та DTG аналізів для мінералів зі стрічково-канальною структурою: палигорськіту (а) та сепіоліту (b) /

Fig. 3. Results of DT and DTG analyzes for minerals with a ribbon-channel structure: palygorskite (a) and sepiolite (b)

В сепіоліті режим дегідратації має складніший вигляд (рис. 3, b). Перший ендотермічний пік за 145 °C пов'язаний з екстрагуванням цеолітної води. Водночас мінерал втрачає ~3 % своєї маси. Гідратна вода видаляється в температурному інтервалі 230–680 °C (з ендотермічними піками за 380 °C і 520 °C), коли мінерал втрачає ще близько 6 % своєї маси.

Руйнування структури сепіоліту із видаленням кристалізаційної води (ОН-груп) відбувається в температурному інтервалі 680–955 °C з більшими енергетичними затратами, ніж під час руйнування структури палигорськіту. Про це свідчить більш високотемпературний і глибший ендотермічний пік за температури 836 °C, ніж той, що спостерігався на графіках DT та DTG у палигорськіті. Втрата маси сепіоліту під час видалення з його структури гідроксильних груп становить близько 2,5 %.

У каолініті наявність поверхнево-адсорбованої води залежить від ступеня диспергованості мінеральної маси і, як правило, у повітряно-сухому стані складає не більше 1,5–2 %. Більша частина води відповідно до його структури, міститься у формі конституційних ОН-іонів (рис. 4).

Руйнування структури каолініту з виділенням конституційних ОН-іонів відбувається в діапазоні температур 400–600 °C, що супроводжується широким ендотермічним піком на диференціальних кривих прогрівання. Остаточна втрата конституційної води досягається прогріванням мінералу до температури 800 °C [12].

Відносно велика кількість гідроксильних груп в каолініті, ідеалізована структурна форму-

ла якого має вигляд $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, дає змогу очікувати ефект ізотопно-водневого обміну між тритійованою водою і мінеральною фазою за рахунок заміщення структурних ОН-груп мінералу на ОТ-групи водної фази. Разом з тим, слід зазначити, що така можливість залежить від інтенсивності процесів протон-тритонного обміну унаслідок переміщення надлишкових протонів по гексагональних кільцях в структурі каолініту.

Отримані дані термогравіметричного (DT) та диференційно-термогравіметричного (DTG) аналізів уможливили визначити температури, за яких випаровується волога із глинистих мінералів. Ідентифікація екстрагованих за різних температурах фракцій вологи з певними структурними позиціями у глинистих мінералах виконана з урахуванням інформації, викладеної у довідковій літературі [12, 8].

Поверхнево адсорбована на поверхні кристалітів волога (фракція 1) виділяється за температур 110–120 °C. Більша частина міжшарової води з монтморилоніту і сапоніту, цеолітної і координаційно зв'язаної води з палигорськіту і сепіоліту (2 фракція) екстрагується в інтервалі температур 120–300 °C.

Процес дегідроксилації з руйнуванням зв'язків структурних ОН-груп протікає в глинистих мінералах з різною структурою за дещо різних температур і загалом вкладається в інтервал 350–800 °C (3 фракція).

Згідно з [6], були також визначені температурні інтервали екстрагування фракцій вологи із кліноптилоліту.

Після закінчення експериментів із фракцій

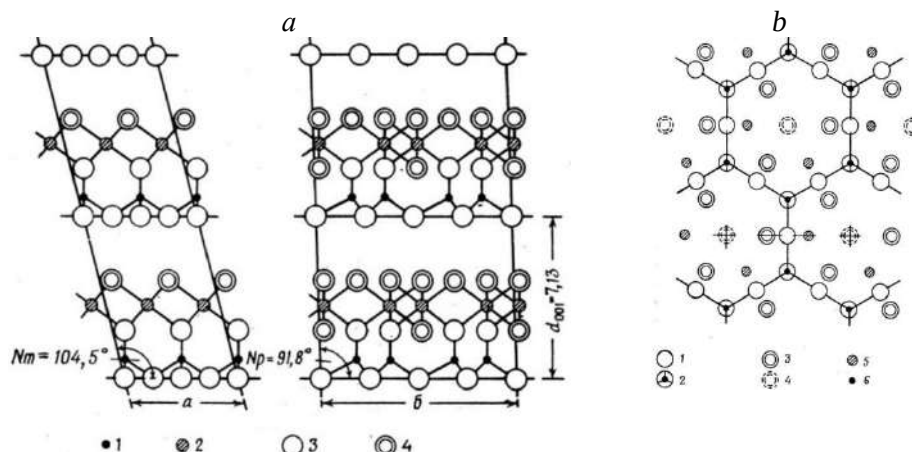


Рис. 4. Структура каолініту: а – упаковка послідовних шарів у проєкціях 100 (а) та 010 (б):

1 – атоми кремнію; 2 – атоми алюмінію; 3 – атоми кисню; 4 – іони гідроксиду [10]. б – сітка гексагональних кілець в проєкції 001: 1 – атоми кисню в площині кілець; 2 – атоми кисню на висоті 2,19 Å; 3 – іони (ОН) на висоті 4,31 Å; 4 – іони (ОН) на висоті 2,19 Å; 5 – атоми алюмінію на висоті 3,25 Å; 6 – атоми алюмінію на висоті 0,6 Å [11] /

Fig. 4. Structure of kaolinite; а – packing of successive layers in 100 (а) and 010 (b) projections: 1 – silicon atoms; 2 – aluminum atoms; 3 – oxygen atoms; 4 – hydroxyl ions [10]. б – a grid of hexagonal rings in the 001 projection: 1 – oxygen atoms in the plane of the rings; 2 – oxygen atoms at a height of 2.19 Å; 3 – ions (OH) at a height of 4.31 Å; 4 – ions (OH) at a height of 2.19 Å; 5 – aluminum atoms at a height of 3.25 Å; 6 – aluminum atoms at a height of 0.6 Å [11]

вологи, екстрагованих із мінеральних наважок мінеральних адсорбентів у відповідних температурних інтервалах, відбирались проби для визначення в них питомої активності тритію згідно наведеної вище методики та виміру в них вмісту дейтерію.

Вміст дейтерію у пробах води визначено у лабораторії ізотопної геохімії Державної установи "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України" під керівництвом завідувача лабораторії Ю.М. Деміхова на маспектрометрі МІ 1201 СГ, відповідно з прийнятою методикою за протоколом визначення складу стабільних ізотопів водню у воді ТУ 1213-

17-51188.

Результати експериментів та їх обговорення. Довготривала взаємодія робочого розчину Н(ДТ)О з мінеральною субстанцією в стаціонарних умовах призвела до встановлення рівноважного стану в експериментальних системах та міжфазовому перерозподілу ізотопів водню. Важкі ізотопи водню, що були поглинуті мінеральними адсорбентами розподілились між різними структурними позиціями мінералів, з яких були виділені відповідні водні фракції (табл. 1, 3) за температур, визначених окремо для кожного, використаного у експериментах мінералу (рис. 2, 3, 4).

Таблиця 1 / Table 1

Питома активність тритію у залишковому розчині Н(ДТ)О (декантаті) і фракціях вологи, що відповідають певним структурним положенням у мінеральних адсорбентах (Бк/дм³) / Specific activity of tritium in the residual Н(ДТ)О solution (decanatate) and water fractions corresponding to certain structural positions in mineral adsorbents (Bq/dm³)

Адсорбент	Декантат	1 фр	2 фр	3 фр
Монтморилоніт	5912	5779	6259	6075
Сапоніт	5882	6499	5738	6679
Плигорськіт	5967	5703	5330	5524
Сепіоліт	5658	6345	5964	5550
Цеоліт	6416	5688	6300	5659
Каолініт		6064	5910	

На основі отриманих значень питомої активності тритію розраховано концентрацію ізотопу у залишковому розчині (декантаті) та екстрагованих фракціях вологи (табл. 2) за виразом (1):

$$C_{Ti} = A_i / 1000 * 5,62 * 10^8, \quad (1)$$

де C_{Ti} – концентрація тритію в i -тій фракції, (атом/см³); A_i – питома активність тритію в i -тій фракції, Бк/дм³; $5,62 \cdot 10^8$ – кількість атомів три-

тію, що відповідає 1 Бк питомої активності; розраховано також частку тритію у відповідних водних фракціях систем (P_T) від його вмісту у вихідній Н(ДТ)О за виразом (2):

$$P_T = C_T / C_{H(DT)O}, \quad (2)$$

де P_T – частка тритію у відповідній водній фракції системи, %; C_T – концентрація тритію в i -тій фракції, атом/см³; $C_{H(DT)O}$ – концентрація тритію у вихідному робочому розчині Н(ДТ)О, (3,8*10⁹ атом/см³).

З урахуванням отриманих значень вмісту дейтерію у залишковому розчині Н(ДТ)О (декантаті) та водних фракціях, що відповідають певним структурним положенням у мінералах адсорбентів розраховано його частку у відповідній

водній фракції системи (P_{Di}) від його вмісту у вихідній Н(ДТ)О за виразом (3):

$$P_{Di} = C_{Di} / C_{H(DT)O}, \quad (3)$$

де P_{Di} – частка дейтерію у відповідній водній фракції системи, %; C_{Di} – концентрація дейтерію в i -тій фракції, г/см³; $C_{H(DT)O}$ – концентрація дейтерію у вихідному робочому розчині Н(ДТ)О, (4,95*10⁻³ г/см³).

Отримані розрахункові показники (P_T , P_{Di}) засвідчили, що за час експерименту в усіх системах інтенсивність вилучення важких ізотопів водню мінеральними адсорбентами із розчину Н(ДТ)О була дещо різною. Для кількісної характеристики цього ефекту запропоновано розрахунковий коефіцієнт, що відображає ступінь зміни

Таблиця 2 / Table 2

Концентрація тритію у фракціях вологи та його частка від концентрації у вихідному розчині Н(ДТ)О / Tritium concentration in aqueous fractions and its share from the concentration in the original Н(ДТ)О solution

Адсорбент	Декантат		1 фр		2 фр		3 фр	
	С, атом/см ³	P_T , %	С, атом/см ³	P_T , %	С, атом/см ³	P_T , %	С, атом/см ³	P_T , %
Монтморилоніт	3,3*10 ⁹	88,5	3,2*10 ⁹	86,5	3,5*10 ⁹	93,7	3,4*10 ⁹	91,0
Сапоніт	3,3*10 ⁹	88,1	3,7*10 ⁹	97,3	3,2*10 ⁹	85,9	3,8*10 ⁹	100,0
Плигорськіт	3,4*10 ⁹	89,4	3,2*10 ⁹	85,4	3,0*10 ⁹	79,8	3,1*10 ⁹	82,7
Сепіоліт	3,2*10 ⁹	84,7	3,6*10 ⁹	95,0	3,4*10 ⁹	89,3	3,1*10 ⁹	83,1
Цеоліт	3,6*10 ⁹	96,1	3,2*10 ⁹	85,2	3,5*10 ⁹	94,3	3,2*10 ⁹	84,7
Каолініт			3,4*10 ⁹	90,8	3,3*10 ⁹	88,5		

Таблиця 3 / Table 3

Вміст дейтерію у залишковому розчині Н(ДТ)О (декантаті) та фракціях вологи, що відповідають певним структурним положенням у мінералах адсорбентів (г/100 см³) / Deuterium content in the residual Н(ДТ)О solution (decantate) and water fractions corresponding to certain structural positions in the adsorbent minerals (g/100 cm³)

Адсорбент	Декантат	1 фр	2 фр	3 фр
Монтморилоніт	0,49	0,48	0,47	0,49
Сапоніт	0,47	0,46	0,47	0,47
Плигорськіт	0,48	0,48	0,48	0,48
Сепіоліт	0,47	0,45	0,47	0,47
Цеоліт	0,49	0,49	0,48	0,49
Каолініт	0,5	0,49		0,5

Таблиця 4 / Table 4

Концентрація дейтерію у фракціях вологи та його частка від концентрації у вихідному розчині Н(ДТ)О /

Deuterium concentration in aqueous fractions and its share from the concentration in the original Н(ДТ)О solution

Адсорбент	Декантат		1 фр		2 фр		3 фр	
	г/см ³	P_D , %	г/см ³	P_D , %	г/см ³	P_D , %	г/см ³	P_D , %
Монтморилоніт	4,9*10 ⁻³	99,0	4,8*10 ⁻³	97,0	4,8*10 ⁻³	97,0	4,7*10 ⁻³	94,9
Сапоніт	4,7*10 ⁻³	94,9	4,6*10 ⁻³	92,9	4,6*10 ⁻³	92,9	4,7*10 ⁻³	94,9
Плигорськіт	4,8*10 ⁻³	97,0	4,8*10 ⁻³	97,0	4,8*10 ⁻³	97,0	4,8*10 ⁻³	97,0
Сепіоліт	4,7*10 ⁻³	94,9	4,5*10 ⁻³	90,9	4,5*10 ⁻³	90,9	4,7*10 ⁻³	94,9
Цеоліт	4,9*10 ⁻³	99,0	4,9*10 ⁻³	99,0	4,9*10 ⁻³	99,0	4,8*10 ⁻³	97,0
Каолініт	5,0*10 ⁻³	101	4,9*10 ⁻³	99,0	4,9*10 ⁻³	99,0		

співвідношення концентрацій дейтерію і тритію у водних фракціях систем відносно їх співвідношення у початковому розчині $H(DT)O$ за виразом (4):

$$K_D = P_D / P_T, \quad (4)$$

де K_D – співвідношення часток дейтерію і тритію у водних фракціях систем; P_D – частка дейтерію у водних фракціях системи, %; P_T – частка тритію

у водних фракціях системи, %.

За час взаємодії мінеральних адсорбентів із розчином $H(DT)O$ практично у всіх експериментальних системах спостерігався зсув співвідношення важких ізотопів водню у водному залишку (декантаті) і структурних позиціях в мінеральних адсорбентах відносно їх співвідношення у початковому розчині $H(DT)O$ (табл. 5).

Таблиця 5 / Table 5

Співвідношення часток дейтерію і тритію, поглинутих із вихідного розчину $H(DT)O$ у водному залишку (декантаті) і структурних позиціях в мінеральних адсорбентах (водних фракціях) експериментальних систем /

The ratio of deuterium and tritium particles absorbed from the original $H(DT)O$ solution in the aqueous residue (decantate) and structural positions in mineral adsorbents (aqueous fractions) of experimental systems

Adsorbent	Decantate	1 fr	2 fr	3 fr
Montmorillonite	1,12	1,14	1,03	1,04
Saponite	1,12	0,98	1,08	0,95
Palygorskite	1,06	1,14	1,21	1,17
Sepiolite	1,10	1,00	1,02	1,14
Zeolite	1,01	1,16	1,05	1,14
Kaolinite		1,11	1,12	

Зміни співвідношення дейтерію і тритію в робочому розчині $H(DT)O$ експериментальних систем відбувались залежно від структурного типу мінерального адсорбента (табл. 5, рис. 5). За час взаємодії робочого розчину $H(DT)O$ із мінеральними адсорбентами спостерігалось диференційоване вилучення важких ізотопів водню із розчину. Найбільший зсув ізотопного дейтерій / тритієвого співвідношення у залишковому розчині (декантаті) був зафіксований в системах, де мінеральний адсорбент представлений шаруватими силікатами – монтморилонітом, сапонітом і сепіолітом (рис. 5, а).

У структурі мінеральних адсорбентів вилучені із розчину $H(DT)O$ ізотопи водню розподілялись дещо по-різному залежно від структурної будови мінеральної речовини. Найбільший зсув ізотопного дейтерій/третієвого відношення в процесі поверхневої адсорбції відбувався в системах, де мінеральний субстрат був представлений кліноптилолітом, палигорськітом і монтморилонітом (відповідно $K_D = 1,16$, табл. 5, рис. 5, b, *fr 1* і 1,14, рис. 5, b, *fr 1*.), що вірогідно було обумовлено наявністю некомпенсованих поверхневих зарядів у мінеральній речовині та розвинутої питомої поверхні.

Обмін гідроксильними групами між розчином $H(DT)O$ і структурами силікатів субстрату супроводжувався найбільшим зсувом ізотопного дейтерій / тритієвого відношення у палигорськіті ($K_D = 1,21$ табл. 5, рис. 5, c, *fr 2*), сепіоліті ($K_D = 1,14$ табл. 5, рис. 5, d, *fr 3*) і каолініті ($K_D = 1,12$ табл. 5, рис. 5, c, *fr 2*).

Отже, наявність різних типів структурної будови у шаруватих і каркасного силікатів, а також різних типів зв'язків у їхніх структурах має суттєве значення для наслідків взаємодії мінеральних адсорбентів з важководними розчинами, яке може супроводжуватися розділенням важких ізотопів водню та бути використаним для очищення технологічних вод АЕС від тритію.

Висновки. 1. Фізичні властивості ізоотопів водню і термодинамічна нерівноцінність ізоотопних сполук призводять до нерівномірного розподілу ізоотопів у міжфазових обмінних реакціях (термодинамічний ізоотопний ефект) з переважною адсорбцією сорбентом однієї з ізоотопних форм.

2. У закритих стаціонарних системах, що складаються із мінеральних адсорбентів і розчину $H(DT)O$ інтенсивність фракціонування важких ізоотопів водню визначається, окрім кінетичного ізоотопного ефекту також структурним типом мінеральної речовини. За час взаємодії мінеральних адсорбентів з розчином $H(DT)O$ практично у всіх експериментальних системах відбувається зсув співвідношення важких ізоотопів водню у водному залишку (декантаті) і структурних позиціях в мінеральних адсорбентах відносно їх співвідношення у початковому розчині $H(DT)O$.

3. За час взаємодії робочого розчину $H(DT)O$ із мінеральними адсорбентами у залишковому розчині (декантаті) найбільший зсув ізотопного дейтерій/третієвого співвідношення був зафіксований в системах, де мінеральний адсор-

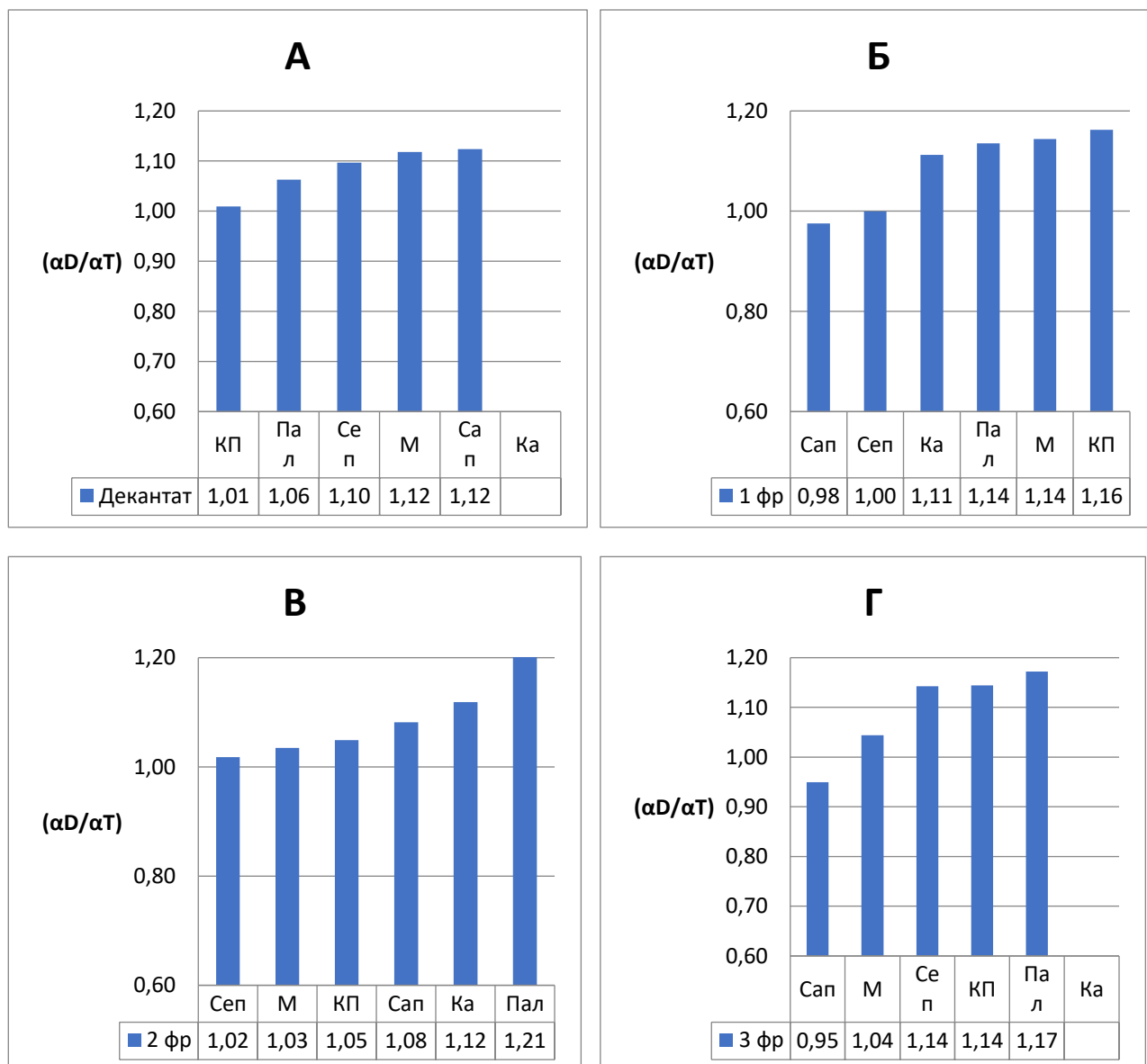


Рис. 5. Зсув співвідношення важких ізотопів водню у водному залишку (декантаті) і структурних позиціях в мінеральних адсорбентів відносно їх співвідношення у початковому розчині Н(DT)О /
 Fig. 5. Shift of the ratio of heavy hydrogen isotopes in the aqueous residue (decantate) and structural positions in mineral adsorbents relative to their ratio in the initial Н(DT)О solution

бент представлений шаруватими силікатами – монтморилонітом, сапонітом і сепіолітом.

4. Вилучені із розчину Н(DT)О ізопои водню розподіляються в мінеральних адсорбентах залежно від їх структурної будови. Найбільший зсув ізотопного дейтерій/третієвого відношення в процесі поверхневої адсорбції відбувся в системах, де мінеральний субстрат був представлений клінофтилолітом, палигорськітом і монтморилонітом, що вірогідно обумовлюється наявністю некомпенсованих поверхневих зарядів у мінеральній речовини та розвинутій питомій поверхні.

5. Обмін гідроксильними групами між розчином Н(DT)О і структурами силікатів субстрату супроводжувався найбільшим зафіксованим зсувом ізотопного дейтерій/третієвого відношення у палигорськіті, сепіоліті та каолініті.

6. Наявність різних типів структурної будови у шаруватих і каркасних силікатів, а також різних типів зв'язків у їхніх структурах має суттєве значення для наслідків взаємодії мінеральних адсорбентів з важководними розчинами, яке може супроводжуватись розділенням важких ізотопів водню та бути використаним для очищення технологічних вод АЕС від тритію.

Список використаної літератури

1. Пушкар'єв О.В., Севрук І.М., Долін В.В. Вплив структури мінерального адсорбенту на детритизацію водних розчинів, *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2021. № 55. С. 73-85 <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-07>
2. Пушкар'єв О. В., Севрук І.М., Зубко О.В., Долін В.В. (мол.). Активізація азотною та гуміновими кислотами алюмосилікатів для покращення адсорбції тритію з водних розчинів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. Київ, 2019. № 1(84). С. 16-20. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.84.02>
3. Пушкар'єв О.В., Руденко І.М., Долін В.В. (мол.), Зубко О.В., Гречановська О.Є. Тритієвий індикатор ефективності термомодифікації адсорбційних властивостей кліноптилоліту, *Мінералогічний журнал*. Київ, 2017, № 39(2). С. 64–74. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.064>
4. Пушкар'єв О.В., Руденко І.М., Розко А.М., Долін В.Вік. Вплив термічної обробки палигорськіту на адсорбцію тритію з водних розчинів, *Мінералогічний журнал*. Київ, 2018. № 40(3). С. 97-104. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.03.097>
5. Пушкар'єв О.В., Севрук І.М., Зубко О.В., Долін Віт.В., Деміхов Ю.М., Скрипкін В.В.. Взаємодія Н(D,T)О з мінеральними адсорбентами в стаціонарних системах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. Київ, 2024. № 1(104). С. 49-54. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.06>
6. Руденко І.М., Пушкар'єв О.В., Долін В.Віт., Зубко О.В., Гречановська О.Є. Тритієвий індикатор ефективності термомодифікації адсорбційних властивостей кліноптилоліту. *Мінералогічний журнал*. Київ, 2017. №39 (2). С. 64 -74. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.064>
7. Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Ветштейн Е.Е. Изотопно-геохимические методы оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод. Киев, Наукова думка, 1977. 154 с.
8. Тарасевич Ю.И., Овчаренко Ф.Д. Адсорбция на глинистых минералах. Киев, 1975. Наукова Думка, 352 с.
9. Abdou M., M.Riva, Alice Ying, C. Day, A. Loarte, L.R. Baylor, P. Humrickhouse, T. F. Fuerst and S. Cho (2020).Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency Nucl. Fusion 61. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abbf35>
10. Brindley G.M. X-ray identification and crystal structures of clay minerals, Min., Soc., London, 1951. 494 p.
11. Brindley G.M., Robinson K. The structure of kaolinite, Mineral Mag., 1946. № 27, 242.
12. Deer, W.A., Howie R.A. and Zussman, J., Rock-forming minerals. 3, Longmans, London, 1962. 317 p.
13. Foldvari, M. Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice, Budapest, 2011. 180 p.
14. Galan, E. Clay Miner. 1996, № 31.P. 443-453. <https://doi.org/10.1180/claymin.1996>
15. Gordon L. Stewart Fractionation of Tritium and Deuterium in Soil Water Book Editor(s):Glenn E. Stout. Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle, 1967. Vol. 11. <https://doi.org/10.1029/GM011p0159>
16. Le Goff, P; Fromm, M; Vichot, L; Badot, PM; Guétat, P. (2014) Isotopic fractionation of tritium in biological systems, *Environment International*, 2014. Vol.65. P. 116-126 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.020>
17. Midgley, H.G. Clay Miner. 16, Publ. by Mineral. Soc., 1956. P. 79-90
18. Pauling, L. The nature of the Chemical bond, Cornel Univ. Press, N.-Y., 1960. 644 p.
19. Sevruck I., Pushkarov O.V., Zubko O.V. Extraction of tritium from aqueous solutions by a clinoptilolite-based mineral adsorbent. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. Kyiv, 2022. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580092>
20. Lee S.E., Hatano Y., Tokitani M., Mazusaki S., Oya Y., Otsuka T., Ashikawa N., Torikai Y., Asakura Nobuyuki, Nakamura H., Isobe K., Kurotaki H., Hamaguchi D., Hayashi T., Widdowson Anna, Jachmich S., Likonen Jari, Rubel M. Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall. *Nuclear Materials and Energy* 26, 2021. 100930. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100930>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Influence of mineral adsorbent on efficiency of fractionation of heavy hydrogen isotopes in aqueous solutions

Oleksandr Pushkarov¹

DSc (Geology), Senior Researcher, Leading Researcher,

¹ SE "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine;

Iryna Sevruck¹

PhD (Geology), Senior Researcher, Deputy Director;

Yuriy Demikhov¹

PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Head of the Laboratory;

Oleksandr Zubko¹

Researcher;

Vitaliy Dolin¹

Junior Researcher;

Ivan Shramenko¹

PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Leading Researcher

ABSTRACT

Formulation of the problem. Solving the problem of separation of heavy hydrogen isotopes in aqueous solutions is important for the purification of process waters from the tritium formed in them at the enterprises of the fuel and energy complex. The authors' research established the possibility of cleaning tritiated water from tritium using mineral adsorbents. The purpose of the research was to determine the influence of the mineral adsorbent structure on the efficiency of fractionation of heavy hydrogen isotopes in aqueous solutions.

Materials and methods. To determine the dependence of the fractionation of heavy hydrogen isotopes in the tritium-deuterium-protium aqueous solution H(DT)O on the structure of the mineral adsorbent, eight experimental water-mineral systems were created. The clay rocks used as adsorbents are mainly composed of: kaolinite from the Glukhovetsky deposit (structural type 1 : 1), layered silicates of the structural type 2 : 1 – octahedral montmorillonite and tetrahedral saponite, palyhorskite from the Cherkaske deposit and sepiolite from the Vikalvaro deposit, as well as clinoptilolite. Experiments were performed in stationary conditions. Determination of temperature intervals for extracting moisture fractions from the mineral mass corresponding to certain structural positions in montmorillonite, saponite, palyhorskite and sepiolite was performed using thermogravimetric and differential thermogravimetric analyses. According to the obtained results, the temperature intervals were determined in which, with the help of special equipment, moisture fractions corresponding to certain structural positions in mineral adsorbents were isolated.

Results. It was established for the first time that the fractionation of heavy hydrogen isotopes in water-mineral systems depends on the structural type of the mineral adsorbent. The largest shift in the deuterium/tritium isotopic ratio in the residual solution (decantate) was recorded in systems where the mineral adsorbent is represented by layered silicates – montmorillonite, saponite, and sepiolite. Also, it was established for the first time that hydrogen isotopes were distributed in mineral adsorbents depending on their structural structure. The largest shift in the isotopic deuterium/tritium ratio during surface adsorption occurred in systems with clinoptilolite, palyhorskite, and montmorillonite, which was probably due to the presence of uncompensated surface charges in the mineral substance and the developed specific surface area. The exchange of hydroxyl groups between the H(DT)O solution and the silicate structures of the substrate was accompanied by the largest shift in the deuterium/tritium isotopic ratio in palyhorskite, sepiolite, and kaolinite.

Conclusions. The presence of different types of structural structure in layered and framework silicates, as well as different types of connections in their structures, is of significant importance for the consequences of the interaction of mineral adsorbents with heavy water solutions, which can be accompanied by the separation of heavy hydrogen isotopes and be used for the purification of process waters of nuclear power plants from tritium.

Keywords: structure, mineral adsorbent, fractionation, hydrogen isotopes, deuterium, tritium, aqueous solution.

References

1. Pushkarev O.V., Sevruck I.M., Dolin V.V. (2021). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (55), 73-85 <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-07> [in Ukrainian]
2. Pushkarev O.V., Sevruck I.M., Zubko O.V., Dolin V.V. (Jr.) (2019). *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(84): 16-20. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.84.02> [in Ukrainian]
3. Pushkarev O.V., Rudenko I.M., Dolin V.V. (Jr.), Zubko O.V., Grechanovskaya O.E. (2017). *Mineralogical Journal*, 39(2): 64-74. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.064> [in Ukrainian]
4. Pushkarev O.V., Rudenko I.M., Rozko A.M., Dolin V.V. (2018). *Mineralogical Journal*, 40(3): 97-104. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.40.03.097> [in Ukrainian]
5. Pushkarev O.V., Sevruck I.M., Zubko O.V., Dolin V.V., Demikhov Y.M., Skripkin V.V. (2024). *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 1(104): 49-54. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.104.06> [in Ukrainian]

6. Rudenko I.M., Pushkarev O.V., Dolin V.V., Zubko O.V., Grechanovskaya O.E. (2017). *Mineralogical journal*. 39, 2: 64-74. [in Ukrainian]
7. Sobotovich E.V., Bondarenko G.N., Vetstein E.E. (1977). *Isotopic and geochemical methods for assessing the degree of interrelation between groundwater and surface water*. Kyiv, Naukova Dumka, 1977, 154.
8. Tarasevych Y.I., Ovcharenko F.D. (1975). *Adsorption on clay minerals*. Kyiv: Naukova Dumka, 352.
9. Abdou M., Riva M., Alice Ying, C. Day, A. Loarte, L.R. Baylor, P. Humrickhouse, T. F. Fuerst and S. Cho (2020). *Physics and technology considerations for the deuterium–tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self sufficiency* Nucl. Fusion 61. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abbf35>
10. Brindley G.M., (1951). (Editor), *X-ray identification and crystal structures of clay minerals*, Min., Soc., London.
11. Brindley G.M., Robinson K. (1946). *The structure of kaolinite*, Mineral Mag., 27, 242.
12. Deer, W.A., Howie R.A. and Zussman, J. (1962), *Rock-forming minerals*. 3, Longmans, London, 317.
13. Foldvari, M. (2011). *Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice*, Budapest, 180.
14. Galan, E. (1996). *Clay Miner.* 31: 443-453. <https://doi.org/10.1180/claymin.1996>
15. Gordon L. (1967). *Stewart Fractionation of Tritium and Deuterium in Soil Water* Book Editor(s): Glenn E. Stout. *Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle*, 11. <https://doi.org/10.1029/GM011p0159>
16. Le Goff, P; Fromm, M; Vichot, L; Badot, PM; Guétat, P. (2014) *Isotopic fractionation of tritium in biological systems*, *Environment International*, 65:116-126 <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.12.020>
17. Midgley, H.G. (1956). *Clay Miner.*, 16, Publ. by Mineral. Soc., 79-90.
18. Pauling, L. (1960). *The nature of the Chemical bond*, Cornel Univ. Press, N.-Y., 644.
19. Sevruk I., O.V. Pushkarov, O.V. Zubko (2022). *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580092>
20. Lee S.E., Hatano Y., Tokitani M., Mazusaki S., Oya Y., Otsuka T., Ashikawa N., Torikai Y., Asakura Nobuyuki, Nakamura H., Isobe K., Kurotaki H., Hamaguchi D., Hayashi T., Widdowson Anna, Jachmich S., Likonen Jari, Rubel M. (2021). *Global distribution of tritium in JET with the ITER-like wall*. *Nuclear Materials and Energy*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100930>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 22 July 2024

Accepted 31 August 2024

Реологічні процеси в схилових масивах м. Київ

Максим Рева¹

к. геол. н., доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології ННІ «Інститут геології»,

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,

e-mail: reva_max@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-1141-093X>;

Олександр Лисенко²

директор² ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань», Київ, Україна,

e-mail: office@iv.kiev.ua,  <https://orcid.org/0009-0003-8048-3371>;

Дмитро Чомко¹

к. геол. н., доцент, зав. кафедри гідрогеології та інженерної геології,

e-mail: chomko@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-8454-5531>

В роботі розглядаються зсувні процеси, які виникли на правобережжі м. Київ. Для розуміння масштабів проблеми наведена загальна статистика розвитку зсувів в місті. В статті розглянуто використання ГІС технологій, як сучасного та досить ефективного методу моніторингу зсувних процесів. Автори акцентують увагу на двох зсувах, які відбулися та відрізняються від решти нетиповою механікою процесу, на яку вплинуло перезволоження ґрунтової маси. Саме ця відмінність стала причиною проведення даного наукового дослідження. Поведінка перезволоженої маси має особливу механіку руху по схилу і класифікується як – зсуви спливання. В статті досліджується даний рух перезволоженої маси ґрунту на схилі як реологічний процес. Авторами проаналізовано теоретичні основи поведінки ґрунтової маси в таких умовах та розглянуто її як реологічну модель. Наведено методику розв'язання таких завдань. Авторами досліджено необхідні параметри ґрунту, які використовуються в побудові розрахункової моделі. Серед параметрів було виділено коефіцієнт в'язкості ґрунту, який заслуговує особливої уваги при розгляді реологічних процесів в ґрунті. Розглянуто модель розв'язку реологічного процесу не можливо вирішити без коефіцієнту в'язкості ґрунту. Використовуючи науковий доробок українських вчених, авторами було визначено цей коефіцієнт в лабораторії. В статті досліджена можливість виникнення зсуву спливання на одному із культурних об'єктів з метою реконструкції сходів в парку Вічної Слави у м. Київ. В статті проаналізована можливість виникнення реологічних процесів на схилах та їх роль у безпеці та життєдіяльності м. Києва. На основі розв'язку моделі встановлено глибину захоплення та швидкість руху потенційного зсуву спливання у разі перезволоження ґрунту на схилі в парку Вічної Слави у м. Київ.

Ключові слова: реологічні процеси, зсуви, зсуви спливання, коефіцієнт в'язкості ґрунту, стійкість схилу, перезволоження ґрунту, інженерно-геологічний елемент.

Як цитувати: Рева Максим. Реологічні процеси в схилових масивах м. Київ / Максим Рева, Олександр Лисенко, Дмитро Чомко // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 97-107. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-07>

In cites: Reva Maksym, Lysenko Oleksandr, Chomko Dmytro (2024). Rheological processes in the slope massifs of the city of Kyiv. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 97-107. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-07> [in Ukrainian]

За даними Спеціалізованого управління протизсувних підземних робіт «СУПІР» в м. Київ налічується близько 42 зсувів, які перебувають в активній фазі [16], відповідно зсувонебезпечних ділянок значно більше. Зсувні процеси в Києві обумовлені геоморфологічними, інженерно-геологічними умовами та антропогенним чинником. А саме досить розчленований рельєфом, ярами та балками правого високого берегу р. Дніпро, який в геологічному розрізі складений – лесами, суглинками та супісками. Особливої уваги слід приділяти розбудові Києва, а саме масове багатоповерхове будівництво, прокладка доріг, засипання ярів, створення ландшафтних насаджень на схилах Київських пагорбів тощо. Внаслідок цього відбулися порушення гідрологічного режиму поверхневих і підземних вод, виникнення баражного ефекту та зволоження ґрунтів. Усе це сприяло активізації гравітаційних, і насамперед, зсувних процесів та руй-

нуванню будівельних об'єктів та інфраструктури міста. Сучасне будівництво, незважаючи на новітні технології протизсувного захисту, продовжує сприяти активізації старих і появи нових зсувних ділянок. Наряду з тим, зсувні процеси є наслідком багатьох факторів, але значне збільшення випадків зсувів відбувається в роки з максимальною кількістю опадів [3], які інфільтрують і насичують лесові ґрунти [14]. Таким чином, в останні роки переважають штормові опади [3], що призводить до активації ерозійних змивів, вторинного затоплення та зсувів. Антропогенний вплив в активізацію зсувних процесів має вагоме значення. Внаслідок втручання в геологічне середовище порушується гідрологічний режим, підвищуються рівні ґрунтових вод, змінюється кут нахилу поверхні, порушується геологічна суцільність порід, руйнується деревостан і дерновий покрив. Всі ці умови на сучасному етапі можна ефективно контролювати за допомогою

геоінформаційних систем (ГІС). Ці системи допомагають враховувати розвиток техногенного навантаження та зміни навколишнього середовища, виявлення та картографування районів активізації та новоутворення зсувів, часто в місцях, недоступних для наземних досліджень. Так,

дослідники Філіпович, Ліщенко та Пазинич в своїх роботах демонструються схематичні карти розвитку зсувних процесів на правому березі Києві, часто прояв реальних зсувних процесів співпадає з побудованими в ГІС схемами (рисунок 1) [3].



Рис. 1. Картографічна модель розповсюдження та динаміки зсувів з отриманими шарами ГІС (фрагмент) [3]. Зсувні ділянки: 1 – контури зсуву скориговані, за космічними даними; 2 – активні зсувні ділянки; 3 – зони підвищеної зсувної небезпеки; зони підвищеного зсувного ризику: 4 – небезпечна; 5 – помірно небезпечний; 6 – малонебезпечний; 7 – зони геодинамічного напруження (лінеаментів), виявлені за результатами інтерпретації матеріалів космічного зображення та частково підтверджені геологічними даними; горизонтальна структура рельєфу: 8 – верхня кромка схилу; 9 – нижня кромка скату; 10 – вигин схилу /

Fig. 1. Cartographic model of landslide distribution in Kyiv. Landslide areas: 1 – landslide contours; 2 – active landslide areas; 3 – zones of increased landslide hazard; 4 – dangerous; 5 – moderately dangerous; 6 – low-hazard; 7 – zones of geodynamic stress; 8 – upper edge of the slope; 9 – lower edge; 10 – slope bend.

Більшість зсувонебезпечних ділянок в Києві за довгу історію боротьби є локалізованими, тобто такими до яких були вжиті протизсувні і протиаварійні заходи: побудовані підпірні стінки, закладені дренажні мережі та інше. Але інколи, навіть на контрольованих ділянках, виникають зсуви. Яскравим прикладом цього можна вважати зсув великої альпійської гірки в ботанічному саду імені О. Фоміна, який почав розвиватися влітку 2007 року [13] рисунок 2.

Під час досліджень даного зсуву було розглянуто багато версій щодо причин його розвитку.

Але науковці та дослідники прийшли до висновку, що головною причиною було перезволоження ґрунтів з яких складається схил, це відбулося через полив рослин, що ростуть на альпійській гірці та через доволі велику кількість атмосферних опадів. Порівнюючи даний зсув із більшістю, які відбуваються в м. Києві можна зробити висновок, що він відрізняється від інших саме за механікою процесу. В інженерній геології, Маслов такі зсуви називав – «зсуви течіння». Відповідно до класифікації Золотарьова такі зсуви називаються зсуви спливи [12]. Ці зсуви можна



Рис. 2. Зсув альпійської гірки в ботанічному саду імені О. Фоміна /
Fig. 2. Landslide of an alpine slide in the O. Fomin Botanical Garden

розглядати як **реологічний процес** [2, 8, 4, 6, 11, 20, 22].

Реологічні процеси виникають при значному зволоженні сповзаючих мас ґрунту та особливо чітко це проявляється при їх перезволоженні $W \rightarrow W_L$ (вологість природня наближається до вологості на межі текучості). Характерною особливістю даного виду зсувного процесу є те, що в русі зсуву бере участь вся маса перезволоженої сповзаючої породи, проте швидкість її руху залежить від глибини. При цьому зсувна маса може з'їхати із схилу незалежно від виділеної лінії ковзання та навіть за умови забезпеченої загальної стійкості тіла зсуву. Рух ґрунту відбувається досить повільно, що дозволяє його розглядати як деформації повзучості, що в свою чергу є складовою реологічних процесів [1, 2, 5, 7].

Мета роботи: дослідити можливість розвитку реологічних процесів на схилах для збереження природних та штучних ландшафтів.

Завдання роботи: проаналізувати теорію виникнення такого процесу на прикладі схилу в парку Вічної Слави, а також дослідити та виконати розрахункову модель щодо визначення величини захвату зсувного тіла та його швидкості сповзання.

Дана стаття має на меті звернути увагу на реологічні процеси, які розвиваються на схилах та ключові елементи в розрахункових моделях цих процесів. Вивченням і дослідженням реологічних процесів науковці займалися досить давно, але на сучасному етапі практичного використання теоретичних досліджень на ці процеси майже не звертають уваги, хоча вони мають міс-

це бути. Так, у березні 2024 року, на досліджуваній ділянці, але нижче за схилом відбулась активна зсув (рисунок 3). Причиною виникнення даного зсуву стало перезволоження маси делювіальних відкладів, що перекривають корінні породи через підйом рівня ґрунтових вод, весняні опади та сезонне танення снігу. Основною складністю для дослідників та комунальних служб при проведенні робіт із зупинки даного процесу стала досить висока швидкість його руху до 1,5 м/добу. За механізмом дії даний зсув був схожий на вплив перезволоженої маси. Тож, аналіз моделі з визначення швидкості розвитку зсуву дозволить розраховувати потенційно небезпечні зсувонебезпечні ділянки [9, 11, 7]. Це матиме важливе практичне застосування, оскільки комунальні служби зможуть оперативно розраховувати час на локалізацію таких процесів, що є важливим в умовах життєдіяльності сучасного міста.

Методика. Розв'язок задач з реологічних процесів на схилах базується на класичних моделях Бінгама-Шведова, Ньютона та Максвелла [10]. Безпосередньо розв'язок задач пов'язаних з зсувами течіння полягає у вирішенні моделі Бінгама-Шведова, яка була адаптована під інженерно-геологічні задачі Масловим [7].

Дана модель вирішується розв'язкою диференційного рівняння з визначення швидкості руху зсувної маси.

$$dv = \frac{\tau_y - \tau_{lim}}{\eta} dy \quad (1)$$

$$dv = \frac{\tau_y - (p_y t g \varphi_{sat} + c_c)}{\eta} dy \quad (2)$$

де, η – коефіцієнт в'язкості ґрунту ($z/(cm^*c)$);



Рис. 3. Зсув на схилі біля Парку Вічної Слави та Аскольдової Могили /
Fig. 3. Landslide on a slope near the Park of Vichnoyi Slavy and Askold's Mohyla

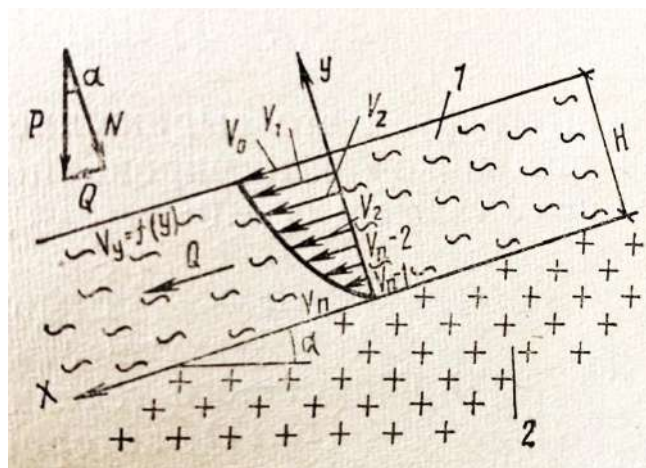


Рис. 4. Розрахункова схема визначення швидкості переміщення зсувної маси
(1 – ґрунти в які піддаються сповзанню; 2 – корінні породи) /

Fig. 4. Calculation scheme for determining the velocity of the sliding mass (1 – soils susceptible to sliding; 2 – bedrock)

τ_y – дотична напруга; $\tau_{lim} = p_y \tan \phi_{sat} + C_c$ – межа повзучості.

В основі розв'язку даної схеми лежить те що, в наслідок перезволоження ґрунтової маси вагою P , яка залягає на схилі під кутом α відбувається розподіл сил $P = N + Q$ (N – нормальна $P \cdot \cos \alpha$; та Q – дотична $P \cdot \sin \alpha$). Вага ґрунту

залежить від питомої ваги (γ) та його потужності H (H -у), відповідно $P = \gamma \cdot (H \cdot y)$ (рис. 4). Створений тиск вагою ґрунту призводить до виникнення напруг σ . Напруга в свою чергу складається $\sigma = \sigma_y + \tau_y$, де $\sigma_y = P \cdot \cos \alpha$ та $\tau_y = P \cdot \sin \alpha$.

Розвиток зсуву спливання відбувається коли дотична напруга буде більшою за межу повзучо-

сті ($\tau_y > \tau_{lim}$). При чому, межа повзучості залежить від тиску P та кута внутрішнього тертя ϕ і питомого зчеплення C . Основною причиною виникнення зсувів спливання при перезволоженні ґрунтової маси є зміна цих характеристик ґрунту, відповідно тиск P збільшується через збільшення питомої ваги γ , кут внутрішнього тертя ϕ знижується ($\phi \rightarrow \phi_{sat}$), питоме зчеплення C знижується і обмежується структурним зчепленням ($c \rightarrow c_c$).

Однією з характеристик зсувів спливання є те, що вони розвиваються на певну зону (глибину захвату D). Потужність цієї зони визначається умовою, що на глибині D дотичні напруження τ , за умови $D=H$ -у будуть дорівнювати межі повзучості $\tau_{lim} = p_y \tan \phi_{sat} + c_c$. Відповідно глибину захвату можна визначити за наступною залежністю:

$$D = \frac{1}{\gamma_{sat} \sin \alpha - \cos \alpha \cdot \tan \phi_{sat}} c_c \quad (3)$$

Щоб визначити швидкість руху сповзаючої маси потрібно проінтегрувати рівняння 2. Відповідно формула швидкості зсуву спливання v_0 за умови $y=H$ (рис.3) та $c_c \neq 0$ набуває виду:

$$v_0 = \frac{\gamma_{sat}}{\eta} \left[H(H-D) - \frac{(H-D)^2}{2} \right] (\sin \alpha - \cos \alpha \tan \phi_{sat}) - \frac{c_c}{\eta} (H-D) \quad (4)$$

На основі вищенаведеного можна зробити висновок, що кількісна характеристика зсуву спливання може бути представлена у визначенні потужності ґрунтової маси, що сповзає та у швидкості її руху.

Виклад основної інформації. Ділянка дослідження знаходиться в парку Вічної Слави на схилі, м. Київ.



Рис. 5. Ділянка дослідження / Fig. 5. Research area

Ділянка дослідження спочатку вивчалася згідно з технічним завданням та договором з

ТОВ «УКРГЛОБАЛБУД» з метою проведення інженерно-геологічних вишукувань під капіта-

льний ремонт сходів парку "Вічна Слава" у Печерському районі м. Києва. Завданням дослідження було, з'ясування геологічної будови, гідрогеологічних умов і фізико-механічних властивостей ґрунтів, які залягають на глибині до 16,0 м, та розрахунок стійкості схилу. Згідно з завданням замовника, виконано – буріння 3-х свердловин глибиною 10,0-16,0 м – 37,0 п.м.; відбір зразків порушеної будови – 16 зразків, проаналізовано матеріали попередніх досліджень ділянки.

На ділянці вишукувань були проведені інженерно-геологічні вишукування ТОВ «Центр Інженерні Вишукування» відповідно до нормативів [15,16]. На основі вишукувань визначені: інженерно-геологічні умови ділянки дослідження, побудовані розрізи та отримані фізико-механічні властивості ґрунтів.

Інженерно-геологічні умови ділянки вишукувань відноситься до III (складної) категорії, згідно з ДБН А.2.1-1:2008.

В геоморфологічному відношенні місце робіт знаходиться на правому березі р. Дніпро, в межах схилу Київського плато до долини ріки, ускладненого Панкратовим яром та техногенними формами рельєфу (підсіпка, підрізка ґрунтів схилу). Абсолютні відмітки поверхні коливаються в межах 191,15-167,59 м.

Геологічний розріз до розвіданої глибини 46,0 м (з урахуванням даних вишукувань попередніх років) складений:

- ґрунтово-рослинним шаром з корінням (ПЕ-1), подекуди - із щебенем, будівельним сміттям, потужністю 0,2-0,5 м;

- насипними ґрунтами - супісками пилюватими, твердими, з включеннями будівельного сміття (щебінь, уламки цегли, деревина) 10-20 %, подекуди - 30-40 %, злежаними (ПЕ-2д), потужністю 2,0-9,6 м;

- верхньоплейстоценовими-голоценовими делювіально-пролювіальними відкладами, представленими супісками пилюватими, твердими (ПЕ-23а), суглинками легкими пилюватими, твердими (ПЕ-24а) та пісками мілкими (ПЕ-27б), середньої щільності, малого ступеню водонасичення, загальною потужністю 1,2-12,8 м;

- верхньоплейстоценовими-голоценовими елювіальними, еолово-делювіальними супісками пилюватими, твердими, лесовидними, просідними (ПЕ-29а), потужністю 5,1 м та супісками пилюватими, пластичними, лесовидними (ПЕ-29б), потужністю 1,7 м;

- середньоплейстоценовими водно-льодовиковими, озерно-льодовиковими відкладами, представленими супісками піщанистими, пластичними (ПЕ-35б), суглинками легкими пилюватими з прошарками піщанистих, з включеннями

гравію та гальки до 15 %, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-36а), тугопластичними з прошарками м'якопластичних (ПЕ-36б), глинами легкими пилюватими, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-37а), пісками пилюватими, середньої щільності з прошарками щільних, насиченими водою (ПЕ-38б) та пісками середньої крупності, середньої щільності, насиченими водою (ПЕ-40б), загальною потужністю 12,0-15,1 м;

- неогеновими "бурими" глинами легкими пилюватими, напівтвердими з прошарками тугопластичних (ПЕ-47а), потужністю 1,1-1,9 м;

- неогеновими "строкатими" глинами легкими пилюватими, важкими, твердими та напівтвердими (ПЕ-48а), потужністю 10,1-16,5 м;

- неогеновими відкладами новопетрівської світи, представленими суглинками легкими піщанистими, твердими (ПЕ-49а), пісками мілкими, щільними, малого ступеню водонасичення (ПЕ-50в), загальною розкритою потужністю 1,3-16,1 м;

- палеогеновими відкладами межигірської світи, представленими пісками мілкими, щільними, малого ступеню водонасичення (ПЕ-57в), розкритою потужністю 1,4 м.

За даними вишукувань попередніх років, просідання лесової товщі (ПЕ-29а) при повному водонасиченні становить менше 5 см, початковий тиск просідання коливається в межах 22-349 кПа.

Ґрунтові води на період вишукувань (травень 2023 року) зустрінуті свердловиною №2 на глибині 9,5 м (абсолютна відмітка 168,39 м), свердловинами №№ 3а*, 18а*, пробуреними у 2017 році [21], на глибинах 6,3-13,2 м (абсолютні відмітки 172,55-176,95 м).

Водовміщуючими ґрунтами є водно-льодовикові та озерно-льодовикові відклади. Водотривом є товща «бурих» та «строкатих» глин. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів. Присутня також техногенна складова живлення.

Обмежене поширення ґрунтових вод на схилі обумовлено впливом дренажних штольневих систем.

Слід звернути увагу на наявність розущільнених зон в насипних ґрунтах в свердловині № 1, що свідчить про можливі процеси суфозійного виносу.

На ділянці вишукувань було визначено ймовірний розвиток зсувних процесів, він може проходити в межах схилу Панкратового Яру.

Також відповідно до технічного завдання було визначено коефіцієнт стійкості схилу K_{st} . Коефіцієнт стійкості схилу визначався за допо-

могою програмного комплексу Slide V.6.0 та спеціальної програми інституту Київпроект – для визначення зсувного тиску. Розрахунки проведені для двох можливих випадків: для природного і водонасиченого стану ґрунтів [21].

Результатом розрахунків було отримання площини ковзання з найменшим кількісним по-

казником стійкості – коефіцієнта стійкості, який визначається як співвідношення утримуючих і зсувних сил на схилі. Нормативний коефіцієнт стійкості 1.25. Отримані результати: для природного стану ґрунтів коефіцієнт стійкості $K_{st} = 1,558$; для водонасиченого стану ґрунтів $K_{st} = 1,072$ [21].

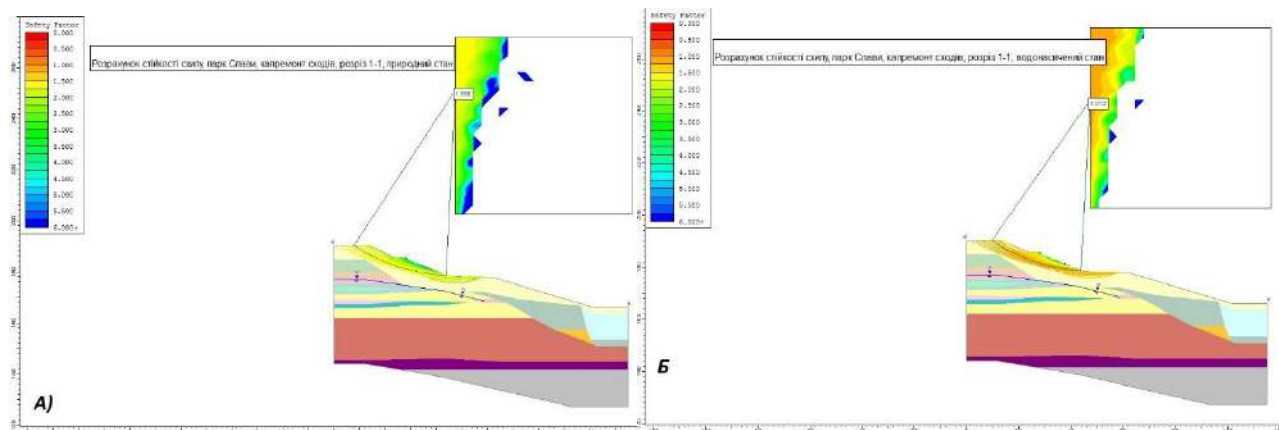


Рис. 6. Розрахункова схема для визначення коефіцієнту стійкості схилу

(А – природний стан, Б – водонасичений) /

Fig. 6. Calculation scheme for determining the slope stability coefficient (A–natural state, B–water saturated)

Результати розрахунку показують, що за природних умов даний схил перебуває у стійкому стані, але за умови його повного замочування він теоретично може піддатись зсуву. Проте, такий сценарій є малоімовірним тому, що верхня частина схилу складена дренуваними ґрунтами, які будуть досить гарно відводити воду, що не дозволить його повністю затопити.

При вивченні схилу були виявлені деформації сходів, які свідчать про можливе системне

водонасичення ґрунтів насипу, на якому прокладені сходи (див. рис. 5). На схилі водонасичення ґрунтів відбувається через системний полив рослин з метою збереження ландшафтного дизайну, та через атмосферні опади. Це дало підставу розглянути дані деформації, як можливий зсув спливання. Оскільки схил перебуває в стійкому стані, тіло зсуву не рухається, а в його верхній частині відбуваються незначні деформації в наслідок перезволоження.

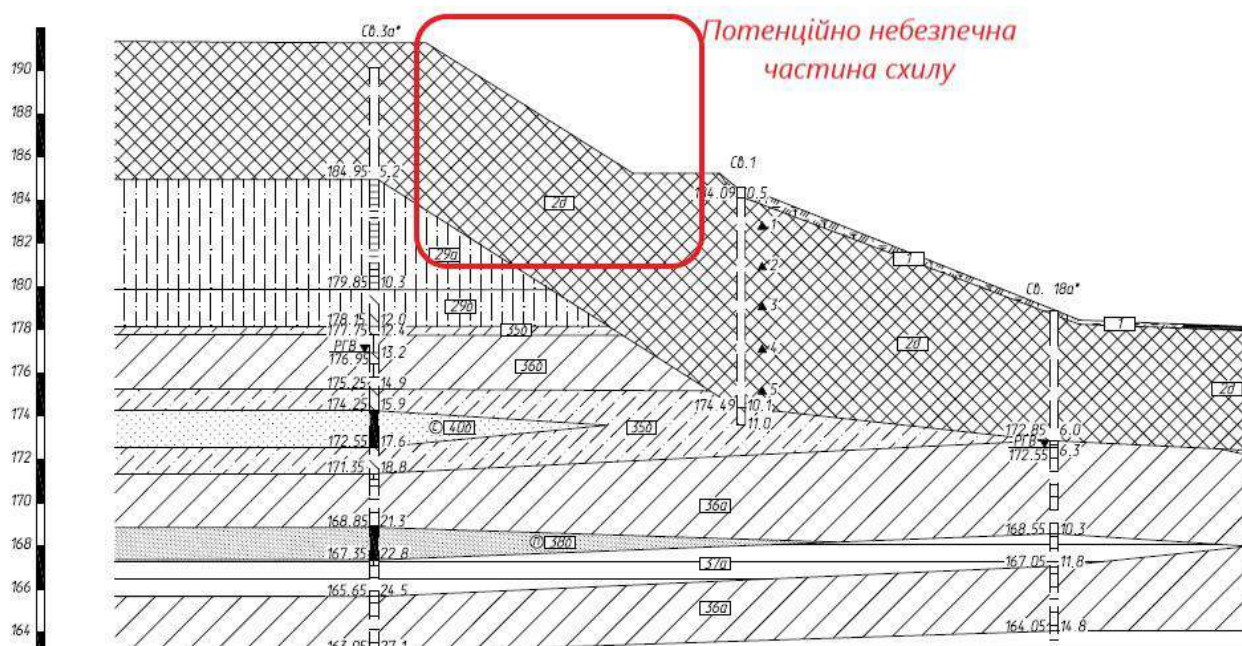


Рис. 7. Схематичний розріз схилу в парку Вічної Слави /

Fig. 7. Schematic section of the slope in the Park of Vichnoyi Slavy

На основі розрізу було обрано потенційну ділянку де можуть розвинутися зсуви спливання (реологічні процеси), це частина схилу між свердловинами 3а та 1. Ґрунтова маса, яка може піддатись цьому процесу – це інженерно-геологічний елемент 2д (рис. 7).

Для подальших розрахунків були взяті дані про фізико-механічні властивості ґрунтів (а саме ІґЕ 2д), які були отримані шляхом лабораторно-

го вимірювання в сертифікованій геотехнічній лабораторії ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань». Вимірювання ґрунтів відповідає ДСТУ Б В.2.1-17:2009, результати наведені в таблиці 1.

На розрізі було виділено розрахункову ділянку (рисунок 7), де найперше через перезволоження ґрунтової маси може виникнути такий тип зсуву. Необхідні розрахункові параметри були зняті з розрізу (рисунок 8) та занесені до таблиці 2.

Таблиця 1 / Table 1
Фізико-механічні параметри ІґЕ 2д / Physical and mechanical parameters of the design soil layer

Геологічний індекс		Найменування ґрунту	Стан	Вологість, W д.о.	Вологість на межі		Число пластичності I_p д.о.	Показник текучості I_L д.о.	Щільність			Коефіцієнт пористості, e д.о.	Ступінь водонасичення, S_r д.о.	Кут внутрішнього тертя, ϕ град.	Питоме зчеплення, C КПа	Модуль деформації, E МПа
тН	2д				Текучості, W_1 д.о.	Розкочування, W_p д.о.			Часток, ρ_s г/см ³	Природня, ρ г/см ³	Скелету, ρ_d г/см ³					
		насипний ґрунт	природній	0,16	0,21	0,16	0,05	0	2,66	1,75	1,51	0,762	0,56	17	9	10
		супісок пилуватий твердий	водонасичений	0,279				2,38		1,88	1,51	0,762	0,92	13	6	7

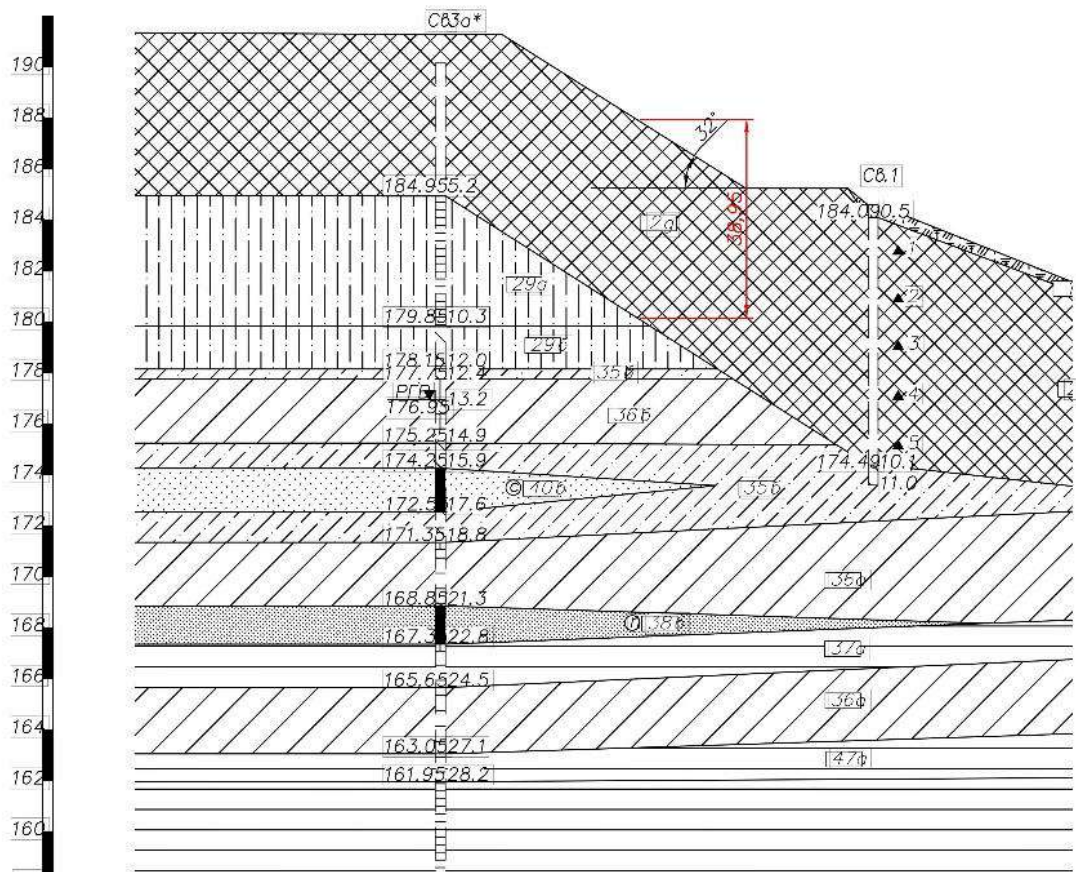


Рис. 8. Розрахункова частина схилу / Fig. 8. Design part of the slope

Таблиця 2 / Table 2

Вихідні параметри зсувонебезпечної ділянки схилу / Parameters of the landslide-prone slope area

Інженерно-геологічний елемент <i>ІГЕ</i>	Питома вага водонасиченого ґрунту, γ_{sat} , КН/м ³	Кут внутрішнього тертя водонасиченого ґрунту, ϕ_{sat} , град.	Питоме зчеплення, C_c , КПа	Кут схилу α , град.	Потужність розрахункового шару H , м	*Коефіцієнт в'язкості ґрунту η , кгс*с/см ²
2д	18,44	13	6	32	3,9	3*10 ⁴

*Під час вивчення реологічних процесів виявилось, що визначення коефіцієнту в'язкості ґрунту не передбачено жодним нормативним документом в галузі інженерної геології. Тому, в цій роботі було проаналізовано роботи українських вчених з даної тематики. Цей коефіцієнт залежить від характерної особливості пухких водонасичених ґрунтів, а саме через їхню здатність переходити в розріджений стан. Явище розрідження водонасичених ґрунтів – це повна втрата несучої здатності ґрунту та перехід його зі стану твердого тіла в плинний стан. При розрідженні ґрунт веде себе як густа в'язка рідина, яку можна представити у вигляді структурованої суспензії, тобто води з завислими в ній частинками ґрунту. До такого стану насичений водою ґрунт при крутінні доходять тільки в межах зони зсуву, яка має невелику товщину. Для визначення реологічних властивостей структурованих суспензій можна використати модель в'язкопластичного середовища. В ґрунтах залежність між напруженням τ і градієнтом швидкості течії dV/dx – нелінійна, а течія виникає при величині напруження $\tau \geq \tau_0$. При $\tau < \tau_0$ ґрунт веде себе як тверде тіло з незначною величиною деформації, яку можна розглядати як явище повзучості. Це значить, що τ_0 не є статичним, а є динамічною межею напруження зсуву [17]. Так, на основі робіт А.І. Білеуша та інших було, отримано в геотехнічній лабораторії ТОВ «Центр Інженерних Вишукувань» коефіцієнт в'язкості ґрунту η [17, 19]. Питанню вивчення і визначення даного коефіцієнту в інженерній геології необхідно приділити значну увагу.

За умови значного перезволоження верхньої частини схилу та з отриманих даних за наведеною вище методикою була змодельована ймовірність розвитку реологічного процесу на схилі в парку Вічної Слави у м. Київ. Верхня частину схилу складена насипним супіском, пілуватим, твердим (ІГЕ 2д). Потужність даного ІГЕ коливається в межах 3,0 – 5,2 м, з кутами нахилу поверхні α на схилі від 0 град. у підніжжі та 32 град. у верхів'ї. Саме для верхів'я схилу де найбільший кут нахилу поверхні (що спричиняє виникненню найбільшої дотичної напруги τ_y) і була досліджена ймовірність виникнення такого типу зсуву. Так, за кількісним вираженням вста-

новлена глибина захвату ґрунтової товщі D та визначена швидкість руху сповзаючої маси v_0 :

$$D = \frac{1}{\gamma_{sat} \sin \alpha - \cos \alpha \cdot tg \phi_{sat}} C_c = 1,08 \text{ м}$$

$$v_0 = \frac{\gamma_{sat}}{\eta} \left[H(H - D) - \frac{(H - D)^2}{2} \right] (\sin \alpha - \cos \alpha tg \phi_{sat}) - \frac{C_c}{\eta} (H - D) = 0,75 \text{ м/доб.}$$

Висновки. На основі інженерно-геологічних вишукувань проведених ТОВ «Центр Інженерні Вишукування» в парку Вічної Слави, встановлено: ділянка вишукувань відноситься до III (складної) категорії згідно з ДБН А.2.1-1:2008, саме через наявність схилу та можливості розвитку зсувних процесів. Через це було визначено коефіцієнт стійкості даного схилу (нормативний $K_{st}=1,25$):

- для природного стану ґрунтів коефіцієнт стійкості $K_{st}=1,558$;
- для водонасиченого стану ґрунтів $K_{st}=1,072$.

Можливість повного водонасиченого стану схилу існує більшою мірою теоретично. Відповідно $K_{st}=1,072$ це теоретичне обґрунтування.

Отримані результати вказують на стійкий стан схилу, проте під час обстеження було виявлено незначні деформації сходів через перезволоження ґрунтів. Ці деформації було розглянуто, як зсуви спливання. На основі цієї інформації і було проведено наукове дослідження можливості розвитку реологічних процесів.

Відповідно до теорії реологічних процесів на схилах, було проаналізовано модель Бінгама-Шведова та методику кількісної оцінки Маслова. Отримані результати вказують на можливий процес виникнення зсуву спливання де глибина захвату ґрунтової маси $D = 1,08$ м та швидкість її руху $v_0=0,75$ м/доб.

Результати дослідження вказують на те, що реологічні процеси на схилах мають високу вірогідність утворення. При вивченні схилів, а особливо зсувонебезпечних ділянок необхідно обов'язково досліджувати можливість виникнення зсувів спливання. Також, під час проведення дослідження такого роду процесів, виявлено що необхідно визначати та вводити в нормативні документи такий кількісний критерій ґрунту коефіцієнт в'язкості η .

Список використаної літератури

1. Christensen R. W., Kim J. S. Rheological model studies in clay. *Clays and Clay Minerals*. 1969. Vol. 17. P. 83–93.
2. Cristescu C. *Materials with Rheological Properties: Calculation of Structures*. Wiley, 2008. 288 p.
3. Filipovych V., Lischenko L., Marhes S. Methodology for assessing and forecasting the landslide hazard of the territory of the Dnieper landslide zone in the city of Kyiv based on satellite data. 4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007>.
4. Ghezzehei T. A., Or D. Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*. 2001. Vol. 65, no. 3. P. 624–637.
5. Komamura F., Huang R. J. New rheological model for soil behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1974. Vol. 100, no. 7. P. 807–824.
6. Leschke R. *Rheology in Process Engineering. Dough Rheology and Baked Product Texture*. Boston, MA, 1990. P. 473–495. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0861-4_12.
7. Maslov N.N. *Soil mechanics in construction practice*. M.: Stroyizdat, 1977. – P. 320.
8. Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides / S. R. Carrière et al. *Landslides*. 2018. Vol. 15. P. 1615–1630.
9. Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria / K. Onyelowe et al. *Materials Science for Energy Technologies*. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 8–14.
10. Sheremeta R. REVIEW OF REOLOGICAL MODELS. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*. 2018. No. 22. P. 22–30. URL: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.022>.
11. Zhu G., Zhu L., Yu C. Rheological properties of soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 64, no. 1. P. 12011–12011. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>.
12. Zolotarev H.S. *Engineering Geodynamics*. M.: Yzdatelstvo MHU, 1983. – P. 328.
13. Ботанічний сад у Києві під замком через небезпеку. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/966312.html>.
14. Гідрогеологічні особливості розрахунків стійкості укосів і схилів у межах урбанізованих території / О. Кошляков та ін. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2018. Т. 4, № 83. С. 79–83. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.11>.
15. ДБН А.2.1-1-2008. Інженерні вишукування для будівництва. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008.
16. ДБН В.1.1-46:2017 Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017.
17. Дослідження в'язкості ґрунтів на прикладі крутиння / А. І. Білеуш та ін. *Прикладна гідромеханіка*. 2014.
18. Зсуви ґрунтів в м. Києві. URL: <https://kpsuppr.kyivcity.gov.ua/files/2023/5/26/perelikzsuviyvKyiv.pdf>.
19. Івницький І.І., Мікульонюк І.О. *Реологія: Практикум*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. Т. 35.
20. *Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти* / Зоценко М.І. та ін. *Полтава : ПНТУ*, 2003. Т. 446.
21. Лисенко О.М. Капітальний ремонт сходів парку "Вічна Слава" у Печерському районі м. Києва. *Коригування*. Київ : ТОВ "Центр Інж. Вишукувань", 2023. Т. 39.
22. Парфентьєва І.О., Верешко О.В., Гусачук Д.А. *Основи та фундаменти*. Луцьк : ЛНТУ, 2017. С. 296.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Rheological processes in the slope massifs of the city of Kyiv

Reva Maksym¹

PhD (Geology), Associate Professor of Institute of Geology,
¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Lysenko Oleksandr²

Director ² LLC «Inzhenerni vyshukuvannya», Kyiv, Ukraine;

Chomko Dmytro¹

PhD (Geology), Associate Professor,
Head of the Department Hydrogeology and Engineering Geology

ABSTRACT

Formulation of the problem. The paper examines landslide processes that occurred on the right bank of the city of Kyiv. The authors demonstrate the general statistics of the development of landslides in the city, which is a dangerous phenomenon for the safety of the city. In Kyiv, 42 landslides have been recorded, which are in the active phase. The authors identify the main reasons for the development of landslides as engineering-geological, geomorphological conditions, climate and anthropogenic impact. The article examines the use of GIS technologies as a modern and quite effective method of monitoring landslide processes. The authors focus attention on two landslides that occurred and differ from the rest due to the atypical mechanics of the process, which was affected by the overwetting of the soil mass. It was this difference that led to this scientific research. This theoretical study was conducted on a site in the Park of Vichnoyi Slavy, since by all indicators this slope has the potential for the development of just such a landslide. Over-moistened soil mass has a special mechanics of movement on the slope and is classified as – a landslide flows.

Purpose. The article examines this movement of the overmoistened soil mass on the slope as a rheological process.

Methodic. The authors analyzed the theoretical foundations of soil mass behavior in such conditions, they consider it as a rheological model. The solution to the problem is based on the classical Bingham-Shvedov, Newton, and Maxwell models. The methodology for solving such tasks is given in the study. The authors investigated the necessary parameters of the soil, which are used in the construction of the calculation model. The article highlights the coefficient viscosity of soil, this coefficient deserves special attention when considering rheological processes in the soil. The considered solution model of the rheological process cannot be solved without the coefficient viscosity of soil. Using the scientific work of Ukrainian scientists, the authors determined this coefficient in the laboratory.

The main material. The article investigates the possibility of a landslide occurring on one of the cultural objects in order to preserve the latter. The authors built their research on the basis of engineering investigations, which were carried out for the purpose of reconstructing the stairs in the Vichnoyi Slavy Park in Kyiv. The surveys show an engineering-geological section of the slope, which consists of 14 soil layers. The researchers established that under natural conditions this slope is in a stable state $K_{st}=1.56$. The studies have shown that at this site, with excessive moistening of the upper soil layer, a rheological process may occur. This process can develop in bulk soils (dusty sandy loam) due to its large angles of inclination and rather weak physical and mechanical properties. The article analyzes the possibility of the occurrence of rheological processes on the slopes and their role in the safety and life of the city of Kyiv.

Conclusions. The calculated model is solved and shows the capture depth $D=1,08$ m and speed $V_0=0,75$ m/day of movement of a potential landslide in case of overwetting of the soil on the slope in the Vichnoyi Slavy Park in the city of Kyiv.

Keywords: rheological processes, landslides, landslide flows, the coefficient viscosity of soil, slope stability, engineering geological layer.

References

1. Christensen, R. W., & Kim, J. S. (1969). Rheological model studies in clay. *Clays and Clay Minerals*, 17, 83–93.
2. Cristescu, C. (2010). *Materials with Rheological Properties: Calculation of Structures*. Wiley & Sons, Incorporated, John.
3. Filipovych, V., Lischenko, L., & Marhes, S. (2023). Methodology for assessing and forecasting the landslide hazard of the territory of the Dnieper landslide zone in the city of Kyiv based on satellite data. 4th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, Landslide 2023. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007>
4. Ghezzehei, T. A., & Or, D. (2001). Rheological properties of wet soils and clays under steady and oscillatory stresses. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 624–637.
5. Komamura, F., & Huang, R. J. (1974). New rheological model for soil behavior. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(7), 807–824.
6. Leschke, R. (1990). Rheology in Process Engineering. In J. M. Faridi Hamed and Faubion (Ed.), *Dough Rheology and Baked Product Texture* (pp. 473–495). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0861-4_12
7. N.N. Maslov. (1977). *Mechanics of chrunts in construction practice* (Vol. 320). Stroyizdat.
8. Carrière, S. R., Jongmans, D., Chambon, G., Bièvre, G., Lanson, B., Bertello, L., Berti, M., Jaboyedoff, M., Malet, J.-P., & Chambers, J. E. (2018). Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides. *Landslides*, 15, 1615–1630.
9. Onyelowe, K., Van, D. B., Igboayaka, C., Orji, F., & Ugwuanyi, H. (2019). Rheology of mechanical properties of soft soil and stabilization protocols in the developing countries-Nigeria. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(1), 8–14.
10. Sheremeta, R. (2018). Review of reological models. *Bulletin of Lviv National Agrarian University. Agroengineering Research*, 22, 22–30. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2018.01.022>
11. Zhu, G., Zhu, L., & Yu, C. (2017). Rheological properties of soil: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64(1), 12011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/64/1/012011>
12. Zolotarev H.S. (1983). *Engineering neodynamics*, 328. MSU Press.
13. Botanical garden in Kiev under the castle through the sky. (n.d.). Retrieved May 24, 2024, from <https://www.radiosvoboda.org/a/966312.html/> [in Ukrainian]
14. Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I., & Koshliakova, T. (2023). Hydrogelological peculiarities of calculation of scarps and slopes stability within urbanized territories. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83), 79-83. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.11> [in Ukrainian]
15. State Building Standards A.2.1-1-2008. *Engineering research for construction*. (2008). Minrehionbud Ukrainy.
16. State Building Standards V.1.1-46:2017 *Engineering protection of the territory, buildings and structures in the form of sliding and collapsing. Basic positions* (2017). Minrehionbud Ukrainy. [in Ukrainian]
17. Bileush, A. I., Fridrikhson, V. L., Kryvonoh, O. I., & Kryvonoh, V. V. (2014). Botanical garden in Kiev under the castle through the sky. *Applied Hydromechanics*. [in Ukrainian]
18. Landslides in Kyiv (b. d.). <https://kpsuppr.kyivcity.gov.ua/files/2023/5/26/perelikzuvivKyiv.pdf>. [in Ukrainian]
19. Ivitskiy I.I., & Mikulonok I.O. (2019). *Reolohiia: Praktykum*, 35. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". [in Ukrainian]
20. Zotsenko M. L., Kovalenko V. I., Yakovliev A. V., Petrakov O. O., Shvets V. B., Shkola O. V., Bida S. V., & Vynnykov Yu.L. (2003). *Engineering geology. Soil mechanics, foundations and foundations*, 446. PNTU. [in Ukrainian]
21. Lysenko O.M. (2023). Major renovation of the Vichna Slava park in the Pechersk district of Kyiv, 39. LLC «Inzhenerni vyshukuvannya». [in Ukrainian]
22. Parfentieva I. O., Vereshko O. V., & Husachuk D. A. (2017). *Soil bases and foundations*, 296. LNTU. [in Ukrainian]

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 28 July 2024

Accepted 28 October 2024

Палеогеографічні умови формування пізньоеоценових відкладів Житомирського Полісся у зв'язку з їх бурштиноносністю (на прикладі ділянки «Правобережна»)

Тетяна Шевченко¹

к. геол. н., ст. наук. співробітник,

¹ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,

e-mail: shetv2@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7522-9684>;

Сергій Мамчур²

аспірант, геологічний факультет,

² Львівський національний університет ім. Івана Франка, Львів, Україна,

e-mail: mamchursv88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5828-6924>;

Ярослав Курепа³

к. геол. н., геолог, ³ ТОВ «ДРІВ ГЕО», Рівне, Україна,

e-mail: ser_lukas@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4532-7878>;

Андрій Матвєєв⁴

д. геол. н., доцент,

⁴ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: matveev@karazin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2600-6529>

Актуальність роботи обумовлена необхідністю створення достовірної історії формування фізико-географічної обстановки палеогенового періоду на території Житомирського Полісся для розшифровки процесів бурштинонакопичення. У відповідності до мінералогічного районування територія бурштиноносною ділянкою «Правобережна» розташована в межах Пержанського бурштиноносного району. Останній знаходиться в межах Волино-Подільського плутонічного поясу і відокремлений від суміжних районів Глинненською і Суцано-Пержанською тектонічними зонами. Основною відмінністю між Клесівсько-Рокитнянською, Словечансько-Овруцькою і Барашівсько-Пержанською бурштиноносними зонами є різний вік бурштиновміщуючих порід. Проведений комплексний літолого-мікропалеонтологічний аналіз бурштиноносних відкладів ділянки «Правобережна» Пержанського бурштиноносного району Житомирського Полісся. За диноцитами проведена переінтерпретація віку вміщуючих порід, вперше для даної території доведена приуроченість покладів бурштину до пізньоеоценового інтервалу. Обухівські відклади, що виокремлені з палеогенової послідовності, характеризує комплекс диноцист з *Rhombodinium perforatum*, *Thalassiphora reticulata*, *Charlesdownia clathrata angulosa*, *Glaphyrocysta semitecta* та ін. зони DP11 приабону біозональної схеми А.С. Андрєєвої-Григорович (1991). Проведено вивчення гранулометричного та речовинного складу обухівських відкладів. Наведена схема-модель зміни залягання відкладів обухівського регіоярису у відповідності до еволюції давніх тектонічних долин. Представлено нові дані щодо обухівської морської палинологічної асоціації в межах ділянки «Правобережна», що є внеском у малодосліджену область морських середовищ пізнього еоцену Північної України. Палинобіота включає представників *Dinoflagellata*, *Prasynophyta*, *Ascritarcha*, пилку та спор наземних рослин, а також прозорі та непрозорі фітокласти, палиноморфи грибів, «палинофорамініфери», сколекоднти. Аналіз палинофацій показує, що осадки, які містять поклади бурштину в межах ділянки «Правобережна», сформовані мілководним теплим морем з високою гідродинамікою при високому впливі річкових систем. З'ясовано, що найбільші скупчення бурштину вірогідно пов'язані з фаціями палеодельт.

Ключові слова: органікостінний мікропланктон, відклади обухівського регіоярису, приабонський ярус, стратиграфія, палеогеографія, Пержанський бурштиноносний район, Північна Україна.

Як цитувати: Шевченко Тетяна. Палеогеографічні умови формування пізньоеоценових відкладів Житомирського Полісся у зв'язку з їх бурштиноносністю (на прикладі ділянки «Правобережна») / Тетяна Шевченко, Сергій Мамчур, Ярослав Курепа, Андрій Матвєєв // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 108-120. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-08>

In cites: Shevchenko Tetiana, Mamchur Serhii, Kurepa Yaroslav, Matveyev Andriy (2024). The Paleogeographic Conditions for the Late Eocene sediments of Zhytomyr Polissya in connection with their amber content (on the example of the «Pravoberezhna» site). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 108-120. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-08> [in Ukrainian]

Вступ. Встановлення віку та стратиграфічного положення покладів бурштину Правобережної ділянки Пержанського бурштиноносного району має важливе прикладне значення для обґрунтування просторових закономірностей і масштабів накопичення промислових покладів бурштину в межах центральної (Житомирської) частини Прип'ятського бурштиноносного басейну (рис. 1).

Район Житомирського Полісся в приабонський час еоцену (37,71-33,9 млн років тому) належав системі морів і проток північного Пері-Тетису (рис. 2). Морські осадові відклади, що розвинені на досліджуваній території, являють собою унікальний архів даних про гідрологію, ландшафти та клімат пізнього еоцену як на локальному, так і на регіональному, і навіть глобаль-

ному, рівнях. Вони представлені безкарбонатними піщано-глинистими породами, в яких відсутні вапниста макро- і мікрофауна. Тим не менш вони багаті на органікостінні мікрофосилії (органікостінний мікропланктон та палиноморфи наземних рослин), на яких власне базується їх біостратиграфічне розчленування та кореляція.

Слід зауважити, що до проведення перших планомірних геологічних робіт з пошуків розсіпних родовищ бурштину в північній частині Українського щита вважалося, що палеогенові відклади тут відсутні. Приймалося, що ні північні, ні східні палеогенові моря сюди не досягали (див. рис. 2), тому в літературі до 1950-х рр. для цієї території описувалися лише четвертинні і кристалічні породи. Морські палеогенові відклади стали відомі тут після геологічного знімання 1952 р. Біля н.п. Олевськ, Замисловичі, Рудня-Замисловицька, Перга, Юрове свердловинами були виявлені розрізнені останці окремених пісковиків з відбитками і ядрами фауни молюсків і нумулів (рис. 1), які були віднесені до київської світи верхнього еоцену [8, 9] за тогочасним стратиграфічним поділом. Окрім пісковиків, бурінням в Олевському районі були виявлені і інші різновиди палеогенових відкладів: піски зеленувато-сірі, глауконітові, дрібнозернисті, глинисті, слюдисті, безкарбонатні, в нижній частині з галькою кристалічних порід, без макрофауни. За літологічною подібністю до олігоценівих відкладів Прип'ятської і Дніпровсько-Донецької западин дослідниками вони відносились до харківської [8], пізніше до межигірської світи [13, 14]. Саме вони були стали об'єктом наших досліджень.

Метою проведеного дослідження є аналіз палеогеографічної обстановки осадконакопичення Пержанського бурштиноносного району на прикладі ділянки «Правобережна» в приабонсько-обухівський час на основі вивчення паліофацій та гранулометричного складу відкладів обухівського регіорусу для уточнення та деталізації уявлень про розподіл та оконтурювання в них родовищ бурштину.

Аналіз попередніх публікацій. Перше цілеспрямоване вивчення бурштиноносності району і властивостей бурштину розпочато ще позаминулого століття (1890-1910 рр.) і пов'язане з ім'ям видатного українського геолога П.А. Тутковського, результати якого були викладені ним в монографіях «Янтарь Волынской губернии» (1911 р.) і «Украинский янтарь» (1918 р.).

Уявлення про стратифікацію відкладів Прип'ятського бурштиноносного басейну в межах України на окремі підрозділи змінювалися із накопиченням знань, що спиралися на результати пошуків промислових покладів бурштину та

загального геологічного вивчення цієї території (геологічні звіти; палінологічні дослідження проводилися на інших ділянках Т.Ф. Губкиною, Р.Н. Ротман, О.Б. Стотландом). Здійснювалися спроби просторового районування покладів бурштину за площею, де в якості критеріїв районування використовувалися структурно-тектонічні, стратиграфічні та палеогеографічні умови формування розсіпів бурштину [2, 5, 10-12, 16, 17 та ін.].

Вперше Пержанський бурштиноносний район виділений у складі Клесівсько-Пержанської зони в праці М.В. Криницької та В.М. Шпирки [5] на основі знахідок бурштину по р. Уборть та під час геологорозвідувальних робіт на алмази (1980 р.), бурштин (1994 р.) та молібден (1996–2004 рр.). Характеристика та особливості району авторами не наводилися.

У відповідності до мінералогічного районування [5, 12] територія бурштиноносної ділянки «Правобережна» розташована в межах Пержанського бурштиноносного району. Останній знаходиться в межах Волино-Подільського плутонічного поясу і відокремлений від суміжних районів Глинненською і Суцано-Пержанською тектонічними зонами.

Основною відмінністю між Клесівсько-Рокитнянською, Словечансько-Овруцькою і Барашівсько-Пержанською бурштиноносними зонами є різний вік бурштиновміщуючих порід. Розсіпи бурштину в Клесівсько-Рокитнянській та Словечансько-Овруцькій бурштиноносних зонах пов'язані з відкладами олігоцену [2, 5, 11, 12, 17], а в Барашівсько-Пержанській зоні – з відкладами верхнього еоцену (за даними Т.В. Шевченко, коротке повідомлення в роботі [7]).

Матеріал та методи. Матеріал, на якому ґрунтується стаття, зібраний авторами під час проведення геолого-розвідувальних робіт бурштиноносної площі «Правобережна» Пержанського бурштиноносного району (див. рис. 1) товариством «ДРІВ ГЕО» в 2019–2024 рр. (С. Мамчур, Я. Курепа, А. Матвеев) із залученнями наукового супроводу щодо біостратиграфічного розчленування та палеогеографічних реконструкцій Інституту геологічних наук НАН України (Т.В. Шевченко).

Палінологічний аналіз виконаний для понад 100 зразків з піщано-глинистих порід 38-ми гірських виробок ділянки дозволив виокремити з розрізів відклади верхнього еоцену. Зразки оброблялись у мікропалеонтологічній лабораторії Інституту геологічних наук НАН України за методикою із залученням пірофосфату натрію ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$), концентрованої (40%) фтористо-водневої кислоти (HF) та просіюванням крізь 15-мік-

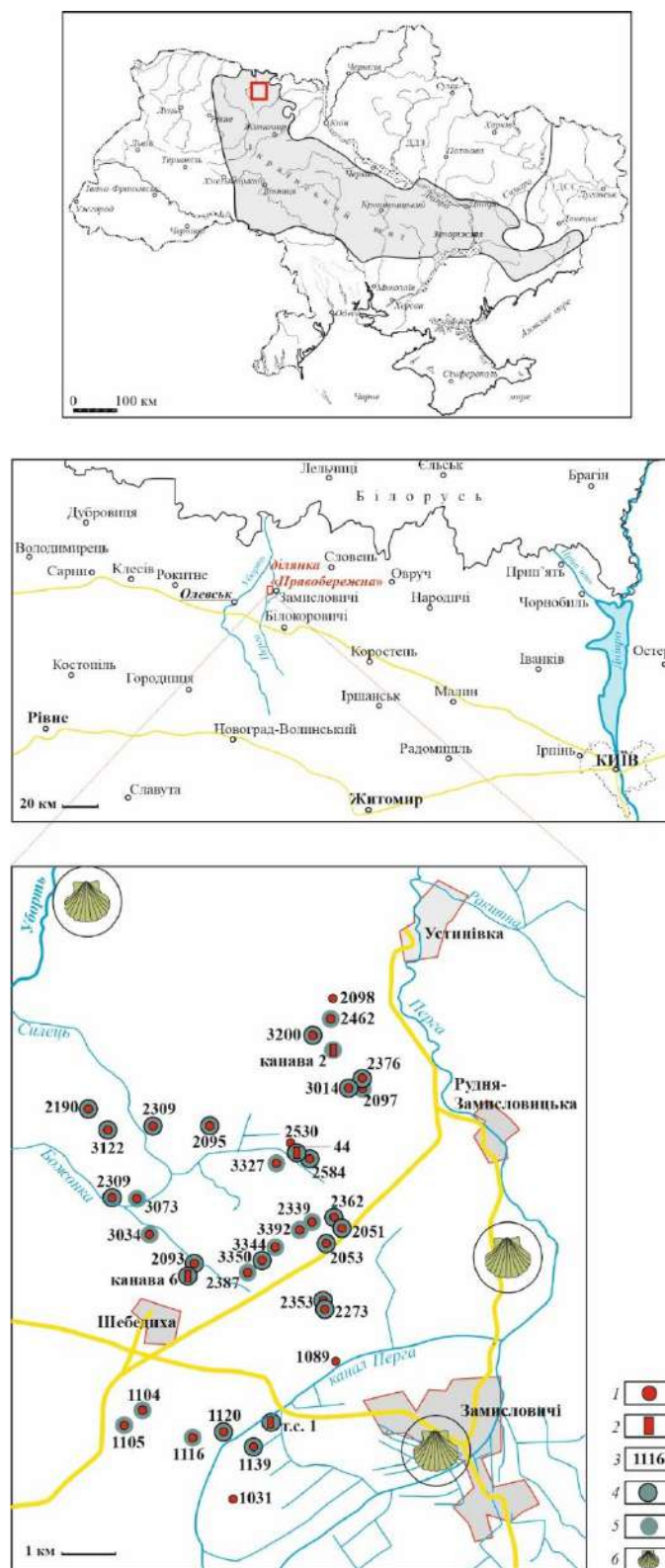


Рис. 1. Карта фактичного матеріалу: 1 – свердловини; 2 – пошукові канали; 3 – номери гірничих виробок; 4 – пункти, в яких виявлені відклади обухівського регіоярису (з присутністю зональних видів приабону *Rhombodinium perforatum*+*Thalassiphora reticulata*); 5 – пункти, в яких виявлені відклади обухівського регіоярису (без зональних видів приабону *Rhombodinium perforatum*+*Thalassiphora reticulata*); 6 – пункти поширення пісковиків з молюсками і нумулітами за роботою Д.Є. Макаренка [9] / Fig. 1. Map of the actual material: 1 – boreholes; 2 – prospecting trenches; 3 – mine workings numbers; 4 – sites where sediments of the Obukhivian regional stage were found (with the presence of the zonal species of the *Rhombodinium perforatum* + *Thalassiphora reticulata*); 5 – sites where sediments of the Obukhivian regional stage were found (without the zonal species of the *Rhombodinium perforatum* + *Thalassiphora reticulata*); 6 – sites of sandstones with mollusks and numulites according to D. E. Makarenko [9]

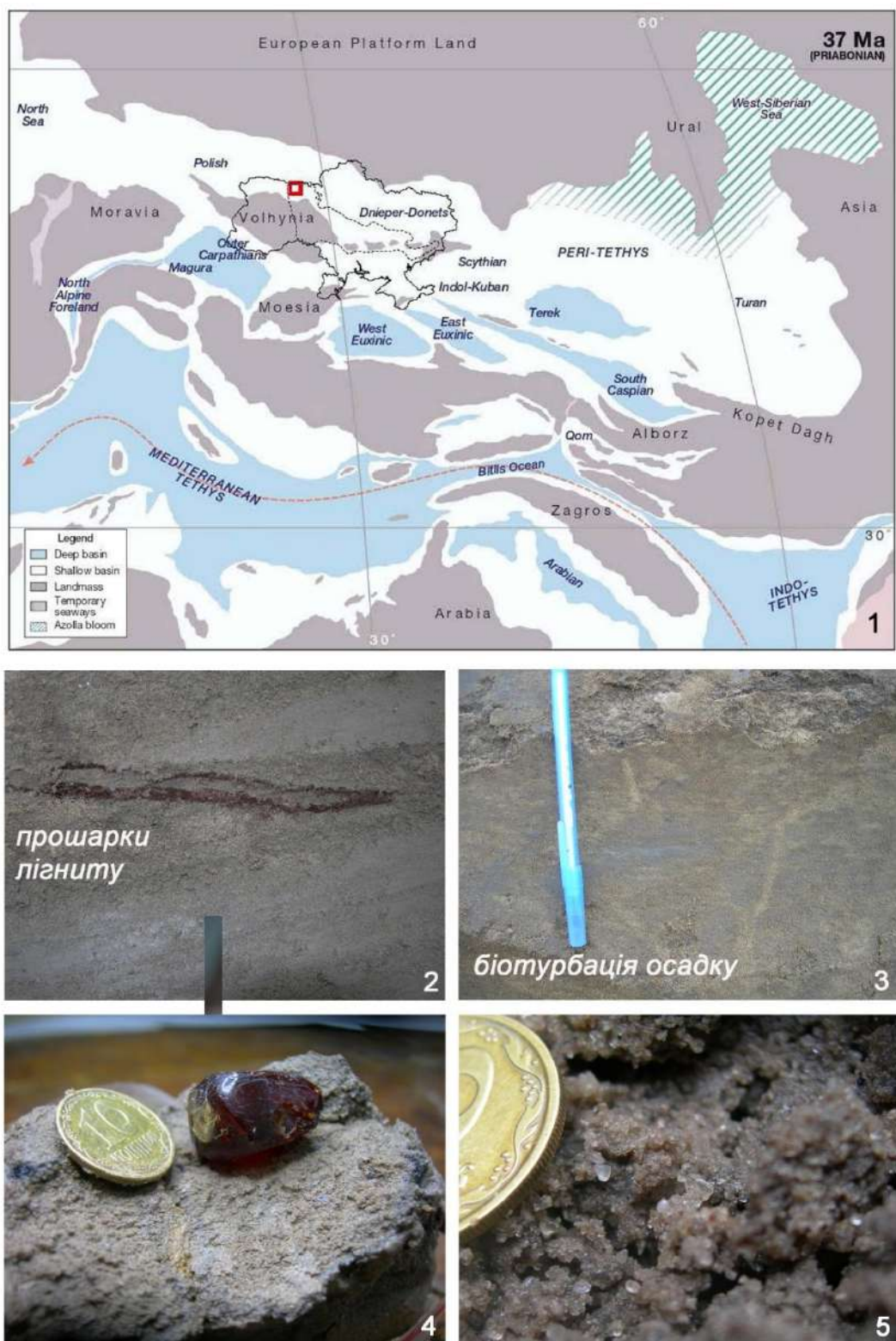


Рис. 2. Палеогеографія Євразії приабонського часу (37 млн років тому) за роботою [20] та осади обухівського-приабонського моря, що збереглися в Північній Україні в межах ділянки «Правобережна»: 1 – положення вивченої території (червоний квадрат) в системі морів і проток Пері-Тетіса за роботою [20]; 2 – піски алевритисті, глауконіт-кварцові, коричнево-сіро-зелені з лінзами лігнітизованого рослинного детриту (середня частина обухівських відкладів, гірнича виробка 44); 3 – піски середньої частини інтенсивно біотурбовані (гірничка виробка 44); 4 – піски кварцові з темноколірним мінералом коричнево-сірі, переважно середньо-дрібнозернисті середньої частини обухівських відкладів (св. 2339, інтервал 5,0-5,4 м); 5 – піски кварцові з поодинокими зернами глауконіту, бежево-сірі, середньо-крупнозернисті, нижньої частини обухівських відкладів (св. 2397, інтервал 6,7-7,0 м). Для фігур 4 та 5 масштабна лінійка – монета 10 коп. (діаметр – 16,6 мм, товщина – 1,25 мм) /

Fig. 2. Paleogeography of Eurasia of the Priabonian time (37 Ma) by the article [20] and, also, sediments of the Obukhivian-Priabonian Sea that were preserved in Northern Ukraine within the Pravoberezhna area: 1 – position of the studied area (red square) in the system of seas and straits of the Peri-Tethys according to the article [20]; 2 – siltstone sands, glauconite-quartz, brownish-gray-green, with lenses of lignified plant detritus (middle part of the Obukhiv sediments, mine workings 44); 3 – sands of the middle part that are intensively bioturbated (mine workings 44); 4 – quartz sands with dark-colored brownish-gray mineral, mostly medium-fine-grained in the middle part of the Obukhiv sediments (bh. 2339, interval 5.0-5.4 m); 5 – quartz sands with single grains of glauconite, beige-gray, medium-coarse-grained, of the lower part of the Obukhiv sediments (bh. 2397, interval 6.7-7.0 m).

The scale bar (for Figures 4 and 5) is a 10 kopecks coin (diameter - 16.6 mm, thickness - 1.25 mm)

ронне сито. Збереженість вилучених паліноморф (диноцисти, акритархи, зелені водорості, «палінофорамініфери», пилок наземних рослин, рослинний дебрис (уламки)) є гарною; отримані мацерати у більшості кількісно та якісно багаті. Вивчення мікрофосилій проводилось в тимчасових препаратах у водному середовищі за допомогою мікроскопів PZO-Warszawa та Leica при збільшенні $\times 200$ – $\times 800$, фотографування – фотокамери Nikon Coolpix 7900 та Leica Flexacam i5. Номенклатура диноцист згідно з DINOFLAJ3 (2017), для Wetzeliellaceae відповідно до DINOFLAJ2 (2008).

Для діагностування фізико-географічних умов осадконакопичення, яке супроводжувало накопичення покладів бурштину, були виділені певні екогрупи мікроорганізмів за способом існування і факторами середовища (температура поверхневих вод, солоність, границя моря/суша, гідродинаміка тощо). Класифікація палінофаціальних компонентів – за роботами [18, 19]. Колекція палінологічних препаратів з ділянки «Правобережна» зберігається у відділі стратиграфії та палеонтології кайнозойських відкладів ІГН НАН України (м. Київ).

Результати та обговорення. У геологічній будові ділянки «Правобережна» за нашими даними беруть участь протерозойські кристалічні утворення і товща осадових відкладів. У складі останньої присутні відклади палеогенової, неогенової та четвертинної систем. Розчленування палеогенових товщ виконувалося за стратиграфічною схемою В.Ю. Зосимовича та Т.В. Шевченко для Північної України [3, 4].

Зауважимо, що відклади палеогенової системи в межах ділянки, як і в цілому в межах Українського щита, від розмивів збереглися в його тектонічних пониженнях. Найдавнішим з палеогенових морів, яке по цим пониженням заходило на територію ділянки, є канівсько-іпрське. Його відклади діагностовані нами тільки в одному розрізі ділянки (св. 2053, інтервал 11,1-12,8 м, комплекс з *Apectodinium* (асме), *Deflandrea oebfeldensis*) і представлені лагунно-дельтовими алевритами. За диноцистами вони фіксують глобальну гіпертермальну подію раннього еоцену (подія PETM) [15].

Наступним морським ритмом в межах ділян-

ки був київсько-бартонський. Відклади київського часу, які збереглися в межах ділянки «Правобережна», також мають обмежене поширення, і теж пов'язані з найбільш давніми опущеними ділянками кристалічного фундаменту. Вони закартовані нами у південній та центральній частинах ділянки. Їх потужність змінюється від 0,1 до 2,9 м, залягають на глибинах від 4,6 до 11,8 м. Накопичення відкладів київсько-бартонського часу відбувалося у підводних неглибоких видовжених долинах, що характеризувалися крутими ерозійними схилами. Представлені вони мілководно-прибережними фаціями (піски). Цей ритм визначає комплекс органікостінного мікропланктону з *Rhombodinium porosum* [15].

Натомість утворення *обухівського часу* поширені по всій території робіт, окрім північно-західного кута ділянки «Правобережна» (рис. 1). Пов'язані вони також з пониженнями у кристалічному фундаменті, сформованими в місцях виходу на поверхню розривних порушень різного рангу та часу активізації. Обухівські відклади виповнюють схили та ложа бортів давніх понижень з тривалою еволюцією. Приклади залягання обухівських відкладів представлено на рис. 3. В обухівський час суттєвих змін в палеогеографічній обстановці в межах ділянки не спостерігається, конфігурація обухівського басейну, а також умови осадконакопичення в загальних рисах були успадковані від попереднього київського басейну. У складі мікробіоти змінилися тільки керівні види: з'явилися нові види органікостінного мікропланктону, що визначають басейн як обухівсько-приабонський.

Бурштиновмісними на ділянці дослідження є саме відклади обухівського регіоярису/часу. Вони залягають на глибинах від 1,0 до 10,8 м, утворюючи невитриману товщу потужністю від 0,2 до 5,6 м. Кварц-глауконітові піски та піщанисті алеврити, що вміщують бурштин, тут часто змінюють один одного, перемежаються і лінзуються, мають взаємні переходи з глибиною та по простяганню товщ. Ця неоднорідність розрізу обумовлена розчленованістю рельєфу дообухівської поверхні та активізацією тектонічних рухів різної направленості. Обухівські відклади виокремлені з осадової послідовності за присутністю комплексу керівних та характерних видів

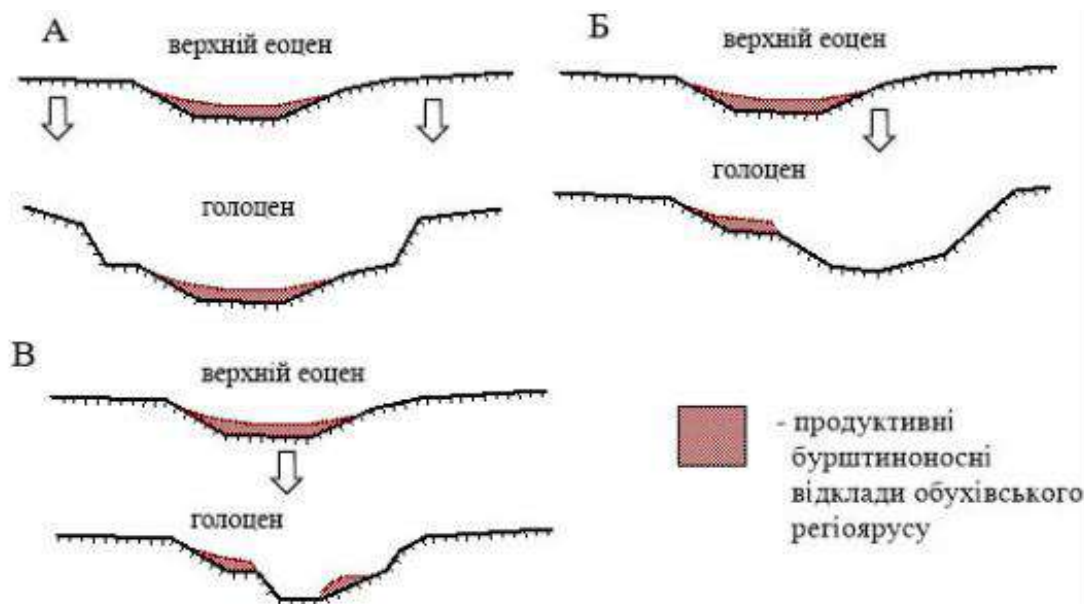


Рис. 3. Схема зміни положення залягання відкладів обухівського регіоярису внаслідок еволюції давніх тектонічних долин (А – повне опускання осьової частини долини зі збереженням відкладів; Б – опускання одного борту долини з частковою ерозією відкладів; В – часткове опускання осьової частини долини з неповною ерозією відкладів) /

Fig. 3. Scheme of changes in the position of sediments of the Obukhivian regional stage due to the evolution of ancient tectonic valleys (A – complete lowering of the axial part of the valley with preservation of sediments; Б – lowering of one side of the valley with partial erosion of sediments; В – partial lowering of the axial part of the valley with incomplete erosion of sediments)

диноцист зонального інтервалу DP11 (*Rhombodinium perforatum*, *Thalassiphora reticulata*, *Th. pelagica*, *Th. fenestrata*, *Charlesdownia clathrata* subsp. *angulosa*, *Glaphyrocysta semitecta*, *Deflandrea phosphoritica*, *Heteraulacacysta porosa*, *Areosphaeridium diktyoplokum*, *A. ebdonii*, *Enneadocysta pectiniformis* та ін.) біозональної схеми А.С. Андрєєвої-Григорович [1].

Реконструкції. Літолого-мінералогічні особливості бурштиноносних порід обухівського регіоярису в межах ділянки «Правобережна» вказують на їх формування в умовах мілководного прибережно-морського басейну з високим ступенем біотурбації осаду (рис. 2, фіг. 3), який характеризувався активним динамічним режимом вод (обкатаність зерен кварцу, глауконіту), присутністю невисоко піднятих островів (на відміну від таких київського часу), ерозійними берегами, впадінням у нього дрібних прісноводних водотоків, добре вираженою дрібномасштабною ритмікою басейна (шарувата текстура: перешарування дрібно-, середньо- (рис. 2, фіг. 4) та крупнозернистих (рис. 2, фіг. 5) пісків, алевритів з частими лігнітизованими прошарками (рис. 2, фіг. 2)) на ранніх стадіях (низи-середина розрізів) та загальний тренд до зменшення зернистості уламкового матеріалу (накопичення алевритів) на пізніх стадіях (верхи розрізів) накопичення відкладів.

Враховуючи вкрай невеликі потужності обу-

хівських відкладів, розуміємо, що обухівські відклади ділянки «Правобережна» демонструють нам тільки частину (фрагмент) обухівського седиментаційного циклу. Тим не менш ці останці як «документ» збереженого геологічного літопису дозволяють нам екстраполювати висновки про гідрологію басейну на весь обухівський трансгресивно-регресивний цикл.

Аналіз палінофацій підтверджує висновки по літофаціям щодо умов, які супроводжували бурштинонакопичення. Обухівські відклади дуже насичені усіма групами паліноморф (і морськими, і наземними). В таблиці наведені групи органікостінного мікропланктону (диноцисти (Д), прازیнофіти (П), акритархи (А)) та супутні їм зоомікрофосилії («палінофорамініфери», сколекодонти), паліноморфи наземних рослин (пиллок, спори, темноколірні фітокласти, рослинний дебрис, кутикули, трахеїди), які були визначені з обухівських бурштиноносних відкладів, і які маркують еколого-палеогеографічну ситуацію / приуроченість.

Найбільш рясними по всьому розрізу є мікроскопічний рослинний дебрис (трахеїди, кутикули, епідермальні тканини листків), ізометричні та подовжені чорні непрозорі фітокласти, напівпрозорі фітокласти коричневого кольору та уламки лігнітизованої деревини, які надають обухівським осадам ділянки коричневатого відтінку (рис. 2, 4). Саме через цю ознаку (певну «ко-

Основні еколого-палеогеографічні групи органікостінного мікропланктону та інших компонентів,
які складають палінофації обухівських відкладів ділянки «Правобережна» /
The main ecological and paleogeographical groups of organic-walled microplankton and other components
constituting the palynofacies of the Obukhiv sediments of the «Pravoberezhna» area

Тепловодні: (Д): <i>Microdinium</i>, <i>Homotryblum</i>, <i>Hystrichokolpoma</i> <i>rigaudiae</i>, <i>Deflandrea</i> <i>heteraphlycta</i> (в масі) <i>Deflandrea arcuata</i> <i>Wilsonidium</i>	Космополітні (евритермні) (в масі): (Д): <i>Enneadocysta</i>, <i>Cordosphaeridium</i>, <i>Thalassiphora fenestrata</i>, <i>Achomosphaera</i>, <i>Spiniferites</i>, <i>Pentadinium</i>, <i>Heteraulacacysta</i>, <i>Wetzeliiella</i>, <i>Rhombodinium</i>, <i>Charlesdowniea</i>, <i>Dapsilidinium</i>, <i>Lingulodinium</i>, <i>Hystrichokolpoma</i>, <i>Cribroperidinium</i>, (Д): <i>Deflandrea phosphoritica</i> (в масі) <i>Phthanoperidinium</i>	Відносно холодноводні: (Д): <i>Thalassiphora pelagica</i>, <i>Distatodinium elipticum</i>, <i>Batiacasphaera</i> (П): <i>Tasmanites concinnus</i>, <i>Pterospermella</i>, <i>Cymatiosphaeropsis</i>, <i>Cymatiosphaera</i>, <i>Cystidiopsis</i> (А): <i>Paucilobimopha</i>
Підвишена солоність: відсутні	Нормальна солоність (в масі): (Д): <i>Deflandrea</i>, <i>Spiniferites</i>, <i>Areosphaeridium</i>, <i>Enneadocysta</i>, <i>Cordosphaeridium</i>, <i>Thalassiphora</i>, <i>Dapsilidinium</i>, <i>Hystrichokolpoma</i>	Понижена солоність: (Д): <i>Cyclonephelium</i>, <i>Adnatosphaeridium</i>, <i>Phthanoperidinium</i>, <i>Glaphyrocysta</i> (Д): <i>Wetzeliiella</i> <i>Batiacasphaera</i> (П) (в масі): <i>Tasmanites concinnus</i>, <i>Palambages</i>, <i>Pterospermella</i>, <i>Cymatiosphaeropsis</i>, <i>Cymatiosphaera</i>, <i>Cystidiopsis</i> (А): <i>Cyclopsiella</i> (в масі) <i>Micrhystridium</i>, <i>Paucilobimopha</i>, <i>Horologinella</i>
Прибережно-мілководні: (Д): <i>Lingulodinium</i>, <i>Microdinium</i>, <i>Cribroperidinium</i>, <i>Spiniferites pseudofurcatus</i>, дрібні гістрихосфероїдні цисти групи <i>Incertae sedis</i> (А) <i>Cyclopsiella (elliptica/granosa)</i> (в масі) (П) (в масі): <i>Tasmanites concinnus</i>, <i>Pterospermella</i>, <i>Cymatiosphaeropsis</i>, <i>Cymatiosphaera</i>, <i>Cystidiopsis</i> (А): <i>Leiosphaeridia</i> Спори	Неритичні: (Д): <i>Achomosphaera</i>, <i>Spiniferites</i>, <i>Areosphaeridium</i>, <i>Enneadocysta</i>, <i>Cordosphaeridium</i>, <i>Thalassiphora</i>, <i>Dapsilidinium</i>, <i>Hystrichokolpoma</i> (Д): <i>Homotryblum</i> <i>Deflandrea</i> spp., <i>Wetzeliiellacea</i> (А): <i>Micrhystridium</i> «Палінофорамініфери» Чорні та напівпрозорі фітокласти Pinaceae	Відкрито-океанічні: (Д): <i>Imragidinium</i> (реєструються одинично в нижніх частинах розрізу) «Палінофорамініфери»

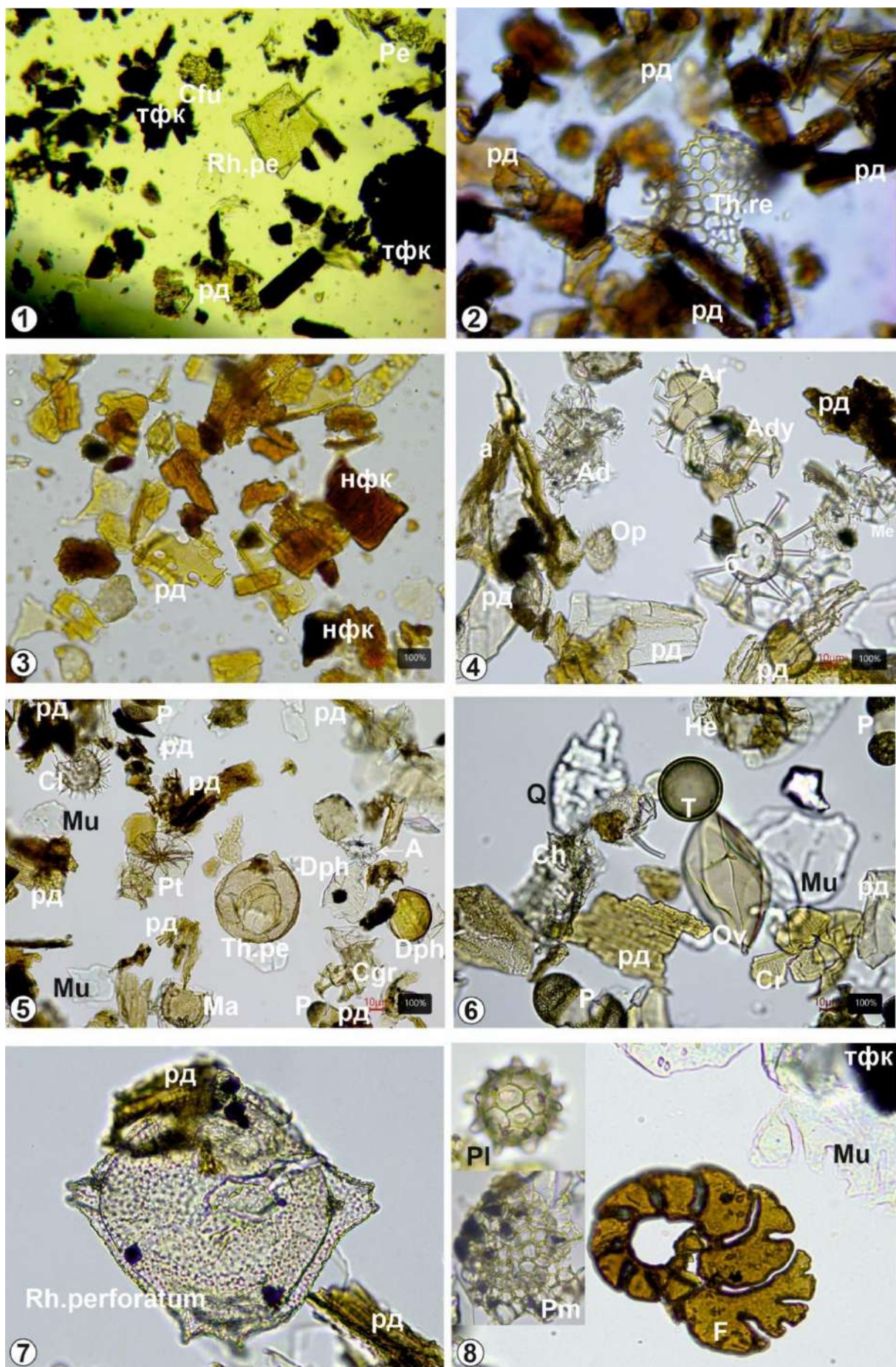


Рис. 4. Палінофації та характерні види органікостінного мікропланктону обухівського часу (ділянка «Правобережна», Житомирське Полісся):

- 1 – св. 1139, інтервал 1,6–2,8 м, піски кварцові з зернами ільменіту, світло-сірувато-коричневі, переважно дрібно-середньозернисті, слабо алевритисті. Темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Rhombodinium perforatum* (Rh.pe), *Cordosphaeridium funiculatum* (Cfu);
- 2 – св. 2053, інтервал 6,9–7,2 м, алеврити кварцові з лусочками слюди прозорої, бежево-коричневі, світло-коричневі, з домішкою тонкозернистого кварцу, вміщують велику кількість дрібних уламків лігнітизованої деревини. Рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Thalassiphora reticulata*, уривок (Th.re);
- 3 – св. 2387, інтервал 6,7–7,0 м, піски кварцові з поодинокими зернами глауконіту, бежево-сірі, середньо-крупнозернисті. Рослинний дебрис (рл); напівпрозорі коричневі фітокласти (нфк).
- 4 – гірничавиробка 44, піски дрібнозернисті середньої частини обухівських відкладів. Рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Adnatosphaeridium multispinosum* (Ad), *Areosphaeridium diktyoplokum* (Ady), *Operculodinium* (Op), *Melitasphaeridium* (Me);
- 5 – там же. Рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Cleistosphaeridium* (Cl), *Thalassiphora pelagica* (Th.pe), *Deflandrea phosphoritica* (Dph), *Cordosphaeridium gracile* (Cgr), *Membranophoridium aspinatum* (Ma), *Achomosphaera* (A); двумішковий пилок Pinaceae (P). Мусковіт (Му);
- 6 – там же. Рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Heteraulacacysta* (He), *Charlesdowniea* (Ch), *Cribroperidinium* (Cr); прازیнофіти: *Tasmanites* (T), акритархи: *Ovoidites* (Ov); двумішковий пилок Pinaceae (P). Мусковіт (Му), кварц (Q);
- 7 – там же. Рослинний дебрис (рл); диноцисти: *Rhombodinium perforatum*.
- 8 – гірничавиробка 44, піски алевритисті верхньої частини обухівських відкладів. Темноколірні непрозорі (чорні) фітокласти (тфк); прازیнофіти: *Palambages morulosa* (Pm); акритархи: *Planctonites* (Pl); «палінофорамініфери» (F) /

Fig. 4. Palynofacies and characteristic species of organic-walled microplankton of the Obukhiv time (Pravoberezhna site, Zhytomyr Polissya):

- 1 – borehole 1139, interval 1.6–2.8 m, quartz sands with ilmenite grains, lightly-greyish-brown, mostly fine-medium-grained, weakly aleuritized. Dark-colored opaque (black) phytoclasts (тфк); plant debris (рл); dinocysts: *Rhombodinium perforatum* (Rh.pe), *Cordosphaeridium funiculatum* (Cfu);
- 2 – borehole 2053, interval 6.9–7.2 m, quartz silty with scales of transparent mica, beige-brown, light brown, with an admixture of fine-grained quartz, contain a large number of small fragments of lignified wood. Plant debris (рл); dinocysts: *Thalassiphora reticulata*, fragment (Th.re);
- 3 – borehole 2387, interval 6.7–7.0 m, quartz sands with single glauconite grains, beige-gray, medium-coarse grained. Plant debris (рл); translucent brown phytoclasts (нфк);
- 4 – mine working 44, fine-grained sands of the middle part of the Obukhiv deposits. Plant debris (рл); dinocysts: *Adnatosphaeridium multispinosum* (Ad), *Areosphaeridium diktyoplokum* (Ady), *Operculodinium* (Op), *Melitasphaeridium* (Me);
- 5 – ibid. Plant debris (рл); dinocysts: *Cleistosphaeridium* (Cl), *Thalassiphora pelagica* (Th.pe), *Deflandrea phosphoritica* (Dph), *Cordosphaeridium gracile* (Cgr), *Membranophoridium aspinatum* (Ma), *Achomosphaera* (A); bissetate pollen: Pinaceae (P). Muscovite (Mu);
- 6 – ibid. Plant debris (рл); dinocysts: *Heteraulacacysta* (He), *Charlesdowniea* (Ch), *Cribroperidinium* (Cr); prasinophytes: *Tasmanites* (T), acritarchs: *Ovoidites* (Ov); bissetate pollen: Pinaceae (P). Muscovite (Mu), quartz (Q);
- 7 – ibid. Plant debris (рл); dinocysts: *Rhombodinium perforatum*.
- 8 – mine working 44, silty sands of the upper part of the Obukhiv deposits. Dark-colored opaque (black) phytoclasts (тфк); prasinophytes: *Palambages morulosa* (Pm); acritarchs: *Planctonites* (Pl); «palynoforaminifera» (F).

ричнюватість)), за відсутності палінологічних (палеонтологічних) визначень, відклади відклади Барашівсько-Пержанської зони відносили та відносять до межигірсько-олігоценівих [6,8,9,13,14].

Велика кількість рослинних залишків (дебрису, крупних уламків) (рис. 4) по всьому розрізу вказує на високу гідродинаміку морського басейну, мілководність та близькість берегової лінії у весь період формування обухівських відкладів. На мілководність вказує і домінуючий комплекс диноцист – широкий розвиток дефляндрових, ветцелієлових, «палінофорамініфер» (*Elphidium* (рис. 4, фіг. 8) та інші спіральні форми) – індикаторів прибережно-морських та внутрішньонеритичних обстановок (див. таблицю та рис. 4). Тим не менш басейн мав достатньо вільний водобмін з більш глибоководними ділянками Прип'ятської

протоки (широкий розвиток *Spiniferites* spp., *Achomosphaera* spp., *Enneadocysta* spp. та інших хоратних цист), через яку вивчений басейн сполучався з північними басейнами Європи та басейном Дніпровсько-Донецької западини. Різноманіття відносно холодноводних видів дефляндрових (рис. 4, фіг. 5) вказує на деяке зниження температури поверхневих вод у порівнянні з басейном київського часу. Тим не менш, асоціація обухівського часу свідчить про температуру вод не нижче субтропічної (+20°...+25°C), на що вказує високий вміст тепловодних видів динофітових (до 20%), серед яких присутні у тому числі і тепловодні види дефляндрових (*D. arcuata* (до 1%)), різноманітність евритермних (до 20%), особливо хоратних *Cordosphaeridium*, *Spiniferites* / *Achomosphaera* (до 16%; рис. 4, фіг. 1, 4, 5).

Відмінною рисою обухівського басейну в межах ділянки «Прибережна», що відрізняє його від басейну київського часу, це дуже широкий розвиток прازیнофітової альгофлори і акритарх (див. таблицю, рис. 4), що відбиває загальну тенденцію зниження температури кінця еоцену. Кількісно вони не уступають диноцистам, що також свідчить про мілководність басейну та значний притік прісної води у морський басейн, що спричиняв зниження солоності. Частими в палінофаціях є *Ovoidites* (рис. 4, фіг. 6), який виступає як індикатор існування прісноводних боліт на суші поблизу. Колоніальні водорості *Palambages* (рис. 4, фіг. 8) також показують на умови доброї доставки прісної води у море. Серед спор і пилок наземних рослин в палінофації домінує пилок голонасінних (*Pinaceae*), опосередковано вказує на близькість берегової лінії, оскільки цей пилок розноситься вітром і річковими потоками на дуже значні відстані.

Приуроченість бурштину. Нашими дослідженнями, спираючись на детальне вивчення літологічних особливостей і комплексів паліобіоти, доведено, що з обухівських найбільш продуктивними на бурштин в межах ділянки «Правобережна» виявилися відклади піщані і піщано-алевритові, що приурочені до найбільш мілководних фацій – прибережне мілководдя, палеodelьти, в зонах розгрузок прісноводних потоків, які за органікостінним мікропланктоном маркуються як багаті на прازیнофітові і акритархи (шари з *Tasmanites*, *Cymatiosphaera*, *Cyclopsiella*).

Обухівські відклади ділянки «Правобережна» частково перекриваються відкладами неогену (алеврити з *Pediastrum* (асме) [15]), які формувались вже в континентальних умовах.

Висновки. Комплексні реконструкції умов накопичення осадової (обухівської) товщі в межах тогочасного палеобасейна Житомирського Полісся дозволяють оцінити особливості седиментації, палеогеографії, палеогеоморфології, що сприяє ефективним пошукам на бурштин. Такий напрям досліджень допомагає розкрити внутрішню шарувату структуру різними методами та відтворити модель розвитку палеобасейну.

Отримані результати вносять корективи до

існуючих уявлень про межі поширення обухівсько-приабонських відкладів вглиб Українського щита з півночі. Палінологічними дослідженнями доведена відсутність межигірських відкладів олігоцену в межах ділянки «Правобережна», хоча раніше ці відклади зображувалися тут на геологічних картах [6]. Вважаємо, що предметом окремих комплексних (літолого-палінологічних) досліджень є ув'язка виділених літофацій ділянки (наших так званих макроскопічно німих товщ) з молосковими літофаціями, описаним Д.Є. Макаренком [8, 9], які зі сходу і півночі обрамляють ділянку «Правобережна» (з метою виявлення їх одновіковості/різновіковості), які плануються нами для подальшої роботи. Вкупі ці дані можуть в подальшому бути враховані при актуалізації палеогеографічних (та літолого-фаціальних) карт території Українського Полісся пізнього еоцену.

Вперше для території дослідження доведена приуроченість покладів бурштину до обухівських (розглядаємо їх як первинні розсипи, що формувалися в морському обухівському басейну) відкладів еоцену, а не до межигірських відкладів олігоцену, як існує усталена думка.

Палеобасейн, який сформував поклади бурштину в обухівський час, характеризувався нормальною солоністю з тенденцією до опріснення та зниження температури поверхневих вод, невеликими глибинами (перші десятки метрів), близькістю берегової лінії, великим приносом із суші рослинного дебрису, уламків деревини, у тому числі викопних смол в зону седиментації.

Вирішення проблем палеогеографії є однією з важливих задач вивчення осадових товщ та приурочених до них корисних копалин. Елементи палеогеографічних реконструкцій необхідні та важливі при геологознімальних та пошукових роботах на бурштин.

Дослідження виконувалися в рамках робіт КПКВК 6541030 «Розробка та апробація стратегічної моделі осадових басейнів палеогену, неогену та квартеру України» (державний реєстраційний номер 0122U001698) та геологорозвідувальних робіт на бурштин, яке виконує ТОВ «ДРІВ ГЕО».

Список використаної літератури

1. Атлас диноцист палеогена Украины, России и сопредельных стран / А.С. Андреева-Григорович, Н.И. Запорожец, Т.В. Шевченко, Г.Н. Александрова, О.Н. Васильева, А.И. Яковлева, А.Б. Стотланд, Н.А. Савицкая. Киев: Наук. думка, 2011. 224 с.
2. Богдасаров М.А., Комлев А.А., Криницкая М.В., Нестеровский В.А., Петров Н.П. Геолого-генетическая модель янтареносных отложений Беларуси и Украины. Вучоныя запіскі, 2014. Вып. 10, ч. 2 Прыродазнаўчыя навукі, С. 98-109.
3. Зосимович В.Ю., Шевченко Т.В. Етапи розвитку осадових басейнів Північної України в палеогені. Зб. наук. праць ІГН НАН України. 2014. Т. 7. С. 83–100. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146855>

4. Зосимович В.Ю., Шевченко Т.В. Палеогенові відклади Північноукраїнської палеоседиментаційної провінції. *Зб. наук. праць ІГН НАН України*. 2015. Т. 8. С. 68–121. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712>
5. Криницька М. В., Шпирка В. М. Територіальне районування буриштиновмісних площ України в світлі їх ієрархічного підпорядкування. *Український буриштиновий світ : тези доповідей Другої міжнародної конференції 16-17 жовтня 2008 р. К., 2008*. С. 12-13.
6. Мазур М.Д., Біла Т.О., Дроздецький В.В. та ін. Геологічна будова та корисні копалини верхів'я р. Уборть. *Звіт про геологічне довивчення території аркуша М-35-Х (Олевськ) масштабу 1:200 000*. Київ, 2010. Т. 1, 281 с. Т. 4, 259 с. ПДРГП «Північгеологія». Рівненська ГЕ. Фонди ДП «Українська геологічна компанія».
7. Мамчур С.В. До обґрунтування виділення Пержанського буриштиноносного району. *Матеріали XIII Всеукраїнської молодіжної наукової конференції - школи «Сучасні проблеми наук про Землю»*. Київ, 2023. С. 16-18.
8. Макаренко Д.Є. До стратиграфії палеогенових відкладів Олевського району, Житомирської області. *ДАН УРСР*, 1958, №4. С. 59-61.
9. Макаренко Д.Є. Палеогенові відклади північно-західної частини Українського кристалічного щита. *Геол. журн.* 1959. Т. 19. Вип. 1. С. 47-56.
10. Мацуй В.М., Нестеровский В.А. *Янтарь Украины (состояние проблемы)*. Киев, 1995. 55 с.
11. Мельничук В.Г., Криницька М.В. *Буриштин Полісся. Довідник*. Рівне: НУВГП, 2018. 236 с.
12. Науменко У.З., Мацуй В.М. Карта викопних смол України. *Мінеральні ресурси України*, (4) 2020. С. 13-17.
13. *Стратиграфическая схема фанерозойских образований Украины для геологических карт нового поколения. Графические приложения. Таблицы*. Киев, 1993.
14. *Стратиграфія УРСР. Т. 9. Палеоген*. Киев: Вид-во АН УРСР, 1963. 319 с.
15. Шевченко Т.В., Курепа Я.С., Рябоконт Т.С., Зосимович В.Ю. Новые данные по стратиграфии среднего-верхнего эоцена северо-западного района Украинского щита (Украина). *Географические аспекты устойчивого развития регионов: Материалы IV международной научно-практической конференции*. Гомель, 2021. С. 275-279.
16. Шевченко Т.В., Курепа Я.С., Рябоконт Т.С., Мамчур С.В., Зосимович В.Ю. Еоценові та олігоцені морські відклади Українського Полісся: нові мікропалеонтологічні дані. Еволюція органічного світу як основа стратиграфії і кореляції фанерозойських відкладів України: *Матеріали міжнарод. конф. та XL сесії Українського Палеонтолог. товариства НАН України, присвячених пам'яті акад. НАН України Петра Феодосійовича Гожика*. (Київ, 10-12 листопада 2021 р.), 2021. С. 64-65.
17. Яковлева В. В., Панченко В. П. Буриштин Західного Полісся та інших регіонів України. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій: Зб. наук. пр. Луцьк*, 2004. С. 23-32.
18. Gedl P. Eocene dinoflagellate cysts from the Popiele beds at Koniusza (Skole Nappe, Flysch Carpathians, Poland): taxonomy, biostratigraphy, and palaeoenvironmental reconstruction of a marginal marine basin. *Studia Geologica Polonica*. 2013. Vol. 135. 197 p.
19. Mendonça Filho J.G., Menezes T.R., Mendonça J.O. et al. Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches Geochemistry. *Geochemistry. Earth and System Processes*. 2012. Vol. 1. P. 211-245.
20. Palcu D.V., Krijgsman W. The dire straits of Paratethys: gateways to the anoxic giant of Eurasia. *Geological Society Special Publication*, 2021. Vol. 523, pp. 111-139 DOI: <https://doi.org/10.1144/SP523-2021-73>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

The Paleogeographic Conditions for the Late Eocene sediments of Zhytomyr Polissya in connection with their amber content (on the example of the «Pravoberezhna» site)

Tetiana Shevchenko¹

PhD (Geology), Senior Researcher

Department of stratigraphy and paleontology of the Cenozoic deposits,

¹ Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine;

Serhii Mamchur²

PhD student, Faculty of Geology,

² Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine;

Yaroslav Kurepa³

PhD (Geology), Geologist, ³ «DRIV GEO» LLP, Rivne, Ukraine;

Andriy Matveyev⁴

DSc (Geology), Associate Professor,

Department of Fundamental and Applied Geology,

⁴ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. The work is relevant because of the need to create a reliable history of the formation of the physical and geographical environment of the Paleogene in the territory of Zhytomyr Polissya to decipher the processes of amber accumulation. In accordance with the mineragenic zoning, the territory of the amber-bearing site "Pravoberezhna" is located within the Perha amber-bearing region. The latter is located within the Volyn-Podilskyi plutonic belt and is separated from the adjacent regions by the Hlynnensky and Sushchan-Perha tectonic zones. The main difference between the Klesiv-Rokytnyansky, Sloveschansky-Ovrutsky and Barashiv-Perha amber-bearing zones is the different age of the amber-bearing rocks.

Data and Methods. A comprehensive lithological-micropaleontological and palynofacial analysis of amber-bearing deposits of the «Pravoberezhna» site of the Perha amber-bearing district of Zhytomyr Polissya was conducted. 38 sections exposing Paleogene deposits have been described.

Results and Discussion. The age of the host rocks was reinterpreted based on dinocysts. For the first time in this territory, the dating of amber deposits to the Late Eocene interval was proven. The Obukhiv sediments, isolated from the Paleogene sequence, are characterized by a complex of dinocysts from *Rhombodinium perforatum*, *Thalassiphora reticulata*, *Charlesdownia clathrata angulosa*, *Glaphyrocysta semitecta*, etc. zone DP11 of the biozonal scheme of A.S. Andreeva-Grigorovich (1991). The granulometric and material composition of the Obukhivian sediments was studied. A model scheme shows the change in the occurrence of sediments of the Obukhiv regiestage according to the evolution of ancient tectonic valleys. New data about the Obukhiv marine palynological association within the «Pravoberezhna» site which contributes to the little-studied area of marine environments of the Late Eocene of Northern Ukraine was presented. Palynobiota includes representatives of Dinoflagellata, Prasynophyta, Acritarcha, pollen and spores of terrestrial plants, as well as transparent and opaque phytoclasts, fungal palynomorphs, «palynoforaminifera», scolecodonts. Palynofacies analysis shows that the sediments containing amber deposits within the «Pravoberezhna» site were formed by a shallow warm sea with high hydrodynamics under the high influence of river systems. It was found that the largest accumulations of amber are probably associated with paleodelta facies.

Keywords: organic-walled microplankton, sediments of the Obukhivian Regiestage, Priabonian Stage, stratigraphy, paleogeography, Perha amber-bearing region, Northern Ukraine.

References

1. Atlas of Paleogene Dinocysts of Ukraine, Russia and adjacent countries (2011). Andrejeva-Grigorovich A.S., Zaporozhets N.I., Shevchenko T.V. et al. Naukova Dumka, Kyiv: 224.
2. Bogdasarov M.A., Komlev A.A., Krynytska M.V., Nesterovski V.A., Petrov N.P. (2014). The Geological Genetic Model of Amber-Bearing Deposits of Belarus and Ukraine. Scientific Proceeding of Brest University Collection of scientific works Issue 10 Part 2 Natural Sciences Brest: 98-109.
3. Zosimovich V.Yu., Shevchenko T.V. (2014). Development stages of Paleogene sedimentary basins of Northern Ukraine. Collection of scientific works of the Institute of Geological sciences NAS of Ukraine. 7: 83-100. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146855> [in Ukrainian].
4. Zosimovich V.Yu., Shevchenko T.V. (2015). Paleogene deposits of the Northern Ukraine paleosedimentary province. Collection of scientific works of the Institute of Geological sciences NAS of Ukraine. 8: 68-121. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712> [in Ukrainian].
5. Krynytska M.V., Shpyrka V.M. (2008). Territorial zoning of amber-bearing areas of Ukraine in the light of their hierarchical subordination. Ukrainian Amber World: abstracts of the reports of the Second international conference of October 16-17, 2008. Kyiv: 12-13. [in Ukrainian]

6. Mazur M.D., Bila T.O., Drozdetsky V.V. et al. (2010). Geologic building and mineral deposits of the head of river Ubort. Report on geologic additional investigation on the territory of M-35-X (Olevsk) sheet, scale 1:200 000. Kyiv, 1, 281. 4, 259. PDRGP «Pivnichgeologiya». Rivne GE. Fund of the State Enterprise «Ukrainian Geological Company».
7. Mamchur S. (2023). To reasoning allotment Perzhanskiy amber area. Materials to XIII all-Ukrainian youth scientific conference-school «Modern problems of Earth Sciences». Kyiv: 16-18. [in Ukrainian].
8. Makarenko D.E. (1958). To the stratigraphy of the Paleogene deposits of Olevsky district, Zhytomyr region. Reports of the Academy of Sciences of Ukraine of the Ukrainian SSR, 4: 59-61. [in Ukrainian].
9. Makarenko D.Ye. (1959). Paleogene deposits of the northwestern part of the Ukrainian shield, Geological Journal, 19(1): 47-56. [in Ukrainian].
10. Matsui V.M., Nesterovskij V.A. (1995). Amber of Ukraine (state of the problem). Kiev: MP «Terra»: 56.
11. Melnychuk V.G., Krynytska M.V. (2018). Amber of Polissya. Handbook Rivne: NUVGP: 236 [in Ukrainian].
12. Naumenko U., Matsui V. (2020). Map of fossil resins of Ukraine. Mineral resources of Ukraine. 4: 13-17. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.13-17> [in Ukrainian].
13. Stratigraphic schemes of the Phanerozoic formations of Ukraine for geological maps the new generation (1993). Graphic applications. Tables. Kyiv.
14. Stratigraphy of the USSR. 9. Paleogene (1963). Kyiv: 319. [in Ukrainian].
15. Shevchenko T.V., Kurepa Ya.S., Ryabokon T.S., Mamchur S.V., Zosymovych V.Yu. (2021). Eocene and Oligocene marine sediments of the Ukrainian Polissia: new micropaleontological data. Evolution of organic world as fundament of stratigraphy and correlation of Phanerozoic of Ukraine: Materials of International scientific conference and XL session of the Ukrainian Paleontological Society of NAS of Ukraine, dedicated to a memory of the Academician of NAS of Ukraine Petro Feodosiiovych Gozhyk (Kyiv, November 10–12, 2021). Kyiv: 64-65. [in Ukrainian].
16. Shevchenko T.V., Kurepa Ya.S., Ryabokon T.S., Zosimovich V.Yu. (2021). New data on Middle-Upper Eocene stratigraphy of the north-western area of the Ukrainian shield. Geographical aspects of sustainable development of regions: Materials of the IV International Scientific and Practical Conference. Gomel: 275-279. [in Ukrainian].
17. Yakovleva V.V., Panchenko V.P. (2004). Amber of Western Polesie and other regions of Ukraine. Priroda Zahidnogo Polissya ta prileglih teritorij: Zb. nauk. pr. Luts'k: 23-32. [in Ukrainian].
18. Gedl P. (2013). Eocene dinoflagellate cysts from the Popiele beds at Koniusza (Skole Nappe, Flysch Carpathians, Poland): taxonomy, biostratigraphy, and palaeoenvironmental reconstruction of a marginal marine basin. Studia Geologica Polonica. 135: 197.
19. Mendonça Filho J.G., Menezes T.R., Mendonca J.O. et al. (2012). Organic Facies: Palynofacies and Organic Geochemistry Approaches Geochemistry. Geochemistry. Earth and System Processes. 1: 211-245.
20. Palcu D.V., Krijgsman W. (2021). The dire straits of Paratethys: gateways to the anoxic giant of Eurasia. Geological Society Special Publication. 523: 111-139 DOI: <https://doi.org/10.1144/SP523-2021-73>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 18 September 2024

Accepted 15 November 2024

ГЕОГРАФІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-10>

UDC 911.3:[352.9:502.15](477)

Received 4 October 2024

Accepted 20 November 2024

Strategic Spatial Planning of Territorial Communities to achieve the Sustainable Development Goals

Sergii Bortnyk^{1, 2}

Professor, Institute of Geography and Environmental Sciences,

¹ Jan Kochanowski University, Kielce, Poland;

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Earth Science and Geomorphology,

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

e-mail: sergiy.bortnyk@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0886-5861>;

Tetiana Lavruk²

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Earth Science and Geomorphology,

e-mail: tetiana.lavruk@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9031-9071>;

Vilina Peresadko³

DSc (Geography), Professor, Department of Physical Geography and Cartography,

³ V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: vilinaperesadko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-2439-2788>

ABSTRACT

Problem Statement. Strategic spatial planning in Ukraine focuses mainly on economic aspects and takes less into account the environmental consequences of planned activities, which may be threatening to natural and cultural heritage. This is explained, in particular, by the insufficient number of trained specialists for planning sustainable spatial development. It is especially important to integrate scientific natural research into educational programs for training specialists in spatial planning, which include the study of geodiversity, the evolution of natural and cultural landscapes, methods of creating nature conservation areas, the formation of eco-networks, as well as the introduction of innovative technologies in land use and various branches of the national economy. Such research is the basis for developing community strategy and achieving the Sustainable Development Goals (SDGs), effective territorial management and successful spatial planning practices.

The purpose of the article is to consider strategic spatial planning as a modern interdisciplinary field that integrating social, economic, and ecological aspects of sustainable spatial development.

Research methodology proposes an interdisciplinary approach to strategic planning, which takes into account the geodiversity of the territory, the evolution of natural and cultural landscapes, as well as natural and anthropogenic risks. This approach makes it possible to predict optimal scenarios of spatial development, adapted to specific geographical conditions. Special attention is paid to the training of highly qualified specialists at the bachelor's and master's levels, emphasizing their important role in the development of strategic plans, which are the basis of comprehensive plans for the spatial development of territorial communities.

The results. The article presents scientific approaches to strategic planning based on an interdisciplinary study of territories. This study highlights the international experience of strategic planning and similar successful practices in Ukraine territorial communities.

Scientific novelty. The study provides a theoretical basis for the mandatory integration of natural science research into strategic spatial planning. This includes data on geodiversity, natural settings and resources, cultural and natural landscapes, nature reserves and ecological networks. The combination of this information with the data of the land and urban cadasters creates a comprehensive basis for determining the optimal scenarios of spatial development.

Practical significance. The results of this study can be applied to improve the methodology of strategic spatial planning at the local level. Generalized international experience is a valuable guide for setting long-term spatial development goals and implementing specific measures to achieve them. Practical aspects of spatial planning, such as innovative land use systems, implementation of renewable energy sources, inclusive residential and public spaces, protection and preservation of natural and cultural heritage, are illustrated by specific examples discussed in the article. This study is useful for professionals in spatial planning and community management, as well as for researchers, teachers, and students who focus on integrating natural science research into the practice of spatial development.

Keywords: strategic spatial planning, geodiversity, eco-network, natural and cultural heritage, international experience, territorial communities of Ukraine.

In cites: Bortnyk Sergii, Lavruk Tetiana, Peresadko Vilina. (2024). Strategic spatial planning of territorial communities to achieve the Sustainable Development Goals. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 121-136. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-10>

Statement of the problem. The development of each territorial community, region, and state. According to experts, such a consistent approach to strategy is an important stage of spatial planning of

spatial planning with constant coordination of local, regional, and national spatial development programs and projects is one of the advantages of decentralization processes, particularly in the field of land management. However, the results of decentralization in Ukraine indicate certain challenges in the development of the strategies, which should become the basis of the Comprehensive Plans for the Spatial Development of the Territories of Territorial Communities.

Even the most economically active communities need a comprehensive assessment of the natural potential of their territories to choose the optimal scenario of spatial development. The analysis of strategies developed by territorial communities indicates the need for more careful planning of the environmental component. The main reason for this is the insufficient awareness of local authorities and the public about the natural aspects of spatial planning, especially about the need for careful and safe use of natural conditions and resources, as well as about the possibilities of preserving and multiplying natural and cultural heritage. In this context, the use of international spatial planning experience to achieve the Sustainable Development Goals is essential.

Analysis of Recent Studies and Publications.

According to the researchers, spatial planning is essential in achieving the Sustainable Development Goals [28], particularly in land management, socio-economic development, and solving environmental problems, such as climate change, biodiversity conservation, and food and energy security.

A focus on the problems of cities dominates the theory and practice of spatial planning. Until recently, rural areas were considered purely agricultural or picturesque landscapes that served as buffers against anthropogenic pressure. Less attention was paid to the village's social problems. Spatial planning must promote rural spatial development, emphasizing that well-being and quality of life should be public policy objectives. Nick Gallent et al. (2015) underlines the composite nature of rural planning, which combines land-use and spatial planning elements with community action, countryside management, and the projects and programs of national and supra-national agencies and organizations [22]. These scholars stress the need for governance mechanisms to implement integrated solutions for urban and rural areas and argue that there is a direct connection between ecosystem service consumption and global challenges such as habitat degradation, climate change, and resource scarcity.

Future progress in achieving the Sustainable Development Goals is linked to scientific research, technology, and innovation [28]. A significant role in this process is attributed to Earth observation

(EO) and geolocation data provided by Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Earth observation involves the collection of information about the physical, chemical, and biological characteristics of our planet, enabling the monitoring and assessment of changes in both natural and anthropogenic environments. This is accomplished through remote sensing technologies, such as meteorological satellite data [15]. Satellites equipped with specialized sensors provide data on the atmosphere, Earth's surface, oceans, ice coverage, and ecosystem health.

Geolocation, particularly GNSS, is utilized in various fields, including transportation, telecommunications, geodesy, mining, precision agriculture, finance, high-accuracy applications, and scientific research. Such applications include measuring the effects of space weather on Earth, monitoring earthquakes, and studying climate change. Satellite telecommunications (SatCom) also contribute to several SDGs (e.g., 4, 15, and 16). Some fields, such as precision agriculture, benefit from using EO, GNSS, and SatCom technologies.

In a study titled Space for the Sustainable Development Goals (2021), 506 projects were analyzed, identifying 1,542 connections to various SDGs and targets, demonstrating that each project contributes to an average of more than three SDGs or targets. The project with the most connections to various SDGs was the SatCom initiative "Every Child Online" (ECO). This initiative supports SDG 4 (Quality Education) by enabling access to high-speed Internet, specialized educational online content, and opportunities for remote learning and lifelong education. Such benefits are especially relevant for remote and isolated communities [5].

The 2030 Agenda for Sustainable Development emphasizes that organizations engaged in space research should align their activities with international frameworks to achieve the SDGs.

Unresolved Aspects of the General Problem.

In Ukraine, spatial planning is undergoing a new phase, marked by the development of a Comprehensive Plan for the spatial development of territories of Territorial Communities, which has already been initiated in at least one-third of territorial communities (TCs). This process must be preceded by a Spatial Development Strategy based on an in-depth interdisciplinary analysis of natural, social, economic, technological, and environmental factors. Integrating such interdisciplinary research into practice substantially enhances the potential for achieving the SDGs.

In Ukraine, state institutions and public organizations are actively addressing issues of spatial planning. Among them are the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine [6], the All-Ukrainian Association of Communities

[2], and the Association of Ukrainian Cities [3]. Numerous international organizations also play a significant role in advancing spatial planning in the country. Notably, the United States Agency for International Development (USAID) Agriculture and Rural Development Program (AGRO) [29] has developed a range of educational materials and practical guidelines for preparing comprehensive spatial development plans for communities. These resources were created based on the outcomes of pilot projects conducted in the Pischynska and Rohanska territorial communities in the Kharkiv region. Additionally, the AGRO program collaborates with territorial communities and higher education institutions across Ukraine, integrating its spatial planning methodology into educational processes aimed at preparing future specialists in this field [18, 19].

Unresolved issues include the justification of strategic planning methodology, the development of guidelines for forecasting balanced growth, and the creation of local-level geoportals to serve as reference tools for government officials and professionals. Additionally, there is a need to establish a unified list of mandatory thematic cartographic materials to visualize data on the status of territorial communities and regions in the country [1]. For example, precision farming requires detailed topography, soil mapping, and crop yield indicators.

Main Content. Strategic spatial planning serves as a reliable instrument for achieving the Sustainable Development Goals, encompassing numerous interconnected themes that demand interdisciplinary analysis. A thematic overview of international projects provides valuable insights into the implementation of SDGs through the application of strategic spatial planning. These themes include improving land use systems, fostering economic sustainability and technological innovation, optimizing resources and enhancing energy efficiency, promoting social inclusiveness, protecting cultural heritage and the identity of territorial communities, developing green infrastructure and ecological networks, and advancing participatory governance. The following sections explore the experience of strategic planning in the European Union and the potential for adapting similar practices in Ukraine.

Improvement of Land Use Systems. Strategic spatial planning aims to ensure a balanced allocation of land resources, addressing the dual priorities of urbanization and the preservation of natural ecosystems. This is one of the challenges of our time and aligns with numerous SDGs, including Goals 1-3, 6, 11, 12, and 15. These goals focus on eradicating poverty and hunger, ensuring food security, promoting sustainable agricultural development, creating sustainable cities and settlements, preserving terrestrial ecosystems, protecting biodiversity, and reduc-

ing habitat loss. Preservation of geodiversity is important not only for the purpose of protecting biodiversity but also as a foundation for sustainable natural resource management. Geodiversity directly determines the natural potential of each territory and the possibilities for its sustainable spatial development.

The first two Goals aim to eradicate poverty and hunger, which are interrelated in many ways. Above all, this requires ensuring that everyone has access to safe, nutritious and sufficient food. The July 2024 High-Level Political Forum on Sustainable Development noted that Goal 2 faces multiple challenges and reflects worrying trends: 600 million people are expected to still be hungry by 2030, and the prevalence of malnutrition has increased by 10%. Many countries are now struggling with the twin problems of undernutrition and obesity. Global obesity rates have increased from 9% in 2005 to 16% in 2022. None of the 193 UN member states have achieved SDG 2 (Sustainable Development Report, 2024) [26].

Land use practices play a crucial role in the stability of geosystems and achievement of Goal 2. Agriculture accounts for more than half of the Earth's land use and 70% of freshwater consumption. This is closely related to worsening climate change and increasing water scarcity. At least one-third of global human-caused greenhouse gas emissions are related to land-use practices.

By 2030, the plan is to double the agricultural productivity and the incomes of small-scale food producers by ensuring secure and equitable access to land, productive resources, knowledge, financial services, markets, value-added opportunities and employment in the non-agricultural sector. SDG 2.4 calls for sustainable food production systems and the implementation of sustainable agricultural practices [28].

These methods aim to support ecosystem functions, increase adaptability to climate change and extreme weather events, and improve soil quality. In addition, it promotes increased investment, including through enhanced international cooperation, in rural infrastructure, agricultural research, technology development, and related advisory services. Achieving these goals largely depends on the strategy for the development of agricultural production and the spatial development of rural areas.

The European Union has established a Common Agricultural Policy (CAP) as a framework for the spatial development of rural areas. The CAP includes initiatives such as the Innovation Partnership for Agricultural Productivity and Sustainability (EIP-AGRI) project, which provides a platform for sharing knowledge and expertise on agriculture. This initiative brings together national CAP net-

works, organizations, administrations, researchers, entrepreneurs, and practitioners to exchange best practices.

Key themes for the spatial development of rural areas include supporting agricultural production, efficient natural resource use, market regulation, the provision of social services, preservation of cultural landscapes, environmental protection, biodiversity conservation, climate change mitigation, the use of renewable energy sources, animal welfare, and balanced economic, ecological, and social development.

Each country implements national strategic plans based on CAP. For example, Germany's 2023 National Strategic Plan includes initiatives such as EIP-AGRI, assistance for young farmers, individual investments in agricultural businesses, and public water budgeting.

In 2023-2024, 20 experts from the EU CAP Network Focus Group on "Regenerative Agriculture for Soil Health" worked on issues related to regenerative farming practices. These practices restore, protect, and improve soil health and productivity. Regenerative agriculture involves implementing land-use systems tailored to local conditions. By restoring soil health, regenerative agriculture also seeks to address biodiversity loss, restore water cycles, adapt to climate change, mitigate its effects, and improve economic profitability.

Soil degradation, including wind and water erosion and the loss of organic matter, underscores the need for diverse methods such as managed grazing, compost application, agroforestry, minimal tillage, crop diversification, and biostimulation. These methods are selected based on specific local conditions, which must be thoroughly studied.

The focus group identified several research needs, including developing practical soil health indicators aligned with management practices and productivity metrics across different contexts. Proposed initiatives also include assessing the impact of regenerative farming on climate, integrating microclimate and small water cycle effects, managing plant health through soil health practices, optimizing cover crop practices, and evaluating co-cultivation systems under varying conditions. Innovative ideas for regenerative agriculture include creating minimal or zero-tillage systems that perform well without herbicides, developing farm-level tools for monitoring soil health, designing efficient co-cultivation systems, and integrating pastures into crop farming systems (EU CAP Network Focus Group) [13].

The transformation of land use systems is based on the concept of "Smart Villages", which aims to modernize rural infrastructure through innovative technologies, improve quality of life and education, engage most residents in spatial planning projects,

preserve natural resources, and ensure sustainable spatial development. The European Commission (DG AGRI) supports the Smart Villages initiative to help villages develop strategies and methods for their implementation, as well as to inform future policies regarding "Smart Villages" (The Smart Rural 21 project) [25]. As part of the EU's Smart Rural 21 project, 21 applications were selected from over 740 proposals for "Smart Villages" across Europe. Due to the high quality of submissions, leading experts chose 16 villages – rather than the initially planned 12 – to join 5 pre-selected villages in the "Pathway to Smart Villages". The Directorate-General for Agriculture and Rural Development reviewed the development strategies of all participating villages and provided advice on achieving their goals.

To facilitate information exchange, "Knowledge clusters" of smart rural communities were created. These clusters aim to connect local communities with shared thematic interests.

Case Study. From the perspective of elaborating a Spatial Development Strategy, the experience of one of the smallest villages participating in the project – Tomaszyn, a rural settlement in Poland located in the Warmian-Masurian Voivodeship – is particularly noteworthy. The village comprises only ten households and one cooperative. It has the lowest population density in the country. The region is classified as the "Green Lungs of Poland" and is often referred to as the "Land of a Thousand Lakes". The voivodeship is home to eight landscape parks, protecting natural landmarks of European significance. Historical records first mention Tomaszyn in 1410, and the village experienced gradual development over centuries until World War II, during which most buildings were destroyed, and the population dramatically decreased. In 2021 the cooperative "Ostoja Natury" together with the local community participated in the "Smart Village" competition organized by the Polish Academy of Sciences (PAN) and received an award for the concept "Ostoja Natury Wioska 3.0."

Tomaszyn's development strategy incorporates several concepts of farm development (fig. 1) that could be considered as models for the spatial development of territorial communities.

The community development strategy aligns with the principles of permaculture) [21] and incorporates the design of effective ecosystems characterized by diversity, stability, and natural regeneration (Innovation Farm). It emphasizes a harmonious integration of human activity with the natural landscape to ensure the sustainable provision of food (Healthy Food Farm), energy, and housing (Green Energy Farm), supports a healthy lifestyle (Health Farm), and fosters the self-sufficient development of



Fig. 1. "Five farms" of "Ostoja Natury" [23].

artistic, cultural, and spiritual needs (Culture Farm). These "Five Farms," forming a cooperative, are both innovative and compatible with traditional practices. At the same time, they are ecologically sustainable, collectively contributing to the creation of a waste-free, highly efficient ecosystem

The strategy states: "We believe that only effective business models can motivate people to change their attitudes and take a cost-effective path that is friendly to our planet and its inhabitants. Our main task is to create a program for farms with an area of fewer than 100 hectares (in Poland there are more than 700,000 of them), which will allow us to transform production from traditional to ecological, characterized by high-quality products and minimize the negative impact on the natural environment".

Coordinating spatial development plans is critical in planning. Ostoja Natury's spatial development strategy aligns with the Development Strategy of the Olsztynek municipality, adopted by the municipal council. Planned activities correspond to the strategic objective of improving the quality of life in the Olsztynek municipality while achieving individual operational goals.

The nature reserve strategy supports the strategic goal of protecting and enhancing the quality of the natural environment, including the operational goal of safeguarding natural heritage and its effective utilization for economic purposes. The village's strategy emphasizes:

"Focusing on projects aimed at protecting and restoring biodiversity while preserving or gaining a competitive advantage over other regions based on the existing ecological potential and its use in socio-economic growth processes".

In Poland, local (municipal) self-governance was

restored in 1990. On January 1, 1999, a three-tier administrative division was introduced, comprising three levels of self-governance: municipalities (gminy), counties (powiaty), and voivodeships. Currently, Poland has sixteen voivodeships, 314 counties, and 66 cities with county status, as well as 2,478 municipalities. The municipality is the primary unit of local governance, a core element of state organization. Local self-governance is a key principle in public administration, with municipalities, counties, and voivodeships tasked with performing state functions.

However, each region has unique approaches to rural development – ranging from preserving historical appearances to adopting modern technologies.

Economic sustainability and technological innovation. Spatial planning supports economic development by optimizing the natural potential of the territory, improving infrastructure, and creating jobs. This principle is consistent with SDG 8 – decent work and economic growth and SDG 9 – industry, innovation, and infrastructure, which contribute to economic productivity and innovative approaches to spatial development.

Economic sustainability directly or indirectly affects the achievement of all other goals. Each settlement can be considered as a socially constructed system of practices and organizations.

For example, the "Ostoja Natury's innovation farm" in Tomaszyn is developing precision agriculture, automation (cleaning, processing and packaging lines) and robotics (e.g. Farm Bot, Turtle Robotics), that increase the demand for specialists in IT, robotics and machine operation, creating employment opportunities in rural areas and narrows the technology gap between rural and urban communi-

ties. The farm cooperates with many enterprises for the introduction of grain, vegetable and fruit growing technologies.

Thanks to passive solar greenhouses and innovative technologies, organic plants may grow all year round. The construction of such greenhouses is described in detail in scientific literature (Solar Greenhouse, 2019) [24].

“Ostoja Natury” create a model of a self-sufficient agricultural environment where processes, machines and fertilizers support the cultivation of natural crops in accordance with all environmental standards. A team of experienced professionals develops standard solutions for organic farming in Poland and around the world.

Optimization of resources and energy efficiency. Spatial planning focuses on rational resource use, consistent with SDG 12 – responsible consumption and production, which reduces pressure on the environment and ensures sustainable development. “Ostoja Natury” green energy farm” use of renewable energy sources (sun, wind, hydropower, biogas) increases the energy efficiency, independence, profitability and sustainability of the farm, while reducing the impact of agriculture on the environment.

Energy-efficient building technologies (passive greenhouses, thermal insulation, innovative heating systems), optimized energy consumption at the industrial and domestic levels, energy management and audits, waste management, including sorting, recycling, and disposal.

Achieving synergy through the interconnectedness and complementarity of waste minimization processes creates added value for each strategy by significantly reducing operating costs (e.g. packaging made from waste mass, waste management, mechanical ventilation with heat recovery and energy production). The implementation of this strategy makes it possible to expand the area of organic production, volumes, and value, as well as to make organic food products more accessible to consumers. This, in turn, creates new jobs and improves the level and quality of life of residents.

Residential infrastructure in “smart villages” is envisioned as a waste-free, self-sufficient living environment. The goal is to create a universal design for rural farms based on the Wood100 technology introduced by Tom Holtz [30]. When combined with renewable energy sources (solar, wind, water) and infrastructure such as heat pumps and domestic wastewater treatment systems, such buildings become fully autonomous – often completely autonomous. They are self-sufficient in heat, energy and water and can recycle waste without harming the natural environment. A family house built using Wood100 technology can be assembled in record time – in just one day.

Social inclusiveness. The goal of spatial planning is to create an accessible and comfortable living environment that meets the needs of different population groups, especially children and the elderly. This is consistent with SDG 3, aimed at improving the quality of life of the community, goal 4 - education, goals 5 and 10, which are aimed at reducing inequality, including gender inequality, and goal 11, which emphasizes the development of inclusive urban and rural spaces with access to essential services for all.

For example, “Health Farm” in Tomaszyn focuses on creating a space for a healthy lifestyle and physical, mental, and emotional well-being.

The main components of Health Farm include:

- organic farming: no chemical fertilizers or pesticides;
- healthy produce: growing vegetables, fruits, greens, and other nutritious foods (Healthy food farm);
- wellness programs: sports, tourism, breathing exercises, etc;
- natural healing methods: herbal medicine, water treatments, and more;
- education: hosting lectures, workshops, and masterclasses on healthy living, sustainable farming, and balanced nutrition;
- courses on growing plants, care for the environment and energy saving;
- use of renewable energy sources (solar batteries, wind turbines, etc.);
- environmentally friendly building materials, energy-efficient construction design;
- eco-friendly environment away from city noise;
- healing effect of nature through walks, gardening, contact with animals;
- integration of agriculture and medicine, for example, the cultivation of medicinal plants or the creation of products to support health.

“Health Farm” corresponds to this concept and is an example of the formation of a modern space for a healthy lifestyle. Currently, there are more than 30 banks operating in Poland, which support the nutrition of both the elderly and adults, as well as children, for which they organize meetings, as well as social campaigns, during which Poles are encouraged to use food sparingly. The main goal is to create a completely waste-free model of food production and distribution.

Protection of cultural heritage and identity of territorial communities. The spatial development of cultural landscapes and the preservation of local identity are reflected in SDGs 4, 11 and 16, which are aimed at the study and protection of cultural objects and historical monuments, strengthening efforts to protect and preserve world cultural and

natural heritage, preserving them for future generations.

Rural landscapes are the most widespread and long-lasting forms of cultural landscapes, covering a wide range of cultures and traditions throughout the world. These landscapes are vital components of human heritage, providing multiple economic and social benefits, cultural value, and ecosystem services.

The Principles for the Conservation of Rural Landscapes as Cultural Heritage were adopted at the 19th ICOMOS General Assembly in New Delhi, India on 15 December 2017 [16].

“Ostoja Natury’s culture farm” is aimed the restoration and popularization of traditional handmade products – symbols of high quality and knowledge passed down from generation to generation. There is a tendency to return to local crafts, revival of traditional products, services and ancient professions, such as beekeeper, blacksmith, brewer, miller, carpenter. It is planned to build a nature trail with an educational purpose – as an interesting way of spending time for different age groups and an attractive source of knowledge about nature and culture. Such eco-trails or routes can be arranged in each community to study the territory, its natural potential and opportunities for spatial development.

Green Infrastructure and Ecological Networks. Spatial planning is designed to regulate the interaction between society and the environment, the same tasks are faced by the SDGs, particularly 3, 6–9, 13, 15 and 17. Without considering environmental factors, it is impossible to ensure a healthy lifestyle, build a safe infrastructure, ensure energy availability, etc. For example, the organization of green infrastructure in settlements and nature conservation areas improves local conditions while contributing to global adaptation to climate change and protection of natural resources.

Special attention should be paid to SDG 6, which aims to achieve integrated management of water resources at all levels by 2030, including transboundary cooperation. This goal also includes protecting and restoring ecosystems such as mountains, forests, wetlands, rivers, aquifers, and lakes.

In the European Union, considerable emphasis is placed on the spatial development of transnational nature conservation areas and the connection of ecological networks of individual countries into a pan-European ecological network.

Case Study. The Danube River Protection Convention (DRPC) serves as the main legal framework for cooperation and management of transboundary waters in the Danube River Basin.

The International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR) was also established under this convention. In 2010, the European

Commission, alongside Danube region countries and stakeholders, adopted the EU Strategy for the Danube Region (EUSDR) – one of the EU’s four macro-regional strategies, approved by the European Council in 2011 [11]. The strategy involves 14 countries and develops 12 thematic priority areas, each coordinated by two member states.

In 2014, a nonprofit association, DANUBEPARKS (Danube Parks) was founded to promote partnerships among protected areas in the Danube region. This association provides a platform for coordinated, transnational collaboration and joint initiatives among protected area administrations along the Danube. Its mission is to conserve, develop, and restore the Danube River and its main tributaries, as well as surrounding wetlands. The organization focuses on five areas: Danube valley *morphology, habitat preservation, biodiversity conservation, monitoring, and tourism* (DANUBEPARKS Association) [4].

Morphology of the Danube Valley. The natural dynamics of rivers serve as a crucial factor in maintaining biodiversity and landscape diversity, encompassing habitats and species. Significant hydrological events, such as large floods and periods of low water levels, continuously reshape the morphology of the valley, leaving imprints in the form of steep banks, gravel islands, and sandy shores. The floodplain zone is highly dynamic; the force of water can drastically alter its structure in mere days. As a functioning system, the river provides natural flow numerous services to both nature and human communities, including fertile soils and appealing recreational sites. However, over the past 150 years, the natural flow of the river has undergone substantial transformations. Hydropower plants disrupt natural connectivity, embankments, and straightened channels disconnect floodplain zones from the river. The necessity to restore these altered sections has become evident to preserve the unique ecosystems of the floodplains and wetlands along the river's course.

Habitats. The interconnection between natural systems and the species that inhabit them is dynamic and essential for their migration and survival. Uninterrupted links between similar habitats, free from anthropogenic infrastructure, are critical. Given that the Danube Valley's ecosystems span multiple countries, fostering international cooperation in conservation is imperative to safeguard not only aquatic and semi-aquatic habitats but also river-associated forests, meadows, and even dry habitats. Riparian forests represent vital habitats that perform numerous functions for both flora and fauna as well as for human communities.

Over the past century, around 90% of the Danube's original wetlands have been lost due to human

activities. Today, most remaining floodplain forest complexes are designated as protected areas. To combat the isolation of wildlife populations, measures are required to create a continuous ecological network. Monitoring the state of riparian forests along the Danube, using Geographic Information System (GIS) data and remote sensing, forms the foundation for strategic documents focused on protecting the riparian forest corridor. Approximately 5,000 animal species and 2,000 plant species inhabit the Danube Basin.

The development of conservation strategies employs the concept of "umbrella species" – those most sensitive to habitat conditions. By addressing the needs of these species, the habitats of numerous other species are simultaneously preserved.

Monitoring. The primary goal of monitoring is to gather information and build databases to inform conservation and habitat restoration efforts. Coordinated data collection is necessary to evaluate the state of the entire river ecosystem, which is a core function of the ecological network. This approach helps assess the overall effectiveness of conservation measures for the Danube River.

Tourism. Protected areas along the Danube River feature unique natural landmarks that attract nature enthusiasts. The region's rich natural heritage allows conservation areas to serve educational purposes, raising awareness among visitors and local populations about the value and functions of biodiversity-rich habitats. Eco-tourism in protected areas is inherently educational, promoting sustainable development. It can also enhance local economies (particularly in rural areas) by creating income-generating opportunities while safeguarding valuable recreational zones for local residents.

A critical task for conservation management involves regulating visitor flows to balance access to the area's attractions with environmental protection. Visitor management strategies, such as providing information, maps, rules, and marked trails, achieve this. The DANUBEPARKS network plays a dual role: it enables members to exchange best practices through workshops and training programs while collaborating on developing tourism products and marketing, especially for international visitors and tour operators.

In 1970, the Danube Delta National Institute for Research and Development (DDNI) was established to conduct fundamental and applied research [12]. Its primary aim is to support scientific management of the biosphere reserve and other wetlands of national and international significance, with a particular focus on preserving geo-diversity and biodiversity while promoting sustainable resource use.

The Ukrainian section of the Danube Delta is also an integral element of the Vylkovo Territorial

Community's spatial planning framework.

Restoration of Geodiversity. Among spatial planners, debates often arise regarding the potential for restoring geo-diversity. It is widely acknowledged that once lost or severely degraded, natural landscapes cannot be fully restored to their original state. However, there is evidence of successful restoration of regulated river channels by reconstructing man-made structures to allow for natural water flow (Darby S., Sear D., 2008) [12]. Over time, rivers have been shown to reclaim natural forms in artificially created meanders. River restoration benefits both geo-diversity and biodiversity, as demonstrated in the case of Swindale Beck in Cumbria, England, where salmon and trout have returned to spawn in redeposited gravel beds in re-meandered sections of the river, where the flow has slowed.

Participation and governance. The involvement of local communities in strategic planning is an important tool for achieving all the goals of sustainable development. Participation and governance are important aspects of sustainable development, which involve the active participation of citizens in decision-making processes at all levels, from local to national. This approach allows for effective management that meets the needs of all segments of the population and considers the interests of various social groups. Participatory governance ensures transparency, accountability and inclusiveness in political, economic, environmental and social processes. Inclusiveness in decision-making involves the involvement of citizens in the discussion and decision-making related to the development of their communities, society and the country in general. This may include public hearings, consultations, surveys, and participation in local and national advisory bodies. In this way, the community can actively influence the formation of policies in such areas as ecology, economy, health care and education. Providing citizens with access to the necessary information is an important element of participatory management. The use of modern digital technologies, such as online platforms for gathering public opinion and electronic petitions, allows to simplify the process of interaction with authorities and contributes to more transparent management. It also helps to increase the level of awareness among citizens regarding various aspects of public policy and management decisions. Participatory is closely related to decentralization, which allows more authority to be transferred to the local level, creating conditions for a more flexible response to community needs. Local authorities have a better understanding of local problems and needs, which stimulates the development of public responsibility and activates participation in spatial planning. In addition, participatory governance is important in the field of natu-

ral resource management, such as water resources, forests, agricultural land, where the community actively participates in the implementation of sustainable development goals.

It is important to involve children in the planning activities of children and youth. This allows organizing public spaces that meet their needs. Engaging children in dialogue can take many forms, from interactive design sessions to surveys and field observations. Schools can also integrate spatial planning into the curriculum by encouraging students to participate in local projects. This approach not only empowers children, but also fosters a sense of responsibility for the environment, and the future development of cities will reflect their needs and aspirations. Thus, the process of creating child-friendly settlements is complex and involves considering the child's needs at every stage of the urban planning process. Living environments should prioritize the health and well-being of the youngest residents, from play and learning to mobility and safety, with an emphasis on public spaces, schools and housing that meet the needs of children. Spatial planning that considers the needs of children is not only morally necessary, but also strategically justified, as it promotes social cohesion and sustainable growth. (Designing Child Friendly Cities, 2024) [10].

Public participation in Environmental Impact Assessment and Strategic Environmental Assessment is important to identify the environmental impact of plans and projects at an early stage. Participatory planning uses modern digital tools and technologies for community engagement, interactive modeling and virtual meetings that promote transparency and openness and motivate citizens to collaborate in the spatial planning process.

Results. Every country has its structure and organization of spatial planning systems and a national spatial strategy for sustainable development. Strategic spatial planning focuses on medium- and long-term development goals, including the development of plans, programs, and projects for shaping land-use policies, spatial organization, zoning, measures for engineering protection, prevention of natural or anthropogenic disasters and risks, implementation of local spatial plans for residential and urban development, urban regeneration programs, and the preservation of natural and cultural heritage.

Regulatory spatial planning addresses the general use of land in urban and rural areas, aligning sustainable development with social, economic, and environmental objectives. Its goal is to ensure sustainable economic growth, increase employment, enhance territorial and social cohesion, protect landscapes and biodiversity, and ensure efficient use of natural resources.

In Ukraine, spatial planning has become partic-

ularly relevant in the context of decentralization. This is not only due to the transfer of powers to local governments and the development of spatial development strategies but also because communities can choose their way and create various types of communities (urban, rural, or settlement). Consequently, each rural council had the opportunity to become a hub for a territorial community or choose a new center for spatial development, whether a city, town, or village.

The roles of these new centers have also evolved. They are now responsible for ensuring the balanced spatial development of the entire community's territory, which varies significantly in scale. For instance, the Yemilchynska Territorial Community in Zhytomyr region encompasses 72 settlements with a population exceeding 21,000, whereas one of the smallest rural communities, Matusivska in Cherkasy Region, consists of just two villages.

Such uneven distribution of territory, population, levels of economic development, and natural capital among newly created administrative units raises numerous methodological questions about optimal planning decisions and the feasibility of implementing local development projects. Additionally, new urban-rural connections have emerged, emphasizing joint spatial development plans.

Based on the results of the already passed stage, it becomes clear that no government strategy or policy can influence the real development of territories in the same way as the active and responsible position of local communities.

Initiative, the use of innovative technologies, the professionalism of local authorities and the general education of citizens are the tools that can quickly distinguish a community and make it competitive.

Among the modern challenges of territorial communities are demographic changes (population aging, negative natural growth, migration), economic challenges (decline in agricultural production, unemployment), environmental problems (pollution, loss of natural resources, climate change).

The purpose and task of strategic spatial planning is to ensure balanced spatial development through the support of agricultural activity and economic development, functional zoning of the territory, development of infrastructure, in particular transport, social, tourist, information, preservation of natural and cultural heritage, improvement of the quality of services, etc.

Currently, strategic planning of smart rural areas is gradually being implemented in Ukraine, especially this applies to practices of precision agriculture, the purpose of which is sustainable agriculture, preservation of soil fertility, increase in yield, preservation of ecosystems, biodiversity, prevention

of adverse climate changes, development of export potential, opening of sales markets in the EU. The main principles are the use of cover crops, expansion of crop rotation, minimization of tillage, and optimization of costs. For this purpose, measures such as analysis of the soil, the state of the field, the presence of unfavorable processes, revision and expansion of crop rotations, calculations of crop sowing rates, optimization of resources, and innovative methods of field cultivation are carried out. As a result, in the 3rd year, the profit increases by 20%, the amount of biomass increases by half, and resource costs decrease by 15%. For example, great water savings when watering with agricultural drones: for watering a field of 1000 hectares, agricultural drones use 5-7 cubic meters of water per irrigation cycle, which saves 93-97% of water compared to self-propelled sprayers that use 100-200 cubic meters of water. With the help of agricultural drones, desiccation is also carried out – the process of removing excess moisture from the soil to prevent the spread of diseases. Some farms are planting plant seeds with the help of drones, creating maps for differentiated applications of fertilizers and spraying of fields. Mapping land resources, monitoring and evaluating the productivity of different types of soils, considering their chemical composition, structure, moisture level and other factors, allow GIS analysis to predict the yield of various crops under certain conditions. Long-term observations of changes in temperature, precipitation and soil moisture help to develop adaptation strategies for farmers and rural communities, to adapt agricultural crops to climate change. Spatial models of climate change, created based on GIS data, help to predict the potential impact of climate on different regions, which prevent adverse processes.

In the summer of 2024, independent consultants and experts from the USA, Germany and New Zealand visited several farms in Ukraine. In the format of an agro-consilium, scientists studied soils, discussed agronomic problems and developed strategies for their control and management. A detailed survey of soil layers, biota, underground and above-ground parts of plants was conducted. Foreign consultants shared the experience of advanced Western technologies, methods of adapting them to modern Ukrainian conditions, and offered practical recommendations for improving technological maps in farms. Over-compaction of the soil due to the use of heavy machinery, uncontrolled use of herbicides and other plant protection products, cultivation of monocultures, which destroys the biota of the soil and affects the yield, are among the shortcomings identified in agricultural farms. Therefore, it is recommended to switch to permaculture and organic farming, growing organic products that meet European

eco-standards. For example, "Poltava-sad" LLC confirmed the certificate of the international standard IFS FoodVersion 6, and also received the certificate of the international standard Global GAP, which shows that the products are not only of high quality, but also safe for use. The main difference from other Global GAP standards is that it assesses not only the safety of the grown products themselves, but also the safety of the entire production cycle, starting with the seed material and ending with the finished product.

The Role of Education in Spatial Planning. A critical component of sustainable community development is the training of specialists in spatial planning. In Ukraine, several higher education institutions offer programs in territorial planning, including traditional universities, specialized institutions, and even pedagogical universities, which are not traditionally associated with spatial development.

The preparation of specialists in such a complex field should be based on three fundamental pillars: natural sciences (geography and ecology), law, and technology. These interdisciplinary approaches are exemplified at institutions such as Taras Shevchenko National University of Kyiv, V.N. Karazin Kharkiv National University, and Kyiv National University of Construction and Architecture.

The Department of Earth Science and Geomorphology at Taras Shevchenko National University of Kyiv, within the framework educational program "Soil Science, Land Resource Management, and Territorial Planning" undergraduate students acquire interdisciplinary knowledge necessary for strategic planning. Special attention is paid to the study of topics related to geodiversity (Gray, 2024) [14]. The geodiversity of natural objects, processes and phenomena determines the natural potential of each territory, and its effective use involves an integrated study of morphostructure, (relief and geological structure), composition rocks, soils, underground and surface waters, as well as processes that affect their formation in the form of typical and individual landscapes. It is precisely the morphological structure of the landscape that largely determines the planning structure of settlements, the combination of various functional zones and the construction of infrastructure, the need for engineering protection of the territory and many other possibilities of spatial development. Therefore, detailed landscape research with the construction of a landscape plan is a mandatory prerequisite for successful spatial planning.

Geodiversity is important for the spatial development of communities, in particular, ecological – as it is the basis for the existence of ecosystems and biodiversity (Lausch et al., 2022) [17], economic – as a georesources (building materials, minerals, water), educational, cultural and scientific – geodi-

versity is a source of knowledge about the Earth's history and natural processes, contributes to the development of geotourism and the preservation of natural heritage. The study of geodiversity is necessary for spatial planning, natural resource management and the implementation of the next Sustainable Development Goals: 9 – innovation and infrastructure, 11 – sustainable development of cities and communities, 12 – responsible consumption, 13 – adaptation to climate change, 15 – preservation of ecosystems. The implementation of these goals will allow us to comprehensively solve social problems, in particular, overcoming hunger and poverty, ensuring a healthy lifestyle (Goals 1-3).

The study of geodiversity at the Department involves a quantitative assessment of natural conditions, resources and opportunities for consumption of geosystem services. Several eco-projects have been initiated, including assessment of natural conditions, functional zoning of the territory, protection of small rivers, formation of an eco-network, development of schemes of nature routes, etc. All these topics are relevant for the sustainable spatial development of communities. For example, geotourism is an important tool of local and regional development, which directly depends on geodiversity, as it allows tourists to visit and learn about different natural and cultural landscapes. It is necessary to be able to create a high-quality tourist product in territorial communities, which will include the laying of nature routes, the formation of tourist infrastructure, the organization of various events - cultural, artistic, tourist, sports, educational, scientific, etc., which are based on the geographical diversity of the territory and contribute to its sustainable development. By creating such destinations, each community can influence regional development.

The training of specialists in the field of territorial, in particular landscape, planning has begun at the Department of Physical Geography and Cartography of V. N. Karazin Kharkiv National University. The main emphasis in the preparation of masters under this program is made on the problems of nature management and restoration of territories, which apparently will be relevant for the eastern and southern regions of our country for a long time.

The program has been developed by integrating advanced European experience, primarily from Germany, in landscape planning, along with the research conducted by specialists from the Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine. These experts developed and visualized landscape plans for regional and district levels, as well as for community: the Cherkasy Oblast, Kaniv District, and Stepanetska Territorial Community (Landscape Planning in Ukraine, 2014) [20].

This educational program aims to train highly qualified specialists equipped with comprehensive knowledge for creating strategic development documents for territories. Its effectiveness is demonstrated through the development of comprehensive spatial development plans for the Rohanska and Pischynska territorial communities in the Kharkiv region (Figures 2 and 3).

The method of identifying nature conservation objects and providing them with legal protection is important. Combining nature conservation areas into a single ecological network is a component of spatial planning and land resource management. Unfortunately, spatial conflicts often arise when the law is ignored, or economic factors are given priority over environmental ones. For example, for several years in a row, a conflict situation has been going on in Ukraine related to the construction project of the ski

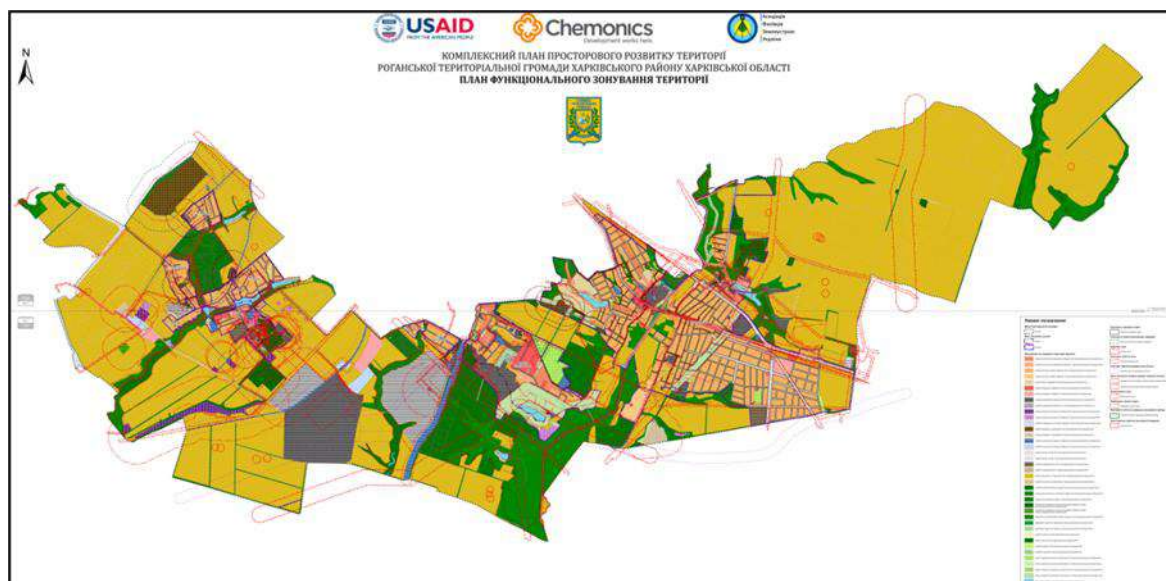


Fig. 2. "Plan of functional zoning of the territory", the fragment of "The Comprehensive Plan of the Spatial Development of Territory of the Rohan Territorial Community of Kharkiv region"



Fig. 3. Methods of map series production for a local social-economic development strategy (a case study of Pischyn urban village) [24]

resort “Svydovets”, the construction of which threatens the unique protected landscapes of the Ukrainian Carpathians, including the primeval forests of the Svydovets massif, which is a UNESCO World Heritage Site. Such objects should be included in the national/regional system of spatial planning and protected by the norms of environmental law. Another problematic aspect of nature management in Ukraine is the issue of irregular ownership of land. Thus, there are hundreds of cases of illegal expropriation of nature reserve fund lands for indus-

trial, agricultural, and private sector objects being implemented in the regional prosecutor's offices of Ukraine. As the experience of the cooperation of regional prosecutors with Kharkiv cartographers, who annually conduct dozens of examinations of the illegal alienation of PZF lands, shows that this is often not the result of criminal conspiracy or corruption schemes, it is the result of unsystematic land use, lack of coordination of economic sectors, irresponsibility of local authorities in the distribution of land, and in general - lack of long-term, strategic

plans for the territorial development of territories at the level of communities, and then - of districts, regions and the country as a whole.

In 2023, the Ukrainian government proposed adding 16 more cultural and natural sites to the list of World Heritage sites, and in the future this list may be expanded at the initiative of territorial communities, which in this way can popularize their natural and cultural heritage, while receiving sustainable economic benefit.

Conclusions. Strategic spatial planning is an important tool for achieving the Sustainable Development Goals, covering numerous interrelated topics that require interdisciplinary analysis. Key among these topics are: improving land use systems, promoting economic sustainability and technological innovation, optimizing resources and increasing energy efficiency, promoting social inclusion, preserving the cultural heritage and identity of territorial communities, developing green infrastructure and ecological networks, involving the public in planning and management processes.

International projects such as "smart cities" and "smart villages" demonstrate how a new nature of the relationship between urban and rural areas is being formed, influenced by numerous factors, including the introduction of a scientific approach to spatial planning and innovative technologies, which not only create alternative employment opportunities, but also significantly improve social living conditions, provide a quality environment, mobility and communication, promote recreation and provide access to diverse and healthy food systems. The example of Tomasini's "smart village" illustrates how sustainable development can be achieved if the right strategy is chosen, which is based on natural potential, innovative technologies and high public activity. The idea of forming rural "socio-cultural spaces" that increasingly compete with overpopulated urban areas deserves special attention.

To develop a strategy for the spatial development of territorial communities, it is important to apply the main tools and methods of spatial planning and, first of all, scientific studies of the natural potential of the territory and an objective assessment of its ecological state, in particular, the study of natural risks, extreme weather phenomena (land-

slides, floods, etc.), which must be taken into account when developing spatial planning strategies. The determination of priorities for the spatial development of territories is based on the data of integrated natural science studies.

GIS is an integral tool for analyzing and visualizing spatial data, mapping resources and assessing their condition. The planning structure, functional zoning, determination of the optimal combination of residential, industrial and landscape-recreational zones, planning of green infrastructure and eco-networks and many other tasks in spatial planning are performed with the help of GIS tools. Currently, a national infrastructure of geospatial data is being formed in Ukraine, aimed at meeting the needs of society in all types of geographic information and for integration into the global and European infrastructure of geospatial data. Land and urban planning cadastres provide collection, systematization and analysis of data on land management and urban planning activities, infrastructure, etc. These data are necessary for the development of comprehensive plans for the spatial development of territorial communities and their coordination at the regional level.

Geospatial modeling and forecasting are tools that allow you to compare different scenarios of territorial development based on databases and trends.

Strategic environmental assessment allows to determine environmental priorities. Each of the local development projects must be evaluated from the point of view of its impact on the environment - from individual initiatives to the development of a Comprehensive Plan for the Spatial Development of the Territorial Community.

Digital platforms and smart technologies expand the possibilities of managing territories in real time, for example, monitoring and controlling the condition of agricultural lands, tracking climate changes and their impact on ecosystems.

The successful integration of these tools will allow balancing the economic, ecological and social aspects of territorial development and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals, and the training of spatial planning specialists will contribute to increasing the level of awareness and skills in this area.

Bibliography

1. Ачкасов, А., Попович, Н., Пересацько, В., Гордєзіані, Т. Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довоєнні реалії й післявоєнні перспективи. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», вип. 60, 2024, с. 124-136. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09>
2. Всеукраїнська асоціація органів місцевого самоврядування «Всеукраїнська асоціація громад» <https://communities.org.ua/about-the-association/>
3. Асоціація міст України. Отримано з <https://www.auc.org.ua/>
4. Association DANUBEPARKS. (n.d.). Отримано з <https://danubeparks.org/association>

5. Baumgart, A., Vlachopoulou, E. I., Vera, J. D. R., et al. (2021). Space for the Sustainable Development Goals: Mapping the contributions of space-based projects and technologies to the achievement of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Sustainability in Earth Systems*, 4(6). <https://doi.org/10.1186/s42055-021-00045-6>
6. Міністерство розвитку громад та територій України. Отримано з: <https://mtu.gov.ua/en/content/hto-mi-e.html>
7. Mollison, B., & Slay, R. M. (2019). Introduction to permaculture. *Permaculture in Ukraine*. Отримано з: <https://www.permaculture.in.ua/index.php/uk/navchannia-ua/pereklady-knyh-ua/17-books/51-introduction-to-permaculture-ua>
8. Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
9. Darby, S., & Sear, D. (2008). *River restoration: Managing the uncertainty in restoring physical habitat*. Chichester, UK: Wiley.
10. Designing Child-Friendly Cities. (2024). Отримано з <https://urbandesignlab.in/designing-child-friendly-cities/>
11. Дунайський біосферний заповідник. Офіційний сайт: https://www.dbr.org.ua/search/label/about_ua
12. European Union. (n.d.). EU Strategy for the Danube Region. Отримано з <https://danube-region.eu/>
13. EIP-AGRI Project Database. (n.d.). Отримано з https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects_en
14. Gray, M. (2024). Case studies associated with the 10 major geodiversity-related topics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 382(20230055). <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0055>
15. Group on Earth Observations (GEO). (2020). FAQ: What is Earth Observation? Отримано з https://www.earthobservations.org/q_faq.html
16. ICOMOS. (2017). Principles for the conservation of rural landscapes as heritage. Отримано з https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/GA2017_6-3-1_RuralLandscapesPrinciples_EN_adopted-15122017.pdf
17. Lausch, A., et al. (2022). Remote sensing of geomorphodiversity linked to biodiversity—Part III: Traits, processes and remote sensing characteristics. *Remote Sensing*, 14(2279). <https://doi.org/10.3390/rs14092279>
18. Кубах, С. та ін. Розробка комплексних планів: посібник для громад. Київ, 2022, 87 с. URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/817/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_%D0%B3%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B4.pdf
19. Кубах, С. та ін. Стратегічна екологічна оцінка комплексного плану: практичний посібник. Київ, 2022, 106 с. URL : https://decentralization.ua/uploads/library/file/819/SEO_ready.pdf [in Ukrainian].
20. Mollison, B., & Slay, R. M. (2019). Introduction to permaculture. Отримано з <https://www.permaculture.in.ua/index.php/uk/navchannia-ua/pereklady-knyh-ua/17-books/51-introduction-to-permaculture-ua>
21. National Institute for Research and Development of the Danube Delta (DDNI). (n.d.). Отримано з <http://ddni.ro/wps/>
22. Gallent, N., Hamiduddin, I., Juntti, M., Kidd, S., & Shaw, D. (2015). *Introduction to rural planning: Economies, communities and landscapes* (2nd ed.). London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315749280>
23. Ostoja Natury: <https://ostojanatury.pl/our-projects/>
24. Попович, Н. Методика розробки серії карт для стратегії соціально-економічного розвитку локального рівня (на прикладі селища Пісочин). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, (25), с. 45-49. <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/9089>
25. Solar_Greenhouse. (2020). Effect of North Wall Materials on the Thermal Environment in Chinese Solar Greenhouse. Отримано з <https://www.researchgate.net/publication/338359854>
26. Smart Rural 21 Project. (n.d.). Отримано з <https://www.smartrural21.eu/villages/>
27. Sustainable Development Report. (2024). Отримано з <https://files.unsdsn.org/sustainable-development-report-2024.pdf>
28. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). (n.d.). Space Supporting the Sustainable Development Goals. Отримано з <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/space4sdgs/index.html>
29. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Отримано з <https://sdgs.un.org/goals>
30. United States Agency for International Development (USAID) Agriculture and Rural Development Program (AGRO) <https://www.usaid.gov/uk/ukraine/economic-growth>
31. Wood100. (n.d.). Wood is 100% wood. Отримано з <https://www.thoma.at/en/>
32. Закон України “Про національну інфраструктуру геопросторових даних”. Отримано з: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Achkasov, A., Popovych, N., Peresadko, V., & Gordeziani, T. (2024). Geoinformation support of geoportals of territorial communities: Pre-war realities and post-war prospects. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology,"* (60), 124–136. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09> [in Ukrainian].
2. All-Ukrainian Association of Communities <https://communities.org.ua/about-the-association/>
3. Association of Ukrainian Cities. (n.d.). Retrieved from <https://www.auc.org.ua/>
4. Association DANUBEPARKS. (n.d.). Retrieved from <https://danubeparks.org/association>
5. Baumgart, A., Vlachopoulou, E. I., Vera, J. D. R., et al. (2021). Space for the Sustainable Development Goals: Mapping the contributions of space-based projects and technologies to the achievement of the 2030 Agenda for Sustainable Development. *Sustainability in Earth Systems*, 4(6). <https://doi.org/10.1186/s42055-021-00045-6>
6. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine <https://mtu.gov.ua/en/content/hto-mi-e.html>
7. Mollison, B., & Slay, R. M. (2019). Introduction to permaculture. *Permaculture in Ukraine*. Retrieved from <https://www.permaculture.in.ua/index.php/uk/navchannia-ua/pereklady-knyh-ua/17-books/51-introduction-to-permaculture-ua>
8. Brilha, J. (2016). Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: A review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
9. Darby, S., & Sear, D. (2008). *River restoration: Managing the uncertainty in restoring physical habitat*. Chichester, UK: Wiley.
10. Designing Child-Friendly Cities. (2024). Retrieved from <https://urbandesignlab.in/designing-child-friendly-cities/>
11. Danube Delta Biosphere Reserve. (n.d.). Official website. Retrieved from https://www.dbr.org.ua/search/label/about_ua
12. European Union. (n.d.). EU Strategy for the Danube Region. Retrieved from <https://danube-region.eu/>
13. EIP-AGRI Project Database. (n.d.). Retrieved from https://eu-cap-network.ec.europa.eu/projects_en
14. Gray, M. (2024). Case studies associated with the 10 major geodiversity-related topics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 382(20230055). <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0055>
15. Group on Earth Observations (GEO). (2020). FAQ: What is Earth Observation? Retrieved from https://www.earthobservations.org/g_faq.html
16. ICOMOS. (2017). Principles for the conservation of rural landscapes as heritage. Retrieved from https://www.icomos.org/images/DOCUMENTS/Charters/GA2017_6-3-1_RuralLandscapesPrinciples_EN_adopted-15122017.pdf
17. Lausch, A., et al. (2022). Remote sensing of geomorphodiversity linked to biodiversity—Part III: Traits, processes and remote sensing characteristics. *Remote Sensing*, 14(2279). <https://doi.org/10.3390/rs14092279>
18. Kubakh, S. & others. (2022). Development of comprehensive plans: a practical guide for communities. Kyiv, 87. URL : <https://decentralization.ua/uploads/library/file/817/> [in Ukrainian].
19. Kubakh, S. & others. (2022). Strategic environmental assessment of a comprehensive plan: a practical guide. Kyiv, 106. URL : https://decentralization.ua/uploads/library/file/819/SEO_ready.pdf [in Ukrainian].
20. Mollison, B., & Slay, R. M. (2019). Introduction to permaculture. Retrieved from <https://www.permaculture.in.ua/index.php/uk/navchannia-ua/pereklady-knyh-ua/17-books/51-introduction-to-permaculture-ua>
21. National Institute for Research and Development of the Danube Delta (DDNI). (n.d.). Retrieved from <http://ddni.ro/wps/>
22. Gallent, N., Hamiduddin, I., Juntti, M., Kidd, S., & Shaw, D. (2015). *Introduction to rural planning: Economies, communities and landscapes* (2nd ed.). London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315749280>
23. Ostoja Natury: <https://ostojanatury.pl/our-projects/>
24. Popovych, N. V. (2017). Methods of map series production for a local social-economic development strategy (a case study of Pesochin urban village). *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography: Collected Scientific Works*, Kharkiv: Kharkiv National University, (25), 45–49. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/9089> [in Ukrainian].
25. Solar_Greenhouse. (2020). Effect of North Wall Materials on the Thermal Environment in Chinese Solar Greenhouse. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/338359854>
26. Smart Rural 21 Project. (n.d.). Retrieved from <https://www.smartrural21.eu/villages/>
27. Sustainable Development Report. (2024). Retrieved from <https://files.unsdsn.org/sustainable-development-report-2024.pdf>
28. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA). (n.d.). Space Supporting the Sustainable Development Goals. Retrieved from <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/space4sdgs/index.html>
29. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals>
30. United States Agency for International Development (USAID) Agriculture and Rural Development Program (AGRO) <https://www.usaid.gov/uk/ukraine/economic-growth>
31. Wood100. (n.d.). Wood is 100% wood. Retrieved from <https://www.thoma.at/en/>
32. Law of Ukraine “On National Geospatial Data Infrastructure”. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20#Text>

Стратегічне просторове планування територіальних громад для досягнення Цілей сталого розвитку

Сергій Бортник^{1,2}

професор, Інститут географії та наук про навколишнє середовище,
¹ Університет Яна Кохановського в Кельцах, Кельце, Республіка Польща;

д. геогр. н., професор, зав. кафедри землезнавства та геоморфології,
² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;

Тетяна Лаврук²

к. геогр. н., доцент, кафедра землезнавства та геоморфології;

Віліна Пересацько³

д. геогр. н., професор, кафедра фізичної географії та картографії,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна

Стратегічне просторове планування в Україні здебільшого орієнтоване на економічні аспекти, тоді як екологічні наслідки запланованої діяльності часто залишаються непередбачуваними та можуть бути загрозливими для природної та культурної спадщини. Це пояснюється, зокрема, недостатньою кількістю підготовлених спеціалістів для планування сталого просторового розвитку. Особливо важливо інтегрувати наукові природничі дослідження в освітні програми підготовки фахівців з просторового планування, які включають вивчення георізнюманіття, еволюції природних і культурних ландшафтів, методик створення природоохоронних територій, формування екомереж, а також впровадження інноваційних технологій у землекористування та різні галузі народного господарства. Такі дослідження є основою для розробки стратегії розвитку громади та досягнення Цілей сталого розвитку (ЦСР), ефективного управління територіями та успішних практик просторового планування. Метою статті є розглянути стратегічне просторове планування як сучасну міждисциплінарну галузь, яка інтегрує соціальні, економічні та екологічні аспекти сталого просторового розвитку. Особливу увагу приділено підготовці фахівців у галузі просторового планування на бакалаврському і магістерському рівнях та інтеграції природничих наукових досліджень у практику просторового розвитку та розроблення стратегії і комплексних планів просторового розвитку громад. Проаналізовано міжнародні проекти, зокрема Спільну аграрну політику ЄС, ініціативу Smart Village та транскордонне управління басейном Дунаю. Досліджено практичні аспекти українського досвіду, зокрема впровадження точного землеробства, створення нових природоохоронних об'єктів та екомережі, розвиток ландшафтно-рекреаційних зон та геотуризму. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методології стратегічного просторового планування на місцевому рівні. Узагальнений міжнародний досвід стане цінним для формулювання довгострокових цілей розвитку громад та реалізації конкретних заходів, таких як інноваційні системи землекористування, впровадження відновлюваних джерел енергії, створення інклюзивних громадських просторів, охорона природної й культурної спадщини, міжнародне природоохоронне співробітництво.

Ключові слова: стратегічне просторове планування, георізнюманіття, екомережа, природна й культурна спадщина, міжнародний досвід, територіальні громади України.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 4 жовтня 2024 р.

Прийнята 20 листопада 2024 р.

Urban integration of forced migrants: lessons from Canada and Ukraine

Daria Venhryn

PhD student, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,
V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: daria.venhryn@student.karazin.ua,  <http://orcid.org/0000-0001-8276-2911>

ABSTRACT

Statement of the problem. Active hostilities began in Ukraine, leading to the imposition of a state of war in the country on 24 February 2022. This has resulted in a mass displacement, with citizens leaving their homes in search of safety and protection. Currently, 3.6 million people have left Ukraine, while 6.5 million people are internally displaced. These unprecedented migration flows have created immense challenges for both the displaced populations and the host communities that strive to accommodate them. In the face of extraordinary challenges, Canada was one of the first countries to come to Ukraine's aid. The Canadian government facilitated the visa process for Ukrainians, allowing them to migrate to Canada.

The aim of the work is to analyze and evaluate the impact of migrants on urban development, focusing on the cases of Ukraine and Canada.

Methods. In the course of the research and preparation of the article, the author used methods of analysis and synthesis, comparative-geographical and comparative-historical approaches, as well as the method of generalization.

Results. This article delves into two critical aspects of Ukrainian migration during the ongoing war: internal displacement within Ukraine and international migration to Canada. We analyze the settlement patterns of migrants and the pressure they exert on cities. The geographical distribution is diverse. IDPs settle both in cities near the frontlines and in western regions in Ukraine. Despite all the risks, Kyiv the capital city of Ukraine, remains highly attractive. When relocating to Canada, migrants are guided by two factors: either having acquaintances, relatives, or friends already living there, or simply choosing a well-known large city. As research indicates, various sectors of urban infrastructure and services face challenges and opportunities under the influence of migration. Canada demonstrates effective integration through its well-developed laws, inclusive policies, and support systems that protect migrants' rights, fight discrimination, and provide essential services. The Ukrainian diaspora plays a significant role in this process by helping newcomers adapt. Ukraine's experience with internal migration caused by armed conflict shows the country's challenges in managing large-scale resettlement. The lack of housing, jobs, and social services pushed local authorities to respond quickly to the situation and learn from the practices of other countries. Our analysis underscores the need for strategic planning and investment to ensure sustainable urban development in the face of large-scale migration. Understanding the implications of these movements is essential for building resilient communities and addressing the complex challenges posed by displacement.

The novelty. For the first time, the readiness of Canadian and Ukrainian cities to accommodate migrants was compared. Furthermore, the study analyzed how various sectors of urban infrastructure and services adapt to challenges and take advantage of opportunities created by migration.

Keywords: urban integration, migrants, city, displaced Ukrainians, Canada, Ukraine, war, forced migrants.

In cites: Venhryn Daria. (2024). Urban integration of forced migrants: lessons from Canada and Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 137-143. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-11>

Introduction. Millions of people in Ukraine have abandoned their homes due to the war. Some have relocated within the country, while others have gone abroad. Certain individuals moved temporarily and have already returned to their permanent places of residence, while for some, the question of departure may arise later. All these forms of migration create a range of problems both within the country and abroad. Population migration is an integral component of the demographic situation [3].

However, it is precisely uncontrolled population migration processes that can fundamentally alter the population quantity and distribution density, the age and gender structure, which leads to changes in family and marriage indicators, and in turn, contributes to a decline in population natural growth and national aging, influencing the distribution characteristics of the country's labor resources, ethnic composition, and other indicators [12]. Un-

controlled mass migrations can negatively affect the economies of specific nations, the development of industries and agriculture, lower the level of culture and science, alter the national population composition [4].

Uncontrolled migration was observed within the territory of Ukraine with the onset of the war. People abandoned their homes and haphazardly sought safe places to live. Consequently, western Ukrainian regions became inundated with migrants from the eastern areas, and neighboring European countries of Ukraine also faced significant impacts, resulting in a range of social issues. In contrast, a different situation unfolded in Canada. The country places a substantial emphasis on immigration to fill the economic gap caused by the retirement of the baby boomer generation. Last year, Canada welcomed 405,000 permanent residents, the highest number in its history. Another distinctive feature of

Canada compared to other Western nations lies in its focus on economic immigration. About half of the arrivals obtain residency permits based on their professional skills, rather than family reunification. Therefore, Canada was not only prepared to accommodate such a large number of Ukrainians, but also invested in the endeavor.

More than half of the world's population resides in urban areas [14]. Among migrants, the notion that cities offer a better living destination is long established [17]. This is because cities provide more opportunities for employment and social protection. Cities meet the urgent needs of migrants and respond to a range of integration challenges. Most cities experiencing significant pressure from migrants, especially refugees, understand that well-managed migration can bring not only challenges but also opportunities and initiatives that can be beneficial to the economy and society, particularly in the long term [2]. This emphasizes the significance of proactive policies and infrastructure planning to address the requirements of migrants in urban environments. I argue that comparing Canada and Ukraine underscores the significance of cities for displaced migrants, especially their ability to integrate migrants and support pathways to successful migration. By understanding these dynamics, policymakers, local authorities, and societies at large can work towards creating inclusive, resilient, and harmonious urban environments that benefit both migrants and host populations. Therefore, the research aims to identify the reasons why migrants prefer urban living and assess the impact of migration flows on cities. The scientific novelty of this study lies in the following aspects. In this article, we compare the readiness of cities to receive migrants in Canada and Ukraine. Additionally, we examine how different sectors of urban infrastructure and services encounter challenges and opportunities under the influence of migration.

This article consists of two parts: one about the migration of Ukrainians during the war and its impact on urban areas. In the first part, I provide current data on migration and analyze key trends. In the second part, I assess the challenges and consequences of people's displacement due to the full-scale war in Ukraine. The following sources of information were used in conducting the research: scientific publications, articles, statistical yearbooks, fundamental and periodical publications, as well as internet resources such as The International Organization for Migration and Immigration, Refugees and Citizenship Canada.

The migration of Ukrainians during the war.

Most internally displaced persons (IDPs) urgently relocated from the eastern and central regions of Ukraine to the Lviv, Ivano-Frankivsk, Chernivtsi,

Zakarpattia, Volyn, Rivne, Ternopil, Khmelnytskyi, and Vinnytsia oblasts with the onset of the war. Meanwhile, Kyiv, from where almost half of the residents left at the beginning of the war, became a transit point for refugees mainly from the Left Bank of Ukraine. As of January 23, 2022, 37,000 forced migrants were registered in the capital. In just the last week of April, the number of IDPs in the capital increased by over 10,000 individuals [8].

As for the western regions of Ukraine, the population in Zakarpattia oblast alone increased by almost 30% since the beginning of the war [8]. Nearly 110,000 IDPs arrived in Lviv Oblast in the first two weeks of the war. 400,000 IDPs chose Lviv Oblast as their new place of permanent residence, which requires significant additional multi-aspect efforts at the local and central levels. According to Lviv Mayor Andriy Sadovyi, 60,000 of them are already settled and are addressing issues related to work or education [19]. This means that this category of IDPs may permanently stay in Lviv and the region, and over time, they will lose their refugee status, which will have a positive impact on the demographic situation in the region. A similar situation can be observed in Chernivtsi Oblast. During the first two months of the Russian aggression against Ukraine, over 800,000 displaced persons arrived in the region, with 40,000 of them settling permanently in the regional center [19].

At the same time, important reception points for refugees from the south-eastern regions of Ukraine remain the cities of Central Ukraine. According to the UN map, there are over 1.102 million IDPs in Western Ukraine, 1.166 million in central regions, 1.2 million in the northeast of Kyiv, 551,000 in southern regions, and 1.857 million in the eastern region. For example, from the beginning of the war until mid-April 2022, 114,125 people, including 29,405 children, were evacuated through a humanitarian corridor to Zaporizhia from Donetsk and Kherson oblasts [8]. Zaporizhia continuously hosted refugees until the last displaced person. On May 3, 2022, they received and accommodated 160 civilians evacuated from Mariupol, according to "Ukrainske Radio." Even to the frontline cities of Mykolaiv and Kharkiv, forcibly displaced individuals regularly arrive. Despite all the material and technical difficulties, challenges, and increased level of danger, municipal councils provide necessary assistance to those affected by the aggressor's actions, such as temporary settlement, humanitarian aid, and register them in the district social welfare departments for social payments and compensations under the Department of Labor and Social Protection of the Population [20]. The western and central regions of Ukraine have played a critical role in welcoming and supporting IDPs, but the long-term

impact of the war on the country's demographics remains uncertain. The displacement of millions of Ukrainians is one of the most significant humanitarian crises in recent history.

More than seven million Ukrainians were forced to leave the country when Russia invaded Ukraine – 20% of the country's population [19]. While most refugees remain in Europe, many have applied for visas to come to Canada. According to the Canadian government, Canada received nearly a million applications under the Canada-Ukraine Emergency Travel (CUAET) permit and approved over 650,000, with around 150,000 Ukrainians arriving in Canada since the program's inception [7]. CUAET allows Ukrainian citizens and their family members to come to Canada for up to three years. Ukrainians can apply for a free visitor visa and an open work or study permit.

There are several reasons why Canada is popular among Ukrainian refugees. Firstly, Canada has the largest Ukrainian diaspora in the world. This means that there are more Ukrainians living outside of Ukraine in Canada than in any other country [19]. According to the 2016 census, approximately 1.36 million people, or about 4% of Canada's population, identified at least one of their ethnic origins as Ukrainian [7]. As a result, many Ukrainians have relatives or friends who can support them when they first arrive in Canada. Secondly, Canada is geographically far from Russia, and in North America, people often feel much safer than in Europe. The distance provides a sense of security for Ukrainian refugees seeking a new home. Additionally, Canada has a reputation for being a welcoming and inclusive country with a strong tradition of immigration. It has well-established systems in place to support newcomers and provide opportunities for resettlement, education, healthcare, and employment [20]. These factors contribute to Canada's appeal as a preferred destination for Ukrainian refugees.

Upon arrival in Canada, migrants from Ukraine predominantly settle in cities historically inhabited by Ukrainians, mostly in central and western Canada. Despite the forced nature of migration, resettlers take various factors into account for their move, including housing, employment, education, and more. Although a significant portion of migrants choose provinces like Ontario due to the presence of large cities like Toronto and Mississauga, where more job opportunities and housing options are available, this trend differs from the choices made by previous generations of Ukrainian immigrants. Migrants from other countries around the world also hold the belief that finding housing and employment in Toronto is not as straightforward [5]. As of today, the four most popular and densely populated cities among Ukrainians are Winnipeg (Manitoba), Saska-

toon (Saskatchewan), Calgary and Edmonton (Alberta). In these provinces, the Ukrainian population ranges from 9% to 13% of the total inhabitants [19].

After analyzing the previous information, I can conclude that the vast majority of migrants choose cities for either temporary or permanent residence. The geographical distribution is diverse. IDPs settle both in cities near the frontlines and in western regions in Ukraine. Despite all the risks, Kyiv the capital city of Ukraine, remains highly attractive. When relocating to Canada, migrants are guided by two factors: either having acquaintances, relatives, or friends already living there, or simply choosing a well-known large city [11]. The Ukrainian diaspora also plays a significant role in the province selection. Now let's take a look at the decisive factors influencing migrants' decisions to settle in cities.

Displaced Ukrainians and receiving cities: social supports, work and the possibility of return. Social Supports in Cities: comparing Canada and the Ukraine.

Migrants from Ukraine require special assistance, as they suddenly lose almost everything they had during peaceful times. Social support provided by countries is an important condition for the relocation of people from conflict zones.

In Ukraine, payments for IDPs are set at 3000 hryvnias (110 CAD) per month for children and persons with disabilities, and 2000 (73 CAD) hryvnias for other individuals. To receive this assistance, people must register as IDPs and submit applications for payments. Initially, the government announced support for all those displaced from regions where the "eSupport" program was active, but after the de-occupation of some of these regions, the principle of payment was decided to be changed. Starting from May 2022, such payments are only available to certain IDPs who cannot return to their places of residence. This includes individuals displaced from communities experiencing active armed conflict, those in occupied or besieged areas, and individuals whose housing has been destroyed or rendered uninhabitable [8].

In Canada, on the other hand, all Ukrainians who have arrived with the Canadian-Ukrainian Agreement on Emergency Travel (CUAET) permit can receive financial assistance. Adult Ukrainians will receive 3000 Canadian dollars, and children will be eligible for 1500 Canadian dollars. However, this assistance is one-time and not subject to taxation, unlike in Ukraine where citizens receive monthly payments. The Canadian government allocates these funds to help refugees settle in the country upon their arrival. Additionally, Canada provides free medical insurance for Ukrainians, which eases their adaptation in the new country and saves migrants money [7].

When financial assistance is extended to all relocated individuals, irrespective of their chosen location, cities typically offer a more extensive array of social support services. Cities typically offer a significantly greater number of volunteer organizations that provide aid to evacuated Ukrainians (offering clothing, hygiene supplies, and psychological support). There are available food banks that provide meals according to individual needs. Moreover, there are more medical facilities and educational institutions. Language courses are usually located in cities, which are an important component for a faster adaptation process [4].

Housing is one of the most critical issues for migrants. The war has caused the largest housing crisis in the history of Ukraine. Over the past year, thousands of buildings have been destroyed due to Russian attacks. According to various estimates, in 2022 alone, losses to the housing stock ranged from 135,000 to 817,000 destroyed or damaged structures. These estimates remain approximate because the active warfare conditions limit the ability to physically assess buildings. Additionally, the military actions and rocket attacks by the Russian army on civilian infrastructure continue, leading to an increase in the scale of destruction and the number of people who have lost their homes.

During the past year, the housing need has not only increased but also diversified. There is now a need for temporary crisis accommodation - for example, during the period of rebuilding damaged housing or while searching for long-term rental housing. At the outset of the full-scale invasion, local authorities converted thousands of educational, cultural, dormitory, and other communal facilities into temporary housing for those who had been displaced by the war. Such a high demand for housing has led to rising rental prices. For instance, the rental costs in the western regions of Ukraine reached record levels. Landlords speculated during the war. Inflated prices caused a significant uproar in the mass media. Consequently, landlords were compelled to lower their prices.

Contrastingly, Canada boasts a substantial housing infrastructure. Nevertheless, migrants encounter various challenges while seeking accommodation. Renting a place typically necessitates a collection of documents, including bank statements, credit history details, and, ideally, stable employment. Acquiring these documents presents a formidable hurdle for the majority of migrants. To facilitate the adaptation process, upon their arrival in Canada, Ukrainians are offered complimentary lodging in hotels with meals included. The duration of this period varies depending on the province, ranging from two weeks to a month. During this interval, migrants must secure permanent housing

[15]. A significant challenge in Canada is the cost of housing. The average price of a home in Canada has increased by over 100% in the past decade, making it difficult for many Canadians and migrants to afford to buy a home. The rising cost of housing can be attributed to various factors, including high demand in desirable urban areas, limited housing supply, and foreign investment in real estate. Additionally, the COVID-19 pandemic has further exacerbated the situation, with increased demand for larger homes as more people work remotely [9].

Overall, the role of cities and social support for migrants goes beyond just providing basic services. It encompasses creating an inclusive and welcoming environment that recognizes the contributions migrants bring to their new communities and ensures their successful integration. Effective social support not only benefits migrants but also enriches the cultural diversity and economic vitality of cities.

Employment for Displaced Migrants in Urban Settings.

Forced displaced individuals have found themselves in situations of partial or complete income loss, or they face the imminent threat of losing their income. According to the International Organization for Migration (IOM) survey conducted in May, among the IDPs who had jobs before the full-scale war, almost two-thirds (64%) lost their employment. More than half of them (52%) are actively seeking employment in the places they have relocated to. Some of the displaced individuals do not plan to seek employment in the near future, which could be attributed, in part, to the expectation of returning home and the hope for work to resume there [8].

Employment is one of the crucial elements of adaptation and an important step toward starting a new life abroad. Ukrainians who moved to Canada due to the war in Ukraine had the opportunity to obtain a CUAET (Canadian-Ukrainian Agreement on Emergency Travel) permit, which also allows them to work legally in Canada. This significantly eases the stay of Ukrainians in Canada, as each individual can find employment according to their skills, language proficiency, and education level [7].

Regardless of whether migrants are looking for housing in Ukraine or Canada, they encounter similar challenges. Migrants may face fewer competitive advantages in the job market in their new locations because, in a big city, they may lack personal contacts that could help them find paid employment. Moreover, some individuals did not have jobs before relocating and now need to search for employment to support themselves. During their job search, they may struggle with navigating where to look for work and in which direction to focus their efforts. They might also lack the skills to create a modern resume or cover letter, which can further hinder

their job search. During the initial period of migration, a significant portion of their time might be dedicated to searching for housing, resolving financial assistance issues, taking care of children and elderly relatives, and handling various practical matters. Such workers might require flexible work schedules or part-time employment options due to these responsibilities. Overall, the process of settling into a new city and securing stable employment can be demanding and challenging for migrants, especially without a robust support network or access to resources to aid them in the transition. Job searching in Canada becomes even more challenging for migrants due to language proficiency. Furthermore, the recognition of foreign qualifications poses a significant issue, particularly for professions like healthcare workers, teachers, engineers, and others [10].

Migrants have several advantages in their job search when choosing cities for living [1]. Cities are traditionally centers of industry, commerce, trade, and business, providing a wide range of job opportunities in various sectors of the economy. Due to a greater number of companies, organizations, and institutions, cities offer more possibilities for employment. Typically, urban residents require diverse services such as medical, educational, transportation, entertainment, technical, and others, which creates additional job opportunities. Cities typically have well-developed infrastructure and convenient access to transportation and communications, which increases their attractiveness to the workforce. All high-tech and innovative sectors of the economy are usually concentrated in cities, attracting professionals with specialized knowledge. Of course, this is a generalized trend, and there are exceptions when rural areas can be more active for certain reasons (such as large agricultural regions). However, overall, cities offer more opportunities for employment and career development [10].

Despite the pros and cons of looking for a job in cities, it is worth noting that it is significantly easier to find a job in Canadian cities than in Ukraine. This is due to factors such as:

- A lower unemployment rate in Canada.
- Canada's more developed and diverse economy, which offers more opportunities for migrants to find jobs that match their skills and interests.
- The availability of government programs to support migrants, which help them find jobs and adjust to their new life in Canada.
- Workplace safety. Currently, there is no safe region in Ukraine.

In conclusion, employment opportunities for displaced migrants in urban settings, particularly in Canadian cities, offer a more promising outlook

compared to their situation in Ukraine, with various factors contributing to this advantage.

Challenges and Dynamics of Return Migration.

The data on returns to Ukraine are approximate as of the end of 2022. It is challenging to assess how many people have returned or will return for the long term. However, estimating the number of those who have returned or plan to return is crucial for developing policies and measures to restore infrastructure and promote socio-economic development. The complexity of estimating the number of returnees partly lies in the fact that not everyone who enters Ukraine intends to stay in the country for an extended period. Moreover, it is more challenging to assess internal displacement within the country. Therefore, the available data on the return of IDPs to their places of origin after the onset of the full-scale war are approximate.

Among the reasons for returning, we can identify improved security in regions, reuniting with family, difficulties in finding housing or employment, temporary return to retrieve belongings, visit family, or evacuate loved ones. According to a survey conducted by the United Nations High Commissioner for Refugees (UNHCR), the majority of people returning to Ukraine are going to western Ukrainian regions and to the city of Kyiv and Kyiv region [8].

Those who maintain a connection with Ukraine are more likely to return. Therefore, it is crucial to develop policies and make decisions that would enable them to preserve that connection. Currently, this is being facilitated, in part, through the possibility of distance learning in educational institutions in Ukraine. After the full-scale war concludes and the security situation stabilizes, there will be a need to create opportunities for return, primarily concerning housing and employment issues [13].

The longer the military actions last, and the longer migrants stay in the communities that have welcomed them, the less likely they are to return to Ukraine. They will have more time and opportunities to learn the language (if necessary), find jobs, and integrate into local communities. Additionally, it may be more challenging for them to reintegrate into the community they left behind [18]. For example, Canada is launching a new pathway to permanent residency for Ukrainians who fled the Russian invasion and wish to stay in Canada with their families. The program will allow Ukrainian citizens with temporary resident status to apply for permanent residency free of charge starting from October 23, 2023. To be eligible, an individual must be a temporary resident and have one or more family members in Canada with citizenship or permanent resident status [7]. Those who start or have started pursuing secondary, vocational, or higher education in Cana-

da will have more opportunities to learn the language and integrate into local communities. Additionally, it is likely that their relatives who left with them will also stay abroad longer. It is worth noting that members of the LGBTQ+ community are likely to stay in Canada for an extended period, where the level of discrimination is lower than in Ukraine. All of the factors listed above contribute to citizens' hesitancy to return to Ukraine [16].

Urban Integration of Forced Migrants: Lessons from Canada and Ukraine.

What we learn from comparing Canada and Ukraine is that although migrants often choose cities as their preferred destination due to the prospects of community, security, and economic opportunities, the success of their integration depends on several key factors that include government policies, societal attitudes, infrastructure, and the role of local communities. The significance of this comparison lies in highlighting the importance of comprehensive migration management strategies in addressing the challenges posed by forced migration, particularly in urban areas.

In the case of Canada, its legislative mechanisms, established migration bureaucracy, and inclusive policies have allowed for the effective integration of migrants, including refugees, into urban communities. The support provided to migrants in Canada demonstrates the positive impact of well-designed policies that protect migrant rights, prevent discrimination, and provide the necessary services for successful integration. The involvement of the Ukrainian diaspora in this process further underscores the role of established communities in aiding newcomers' integration.

On the other hand, Ukraine's experience with the influx of internal migrants in response to armed aggression underlines the challenges that can arise when a country is unprepared to accommodate such

large numbers of people seeking refuge in urban areas. The need for adequate housing, employment opportunities, and social services became evident, prompting local authorities to adapt swiftly and learn from the experiences of other countries facing similar situations.

The significance of this comparison goes beyond the immediate circumstances of the migration crisis. It highlights the importance of proactive policies and infrastructure planning to accommodate the needs of migrants in urban settings. It underscores the role of cities in becoming hubs of integration, where the blending of diverse backgrounds can lead to enriching communities and economic growth. Furthermore, it emphasizes the necessity of addressing potential tensions between migrants and local communities, which requires effective communication, conflict resolution strategies, and anti-discrimination measures.

Conclusion. The comparison between Canada and Ukraine's experiences with migrant integration in urban areas showcases the critical role that policies, infrastructure, community involvement, and adaptive measures play in ensuring the successful integration of forced migrants. By understanding these dynamics, policymakers, local authorities, and societies at large can work towards creating inclusive, resilient, and harmonious urban environments that benefit both migrants and host populations, even in the face of challenging circumstances like armed conflicts and displacement.

Acknowledgments. The author thank professor Nancy Worth from the University of Waterloo for her exemplary leadership, which significantly elevated the quality of this research. Also, the author thank professor Sergey Yarusevich for organizing the Summer Research Program for Scholars at Risk from Ukraine during which the author diligently worked on this article.

References

1. Brettell, C. B. (2000). *Urban History, Urban Anthropology, and the Study of Migrants in Cities*. *City & Society*, 12(2), 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1525/city.2000.12.2.129>
2. Çaglar, A., & Glick Schiller, N. (2018). *Migrants and City-Making: Dispossession, Displacement, and Urban Regeneration*. Duke University Press. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/25763>
3. Gilmartin, M. (2008). Migration, Identity and Belonging. *Geography Compass*, 2(6), 1837–1852. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00162.x>
4. Hou, F., & Yan, X. (2020). *Immigrants from Post-Soviet States: Socioeconomic Characteristics and Integration Outcomes in Canada*. *Migration from the Newly Independent States: 25 Years After the Collapse of the USSR*. Springer International Publishing, 373–391. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-36075-7_17
5. Huang, X., & Liu, C. Y. (2018). Welcoming Cities: Immigration Policy at the Local Government Level. *Urban Affairs Review*, 54(1), 3–32. DOI: <https://doi.org/10.1177/1078087416678999>
6. Hudson, G. (2019). *City of hope, city of fear: Sanctuary and security in Toronto, Canada. B Sanctuary cities and urban struggles*. Manchester University Press. <https://www.manchesterhive.com/display/9781526134929/9781526134929.00010.xml>
7. Immigration Refugees and Citizenship Canada (2020). *Immigration, Refugees and Citizenship Canada*. <https://www.canada.ca/en/immigration-refugees-citizenship.html>
8. IOM Ukraine. (2022). <https://ukraine.iom.int/uk/dani-ta-resursy>
9. Kilian, L., & Zhou, X. (2022). The Propagation of Regional Shocks in Housing Markets: Evidence from Oil Price Shocks in Canada. *Journal of Money, Credit and Banking*, 54(4), 953–987. DOI: <https://doi.org/10.1111/jmcb.12847>

10. Liliana Filipchuk, O. S. (2022). Forced migration and war in Ukraine (March 24—June 10, 2022). Cedos. <https://cedos.org.ua/researches/vymushena-migracziya-i-vijna-v-ukrayini-24-bereznia-10-chervnya-2022/>
11. Newbold, K. B. (2011). Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy. *Canadian Journal of Urban Research*, 20(1), 131–149.
12. Niemets, K., Sehida, K., Niemets, L., Kravchenko, K., Kobylin, P., Telebienieva, I., Kliuchko, L. (2022). Methodology of human-geographical researches: con-temporary approaches and methods. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (56), 143-158. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-10>
13. Olena Syrбу. (2022). Returning IDPs and Refugees: What Influences Decisions. Cedos. <https://cedos.org.ua/researches/povernennya-pereselen-ok-i-bizhen-ok-shho-vplyvaye-na-rishennya/>
14. Pottie-Sherman, Y. (2020). Rust and reinvention: Im/migration and urban change in the American Rust Belt. *Geography Compass*, 14(3), e12482. DOI: <https://doi.org/10.1111/gec3.12482>
15. Pottie-Sherman, Y., & Graham, N. (2021). Live, Work, and Stay? Geographies of Immigrant Receptivity in Atlantic Canada's Aspiring Gateways. *Geographical Review*, 111(2), 287–307. DOI: <https://doi.org/10.1080/00167428.2020.1804301>
16. Rehaag, S. (2008). Patrolling the Borders of Sexual Orientation: Bisexual Refu-gee Claims in Canada. *McGill Law Journal*, 53(1), 59–102.
17. Romão, J., Kourtit, K., Neuts, B., & Nijkamp, P. (2018). The smart city as a common place for tourists and residents: A structural analysis of the determi-nants of urban attractiveness. *Cities*, 78, 67–75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2017.11.007>
18. Sehida K., Niemets L., Husieva N., Suptelo O., Kobylin P., Kliuchko L. (2018). Migration Challenges of the 21st Century: The Experience of Ukraine. *The Inter-national Business Information Management Conference (32nd IBI-MA)* (Seville, Spain, 15-16 November, 2018), 328-337.
19. Teofil Randyuk. (2022). Forced migration in the conditions of the Russian-Ukrainian war and its negative consequences for the gene pool of Ukraine. <http://www.nas.gov.ua:80/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=9149>
20. Ukrainian World Congress. (2022). Ukrainians in Canada: From the first wave of immigration to now - Ukrainian World Congress. <https://www.ukrainianworldcongress.org/ukrainians-in-canada-from-the-first-wave-of-immigration-to-now/>
21. Yuriy Umansky. (2023, апрель 28). Canada is facing the largest wave of Ukrain-ian immigration ever. *New Canadian Media*. <https://newcanadianmedia.ca/many-ukrainians-have-applied-for-a-visa-to-come-to-canada-but-many-of-them-choose-not-to-come/>

Інтеграція вимушених мігрантів у містах: уроки Канади та України

Дар'я Венгрин

аспірантка кафедри соціально-економічної географії і регіонознавства імені Костянтина Немця,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Повномасштабне вторгнення росії в Україну в лютому 2022 року призвело до безпрецедентного обсягу мігрантів українців в пошуках безпеки та захисту. Протягом першого місяця повномасштабної війни за даними Міжнародної організації з міграції, покинули місце свого постійного проживання і переїхали в межах країни 6,5 млн осіб та за кордон 3,6 млн осіб. Канада стала однією з перших країн, які надали підтримку Україні. Уряд країни спростив візові процедури, відкривши українцям шлях для переїзду. Дана стаття написана в рамках літньої дослідницької школи для студентів з зони ризику з України в університеті Ватерло. У ній досліджено вимушену міграцію українців у розрізі регіонів України та до Канади, визначено причини, через які мігранти обирають міське середовище та оцінено вплив міграційних потоків на розвиток міст. Наукова новизна дослідження полягає в наступних аспектах. Вперше було порівняно готовність міст Канади та України прийняти мігрантів. Крім того, проаналізовано, як різні сектори міської інфраструктури та послуг адаптуються до викликів і використовують можливості, що виникають унаслідок міграції. Досвід Канади свідчить, що її законодавчі механізми, усталена міграційна бюрократія та інклюзивна політика дозволили ефективно інтегрувати мігрантів, у тому числі біженців, у міські громади. Підтримка, яка надається мігрантам у Канаді, демонструє позитивний вплив добре розробленої політики, яка захищає права мігрантів, запобігає дискримінації та надає необхідні послуги для успішної інтеграції. Залучення української діаспори до цього процесу відіграє чималу роль. З іншого боку, досвід України з напливом внутрішніх мігрантів у відповідь на збройну агресію підкреслює виклики, які можуть виникнути, коли країна не готова прийняти таку велику кількість людей, які шукають притулку в містах. Потреба в доступному житлі, працевлаштуванні та соціальних послугах змусила місцеву владу оперативно адаптуватися та переймати досвід інших країн, які вже стикалися з подібними викликами. Порівняння досвіду Канади та України в інтеграції мігрантів у містах підкреслює ключову роль політики, інфраструктури, участі громад та адаптивних заходів у забезпеченні успішної інтеграції вимушених переселенців. Це дозволяє створювати інклюзивне міське середовище, що сприятиме як мігрантам, так і місцевим жителям, навіть за умов складних викликів.

Ключові слова: міська інтеграція, мігранти, місто, переміщені українці, Канада, Україна, війна, вимушені мігранти.

Надійшла 11 жовтня 2024 р.
Прийнята 24 листопада 2024 р.

Summer and Autumn Long-term Dynamic of Air Temperature in Central Ukraine

Olha Helevera¹

PhD (Geography), Associate Professor, Geoponics Department,

¹ Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine,
e-mail: olga.gelevera@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1582-9714>;

Mykola Mostipan¹

PhD (Biology), Professor, Head of Geoponics Department,

e-mail: mostipan1960@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0001-5317-6315>;

Serhii Topolnyi²

PhD (Biology), Doctoral student,

² National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,
e-mail: sergii.topolnyi@yara.com,  <https://orcid.org/0009-0002-4257-2050>

ABSTRACT

Formulation of the problem. This is the second part of a trilogy dedicated to the analysis of climate indicators in central Ukraine over the entire period of instrumental observations, which analyzes air temperature data from the weather stations of Uman, Kropyvnytskyi, and Poltava. This work addresses issues related to the 13th Sustainable Development Goal, which is to combat climate change and strengthen resilience and adaptation to climate-related hazards and disasters in all countries.

The purpose of this study was to analyze data from weather stations in central Ukraine that have the longest period of observation and to find patterns in the dynamics of temperature indicators over the past 140-200 years.

Data and methods. To characterize the climate of central Ukraine, we analyzed the average monthly and average annual temperatures of Uman, Kropyvnytskyi, and Poltava, which have the longest continuous or almost continuous period of observation. Based on these data, we have constructed graphs of changes in the average annual and average monthly temperatures for the winter and spring seasons. To analyze the dynamics of temperature indicators, we constructed linear and 11-year moving trends.

Results. At all weather stations, there is a trend towards an increase in both average annual air temperatures and temperatures for certain months. In particular, in Uman, the average annual temperature over the entire observation period (138 years) has increased from +6.8°C to +8.6°C, i.e. by 1.8 degrees. In Kropyvnytskyi, average annual temperatures over 149 years increased from +7.4°C to +8.9°C, i.e. by 1.5 degrees. In Poltava, the average annual temperature over 199 years has increased from +5.9°C to +8.7°C, i.e. by 2.8 degrees (since 1886 from +6.4°C to +8.7°C, i.e. by 2.3 degrees). At all weather stations, the most significant increase in average annual temperatures occurred between 1989 and 2023. Temperatures in the autumn months increased the least. Over the entire observation period, average monthly temperatures in September/October/November increased from 0.3/0.1/0.1°C in Uman, 0.6/0.1/1.8°C in Kropyvnytskyi to 1.5/1.2/1.9°C (since 1886 – 0.9/0.9/1.7°C) in Poltava. All three meteorological stations have common periods of temperature increases and decreases, in particular, a decrease in average monthly summer temperatures occurred from 1947-1969 to 1985-1995; from 1986-1996 to 2023, an increase in air temperature. Air temperatures in the summer months have increased quite significantly. Over the entire period of observation, the average monthly temperature in June/July/August increased from 0.9/0.3/0.7°C in Kropyvnytskyi, 1.9/1.3/1.6°C (since 1886 – 1.3/1.2/1.4°C) in Poltava to 2.0/1.1/1.1°C in Uman. The greatest increase in average monthly autumn temperatures occurred from 1999-2001 to 2023. Analyzing the graphs of 11-year moving averages, one can see the presence of periods of increase and decrease in average monthly temperatures lasting about 33 years or doubled periods lasting about 66 years.

Scientific novelty. For the first time, the data of meteorological stations in central Ukraine for the entire period of observation (138 years – Uman, 149 years – Kropyvnytskyi, 199 years – Poltava) were analyzed and regularities in the dynamics of temperature indicators were determined.

The practical significance lies in the possibility of using the results of the study to predict future climate change.

Keywords: climate, temperature, climate action, average monthly air temperature, territory of Ukraine, regional climate changes, summer, autumn.

In cites: Helevera Olha, Mostipan Mykola, Topolnyi Serhii. (2024). Summer and Autumn Long-term Dynamic of Air Temperature in Central Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 144-155. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-12>

Problem statement. The issue of analysing and forecasting changes in weather and climate conditions over time is the most challenging in climatology. Periodic changes in climate indicators remain insufficiently studied. A detailed, high-resolution understanding of the temporal and spatial patterns of climate change over previous centuries is essential to assess the extent to which the changes of

the late 20th and early 21st centuries may be unusual of pre-industrial natural climate variability.

Analysis of recent research and publications. Temperature fluctuations for Europe since before 1500 are discussed in detail in the paper 'European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500'. The authors used multi-proxy reconstructions of monthly and

seasonal surface temperature and found that the European climate of the late 20th and early 21st century is very likely (>95% confidence level) to be warmer than at any time in the last 500 years. This is consistent with findings for the entire Northern Hemisphere. Average European winter temperatures between 1500 and 1900 are $\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ lower (0.25°C for annual mean temperatures) compared to the 20th century. Summer temperatures have not experienced a systematic cooling on a century-long scale relative to current conditions. The coldest European winter was in 1708-1709; 2003 had the hottest summer on record [6].

Since 1757, there has been a trend towards summer cooling (-0.06°C per decade) until the early 20th century, with 1902 being the coldest summer on record. Subsequently, there has been an extremely strong, unprecedented warming (linear trend of $+0.7^{\circ}\text{C}$ per decade), probably marked by the hottest summer decade from 1994 to 2003. European summer temperatures show other multi-decadal periods with comparable, though less strong, warming trends (1731-1757, 0.42°C per decade; 1923-1947, 0.45°C per decade, respectively). The summer of 2003 exceeded European summer temperatures from 1901 to 1995 by about 2°C . The summer of 2003 was probably warmer than any other summer before 1500 [6, 9].

The 19th century (-0.32°C) was the coldest in the last half millennium [6]. This is consistent with reconstructions for the entire Northern Hemisphere [2]. The coldest decadal periods were observed in the second half of the 19th century and at the end of the 17th century. Decadal continental annual temperature changes during pre-industrial times appear to be driven primarily by solar variability [16, 17], although long periods of volcanism may also have contributed to the cooling in Europe.

The 20th century (1901-2000) was the warmest since 1500. There was a strong warming trend of $+0.08^{\circ}\text{C}$ per decade in the 20th century. In the last 30 years (1974-2003), temperatures were $\sim 0.45^{\circ}\text{C}$ higher than the second warmest 30-year periods (1722-1751 and 1750-1779) of the reconstructions. Nine of the warmest European years have occurred since 1989. 1989 ($+1.3^{\circ}\text{C}$) and the decade from 1994 to 2003 ($+0.84^{\circ}\text{C}$) were likely the warmest in more than half a millennium [6].

Air temperatures in each of the last three decades have been higher than all previous decades since 1850, and the first decade of the 21st century was the warmest. In the Northern Hemisphere, the period from 1983 to 2012 was the warmest 30-year period in the last 1400 years. The average global surface temperature increased by 0.85°C between 1880 and 2012, calculated using a linear trend based on several separately developed data series [10].

According to the expected future climate change, the change in the average global surface temperature in the short term over the period 2016-2035 compared to 1986-2005 is likely to be in the range of $0.3-0.7^{\circ}\text{C}$. This estimate assumes no major volcanic eruptions or long-term changes in total solar radiation [11]. However, in late 2021 and early 2022, the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH) volcano erupted, releasing huge amounts of water vapor into the atmosphere, leading to an increase in temperature in the winter months in the northern hemisphere [13].

Studies of the dynamics of climatic indicators for the territory of Ukraine and its regions are ongoing [7, 8, 24], but they often do not cover the entire period of instrumental observations [19, 23]. Researchers note that the average annual temperature has increased by $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ over 100 years [3, 4]. There have been attempts to predict climate change based on the projection of regional climate characteristics (for example, in Odesa region). According to them, in the near future (until 2030), changes in the average annual air temperature relative to the current period will be $+0.44^{\circ}\text{C} \pm 0.3^{\circ}\text{C}$, and its value will be 10.9°C . Insignificant changes in the average monthly air temperature (within $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$) are expected from January to March, and from April to the end of the year, a gradual increase in average monthly air temperatures is expected. The largest increases are expected in December, September and July ($+0.8^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, $+0.79^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, $+0.74^{\circ}\text{C} \pm 0.4^{\circ}\text{C}$, respectively). The smallest confidence intervals were obtained for August $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, and the largest for January $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ [14].

Projections of changes in air temperature in Ukraine by the middle of the XXI century indicate unambiguous warming in all months of the year. Changes in the average annual temperature in this period are projected to be $+1.41 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$, and its value is 11.9°C , which is 1.0°C higher than in the previous period. The maximum changes are expected, as in the previous period, in December, at $+2.05 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$. Unlike in the near future, significant changes will occur in August $+1.81 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ and January $+1.61 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$, the smallest in spring with a minimum in February $+0.79 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$. In the summer months, warming will occur unevenly: the maximum is in August, but in July the temperature changes are significant and amount to $+1.68 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ [14]. Compared to 1961-1990, the average monthly air temperature in spring and autumn will undergo the smallest changes (up to 1°C), while the temperature increase in summer and winter will be $2.5-3.5^{\circ}\text{C}$ [27].

In June, the average monthly temperature in Ukraine increased by $0.4-0.7^{\circ}\text{C}$, and in the west, up to 1.0°C over a 100-year period. From July to August, a slow decline (up to 1.0°C) in air temperature

begins, which is increasing further. In August, the direction of the isotherms for both study periods coincides, with a temperature increase of 1.0°C over most of the territory and 0.5°C in the south-east. The largest temperature increase occurred in the far south, where the temperature reached 22.0°C . It also warmed up by 1.0°C in the west, where the temperature reached 18.0°C . In July and August, the air temperature increased by $1.5\text{--}2.0^{\circ}\text{C}$ across the territory compared to the climatological standard norm (1961-1990). In September, the air temperature remained almost unchanged. In October, an increase of 1.0°C was observed in the southeast, and $0.1\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$ in the rest of the country. In November, in most areas, the air temperature has increased in recent years (by 0.4°C), while in some areas it has decreased [20].

The average annual air temperature over the past almost twenty years has been on a general upward trend, despite the fact that two periods can be clearly distinguished in the time distribution: 2000-2006 and 2007-2018. In the former case, there was a slight decrease, and in the latter, an increase in the value of this characteristic. In the northern and northeastern regions of Ukraine, the annual temperature increased by $1.0\pm 0.2^{\circ}\text{C}/100$ years; in the southern and southwestern regions only by $0.5\pm 0.1^{\circ}\text{C}/100$ years; there is a decrease in the amplitude of the seasonal temperature course by $\sim 0.4\text{--}0.5^{\circ}\text{C}$: significant warming in the cold season ($1.0\text{--}2.0^{\circ}\text{C}/100$ years), for spring ($1.5\text{--}2.0^{\circ}\text{C}/100$ years); warming was insignificant in the summer months [4].

Other researchers argue that from 2000 to 2020, the air temperature in Ukraine increased significantly, especially during the warm season, when extreme temperatures became more frequent both in the country and worldwide [22].

The changes in the temperature regime observed now are confirmed by changes in atmospheric circulation in Europe, which has led to an increase in the duration of sunshine [18] and changes in the characteristics of the radiation balance, including in most regions of Ukraine. [25]. The temperature increase in Europe and Ukraine has been stronger than the global average in recent decades [5]. There has been an increase in the duration and severity of droughts in most regions, especially in the central part of Ukraine, which negatively affects agriculture [26].

Highlighting the previously unresolved parts of the general problem to which the article is devoted. Climate change with a resolution from seasonal to annual over the past centuries has been covered in a number of studies, including climate modelling experiments with estimates of natural and anthropogenic radiative forcing and empirical reconstructions [10, 12, 15, 17]. Reconstructions of

hemispheric and global temperatures do not provide information on regional-scale variations, such as characteristic seasonal patterns of climate change that have occurred, in particular, in central Ukraine over the past centuries. Currently, much attention is being paid to the study of local (regional) climates, as trends in air temperature are ambiguous in different regions. Therefore, it is important to study the climate of central Ukraine over the longest possible period of instrumental observations.

The aim of this study is to analyse data from the meteorological stations in central Ukraine that have the longest continuous or almost continuous period of observations (Uman, Kropyvnytskyi, Poltava). The objectives of the study are to determine the following: changes in average annual air temperatures; changes in average monthly air temperatures in summer and autumn seasons; periods of increase and decrease in temperature indicators over the entire period of instrumental observations (138-199 years) in central Ukraine.

Main material of the research. To characterise the climate of central Ukraine, meteorological data from meteorological stations with the longest continuous or almost continuous period of observation were taken. In particular, the following temperature indicators are analysed:

1. The meteorological station in Uman (Cherkasy region), located at latitude 48.77, longitude 30.23, is situated at an altitude of 216 m above sea level. The meteorological station has been operating since 1885 and has continuous data for 138 years.

2. The meteorological station in Kropyvnytskyi (Kirovohrad region), which has the following coordinates: latitude 48.52, longitude 32.20, located at an altitude of 171 m above sea level. The meteorological station has been operating since 1874, however, meteorological data for 1941-1944 are partially or completely missing. The meteorological data were analysed for 149 years.

3. The meteorological station in Poltava has the following coordinates: latitude 49.60, longitude 34.55, located at an altitude of 160 m above sea level. The meteorological station has been operating since 1824, however, meteorological data for 1832-1835, 1858, 1865-1885, 1941-1943 are partially or completely missing. The meteorological data were analysed for 199 years.

A number of scientists identify periodic components of climate change, the main one being the eleven-year cycle of solar activity (Schwabe cycle) [2]. Therefore, in addition to the empirical data, we added eleven-year rolling periods to the graphs.

The analysis of the data from the meteorological station in Uman for 138 years showed the following: the average annual air temperature is $+7.65^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was recorded in

1942 at $+4.8^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was in 2021 – $+10.7^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average annual temperature over the entire observation period has increased from $+6.8^{\circ}\text{C}$ to $+8.6^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.8 degrees. Between 1885 and 1987, there was almost no increase in the average annual temperature. Instead, from 1989 to 2023, there was a rather significant increase in temperature, according to the eleven-year moving average graph (Fig. 1).

The analysis of 149 years of data from the meteorological station in Kropyvnytskyi showed the following: the average annual air temperature was $+8.19^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was recorded in 1987 at $+5.9^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was in 2020 at $+11.0^{\circ}\text{C}$ and in 2023 at $+11.2^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average annual temperature over the entire observation period increased from $+7.4^{\circ}\text{C}$ to $+8.9^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.5 degrees. Between 1874 and 1987, there was almost no increase in the average annual temperature. In contrast, from 1989

to 2023, there was also a fairly significant increase in temperature, according to the eleven-year moving average.

The analysis of the data from the meteorological station in Poltava over 199 years showed the following: the average annual air temperature was $+7.31^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was recorded in 1840 at $+4.6^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was recorded in 2020 at $+10.6^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average annual temperature over the entire period of observation has increased from $+5.9^{\circ}\text{C}$ to $+8.7^{\circ}\text{C}$, i.e. by 2.8 degrees (since 1886 from $+6.4^{\circ}\text{C}$ to $+8.7^{\circ}\text{C}$, i.e. by 2.3 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1824 to 1863 – temperature increase; from 1887 to 1933 – slight temperature fluctuations; from 1934 to 1975 – slight temperature increase; from 1976 to 1987 – slight temperature decrease; from 1989 to 2023 – quite a significant temperature increase (Fig. 1).



Fig. 1. Average annual temperatures in $^{\circ}\text{C}$ in central Ukraine (Uman, Kropyvnytskyi, Poltava):
1 - empirical data; 2 - eleven-year moving averages; 3 - linear trend

Characteristics of summer months of the year

June: in Uman, the average monthly temperature among the studied meteorological stations was the lowest at 17.93°C . The lowest temperature was recorded in 1925 at $+14.6^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was observed in 2019 at $+22.4^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in June for the entire observation period increased from $+16.9^{\circ}\text{C}$ to $+18.9^{\circ}\text{C}$, i.e. by 2.0 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1921 – a slight decrease in temperature; from 1922 to 1964 – a slight increase in temperature; from 1965 to 1994 – a slight decrease in temperature; from 1995 to 2023 – an increase in temperature.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature was the highest among the meteorological stations studied, at $+18.92^{\circ}\text{C}$. The lowest was observed in 1887 and 1894 at 15.4°C . The highest was in 1875 at 23.4°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in June for the entire observation period slightly increased from $+18.5^{\circ}\text{C}$ to $+19.4^{\circ}\text{C}$, i.e. by 0.9 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the fol-

lowing periods can be distinguished: from 1874 to 1921 – a slight decrease in temperature; from 1922 to 1947 – a slight increase in temperature; from 1948 to 1994 – a slight decrease in temperature; from 1995 to 2023 – an increase in temperature.

The average monthly temperature in Poltava was $+18.54^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature in 1846 was 12.4°C . The highest temperature in 1901 was $+23.5^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in June over the entire observation period has increased from $+17.5^{\circ}\text{C}$ to $+19.4^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.9 degrees (since 1886 – from $+17.5^{\circ}\text{C}$ to $+19.8^{\circ}\text{C}$, i.e. by 2.3 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1825 to 1934 – temperature fluctuations; from 1935 to 1957 – a slight increase in temperature; from 1958 to 1995 – a slight decrease in temperature; from 1996 to 2023 – an increase in temperature (Fig. 2).

All three meteorological stations have common periods of temperature increases and decreases, in particular, the average monthly temperature in June increased from 1922-1934 to 1947-1957; from 1948-1965 to 1994-1995 the temperature decreased; from 1995-1996 to 2023 the air temperature increased.

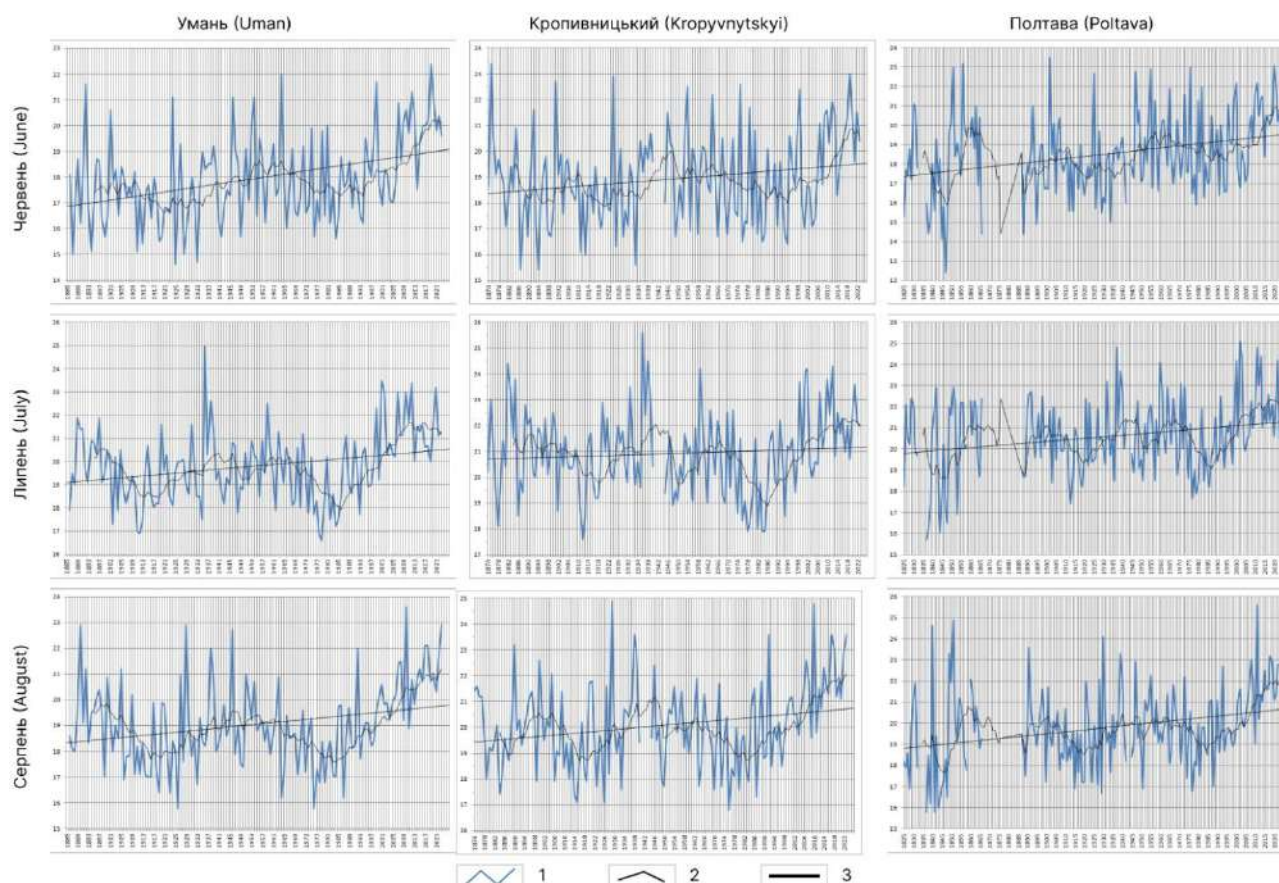


Fig. 2. Average temperatures in $^{\circ}\text{C}$ in summer months (June, July, August) in central Ukraine (Uman, Kropyvnytskyi, Poltava) : 1 – empirical data; 2 – eleven-year moving averages; 3 – linear trend

July: In Uman, the average monthly temperature was the lowest among the meteorological stations studied, at $+19.80^{\circ}\text{C}$. The lowest was recorded in 1979 at $+16.6^{\circ}\text{C}$. The highest was recorded in 1936 at $+25.0^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in July for the entire observation period increased from $+19.3^{\circ}\text{C}$ to $+20.4^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.1 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1918 – a slight decrease in temperature; from 1920 to 1946 – a slight increase in temperature; from 1947 to 1986 – a slight decrease in temperature; from 1987 to 2023 – an increase in temperature.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature among the studied weather stations was the highest at 20.90°C . The lowest was observed in 1912 at 17.6°C . The highest was also in 1936, at 25.6°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in July over the entire observation period hardly changed. It was $+20.8^{\circ}\text{C}$ and became $+21.1^{\circ}\text{C}$, i.e. increased by 0.3 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1874 to 1918 – a slight decrease in temperature; from 1920 to 1940 – a slight increase in temperature; from 1947 to 1986 – a slight decrease in tem-

perature; from 1987 to 2023 – an increase in temperature.

The average monthly temperature in Poltava was 20.59°C . The lowest temperature was observed in 1836 – 15.7°C . The highest temperature was in 2001, at 25.1°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in July over the entire period of observation has increased from $+19.9^{\circ}\text{C}$ to $+21.2^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.3 degrees (since 1886 – from $+20.1^{\circ}\text{C}$ to $+21.3^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.2 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1825 to 1919 – temperature fluctuations; from 1920 to 1942 – a slight increase in temperature; from 1945 to 1967 – slight temperature fluctuations; from 1969 to 1986 – temperature decrease; from 1988 to 2023 – temperature increase (Fig. 2).

All three meteorological stations have common periods of temperature increases and decreases, in particular, the increase in average monthly July temperatures occurred from 1920 to 1940-1946; from 1947-1969 to 1986, there was a decrease in temperature; from 1987-1988 to 2023, there was an increase in air temperature.

August: in Uman, the average monthly temperature among the studied meteorological stations was the lowest at $+19.03^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature

was recorded in 1926 and 1976 at $+16.8^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was in 2010 at $+23.6^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in August over the entire observation period increased from $+18.5^{\circ}\text{C}$ to $+19.6^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.1 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1917 – a slight decrease in temperature; from 1920 to 1946 – a slight increase in temperature; from 1947 to 1985 – a slight decrease in temperature; from 1986 to 2022 – an increase in temperature.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature was the highest among the meteorological stations studied, at 20.03°C . The lowest temperature was also observed in 1976, at 16.8°C . The highest temperature was in 1929 at $+24.9^{\circ}\text{C}$ and in 2010 at $+24.8^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in August over the entire observation period increased slightly from $+19.7^{\circ}\text{C}$ to $+20.4^{\circ}\text{C}$, i.e. by 0.7 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1874 to 1916 – a slight decrease in temperature; from 1917 to 1946 – a slight increase in temperature; from 1947 to 1985 – a slight decrease in temperature; from 1986 to 2023 – an increase in temperature.

The average monthly temperature in Poltava was 19.79°C . The lowest temperature in 1836 and 1840 was 15.8°C . The highest temperature in 2010 was 25.6°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in August over the entire observation period slightly increased from $+18.9^{\circ}\text{C}$ to $+20.5^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.6 degrees (since 1886 – from $+19.1^{\circ}\text{C}$ to $+20.7^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.6 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1825 to 1901 – temperature fluctuations; from 1902 to 1920 – a slight decrease in temperature; from 1920 to 1939 – a slight increase in temperature; from 1940 to 1964 – slight temperature fluctuations; from 1968 to 1985 – a decrease in temperature; from 1990 to 2023 – an increase in temperature (Fig. 2).

All three meteorological stations have common periods of temperature increases and decreases, in particular, a decrease in the average monthly temperature in August occurred in 1916-1920; from 1917-1920 to 1939-1946, a slight increase in temperature; from 1947-1968 to 1985, a slight decrease in temperature; from 1986-1990 to 2023, an increase in air temperature. Thus, the summer season was the warmest in Kropyvnytskyi and the coldest in Uman.

Characteristics of autumn months of the year

September: in Uman, the average monthly temperature was the lowest among the meteorological stations studied – 13.97°C . The lowest temperature was recorded in 1959 at $+10.8^{\circ}\text{C}$. The highest

temperature was in 1909 at 18.3°C and in 2023 at 18.4°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in September over the entire observation period hardly changed. It was $+13.8^{\circ}\text{C}$ and became $+14.1^{\circ}\text{C}$, i.e. increased by 0.3 degrees. Analysing the eleven-year moving average graph, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1954 – slight temperature fluctuations; from 1956 to 1966 – slight temperature decrease; from 1967 to 2000 – slight temperature fluctuations; from 2001 to 2023 – temperature increase.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature among the studied weather stations was the highest at 14.76°C . The lowest temperature was observed in 1997 at 11.3°C . The highest temperature was also in 1909, at 20.2°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in September hardly changed over the entire observation period. It was $+14.5$ and became $+15.1$, i.e. increased by 0.6 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1874 to 1954 – slight temperature fluctuations; from 1955 to 1966 – slight temperature decrease; from 1967 to 1997 – slight temperature fluctuations; from 1999 to 2023 – temperature increase.

The average monthly temperature in Poltava was 14.29°C . The lowest temperature was in 1843, at 9.6°C . The highest temperature was also in 1909, at 19.4°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in September over the entire period of observation slightly increased from $+13.5^{\circ}\text{C}$ to $+15.0^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.5 degrees (since 1886 – from $+14.0^{\circ}\text{C}$ to $+14.9^{\circ}\text{C}$, i.e. by 0.9 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1825 to 1997 – insignificant temperature fluctuations; from 1999 to 2023 – temperature increase (Fig. 3).

All three weather stations have common periods of rising and falling temperatures, in particular, from 1999-2001 to 2023, when the air temperature increased.

October: In Uman, the average monthly temperature was $+7.81^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was recorded in 1920 at $+1.1^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was recorded in 1918 at $+13.1^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in October over the entire observation period hardly changed. It was $+7.8^{\circ}\text{C}$ and became $+7.9^{\circ}\text{C}$, i.e. increased by 0.1 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1915 – a slight decrease in temperature; from 1917 to 1935 – a slight increase in temperature; from 1936 to 1951 – a slight decrease in temperature; from 1952 to 1966 – a slight increase in temperature; from 1967 to 2023 –

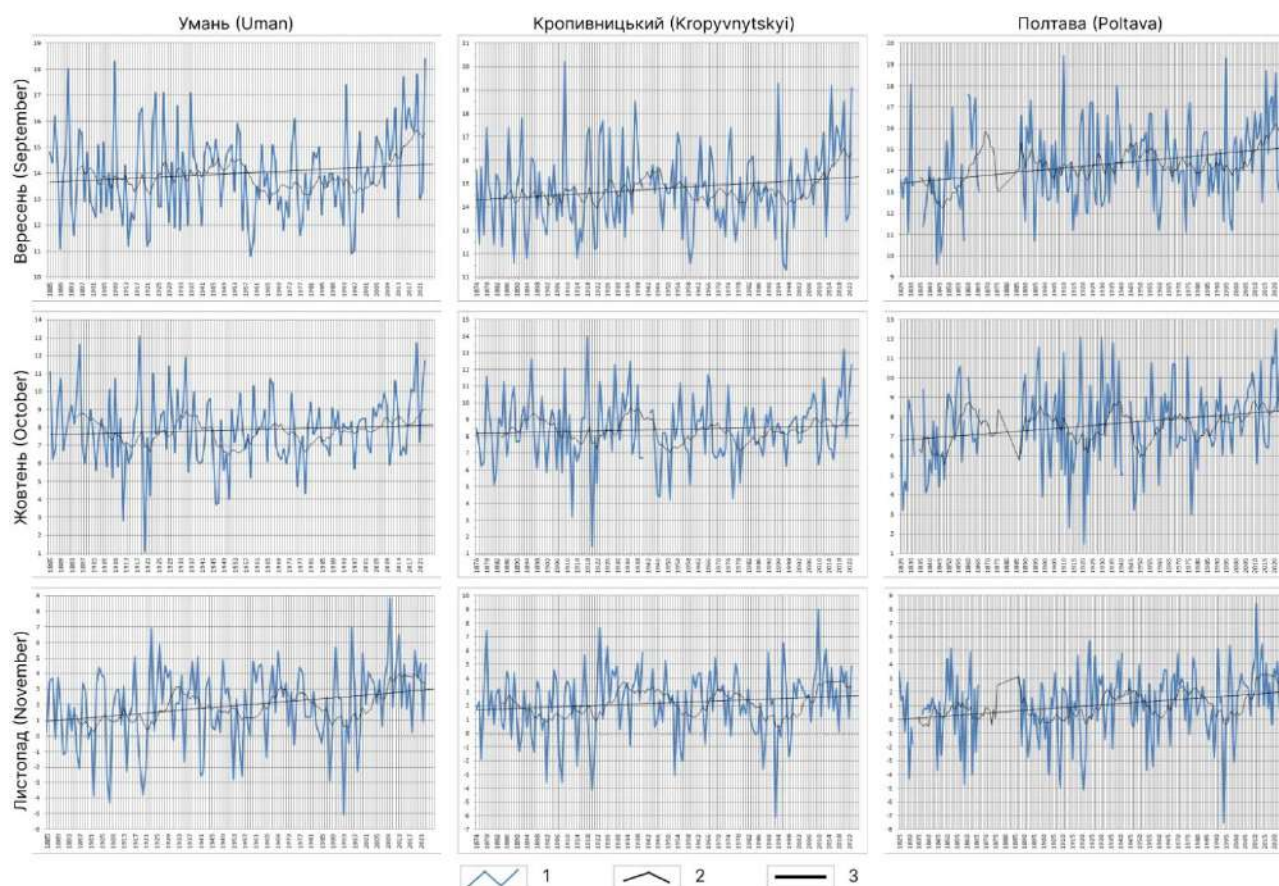


Fig. 3. Average temperatures in $^{\circ}\text{C}$ in autumn months (September, October, November) in central Ukraine (Uman, Kropyvnytskyi, Poltava): 1 – empirical data; 2 – eleven-year moving averages; 3 – linear trend

slight temperature fluctuations.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature was the highest among the meteorological stations studied, at 8.37°C . The lowest temperature was also observed in 1920, at $+1.4^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was in 1918, at $+14.0^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in October over the entire observation period hardly changed. It was $+8.3^{\circ}\text{C}$ and became $+8.4^{\circ}\text{C}$, i.e. increased by 0.1 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1874 to 1915 – a slight decrease in temperature; from 1917 to 1935 – a slight increase in temperature; from 1936 to 1951 – a slight decrease in temperature; from 1952 to 1966 – a slight increase in temperature; from 1967 to 2023 – slight temperature fluctuations.

In Poltava, the average monthly temperature among the studied weather stations was the lowest at $+7.57^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was also in 1920, at $+1.5^{\circ}\text{C}$. The highest temperature was in 2020 at 12.5°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in October for the entire observation period slightly increased from $+6.9^{\circ}\text{C}$ to $+8.1^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.2 degrees (since 1886 – from $+7.3^{\circ}\text{C}$ to $+8.2^{\circ}\text{C}$, i.e. by 0.9 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the

following periods can be distinguished: from 1825 to 1860 – a slight increase in temperature; from 1898 to 1923 – a decrease in temperature; from 1924 to 1939 – an increase in temperature; from 1940 to 1952 – a decrease in temperature; from 1953 to 2023 – a slight increase in temperature (Fig. 3).

All three meteorological stations have common periods of temperature increases and decreases, in particular, a decrease in the average monthly temperature in August occurred from 1915 to 1923; from 1917 to 1924 to 1935 to 1939, a slight increase in temperature; from 1936 to 1940 to 1951 to 1952, a slight decrease in air temperature.

November: In Uman, the average monthly temperature was $+1.91^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was recorded in 1993 -5.1°C . The highest temperature was in 2010 at 8.8°C . According to the linear trend graph, the average monthly temperature in November over the entire observation period slightly increased from $+1.0^{\circ}\text{C}$ to $+2.8^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.8 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1885 to 1922 – slight temperature fluctuations; from 1923 to 1934 – slight temperature increase; from 1935 to 1959 – slight temperature decrease; from 1960 to 1969 – slight temperature increase; from 1970 to 1993 – slight temperature de-

crease; from 1994 to 2023 – temperature increase.

In Kropyvnytskyi, the average monthly temperature was the highest among the meteorological stations studied, at $+2.18^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was observed in 1993 -6.1°C . The highest temperature was in 2010, at $+9.0^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in November hardly changed over the entire observation period. It was $+1.9^{\circ}\text{C}$ and became $+2.5^{\circ}\text{C}$, i.e. increased by 0.6 degrees. Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1874 to 1922 – slight temperature fluctuations; from 1923 to 1934 – slight temperature increase; from 1935 to 1959 – slight temperature decrease; from 1960 to 1969 – slight temperature increase; from 1970 to 1993 – slight temperature decrease; from 1994 to 2023 – temperature increase.

In Poltava, the average monthly temperature among the studied weather stations was the lowest at $+1.04^{\circ}\text{C}$. The lowest temperature was -7.5°C in 1993. The highest temperature was observed in 2010 at $+8.4^{\circ}\text{C}$. According to the linear trend graph, the average monthly temperature in November over the entire period of observation slightly increased from $+0.0^{\circ}\text{C}$ to $+1.9^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.9 degrees (since 1886 – from $+0.2^{\circ}\text{C}$ to $+1.9^{\circ}\text{C}$, i.e. by 1.7 degrees). Analysing the graph of eleven-year moving averages, the following periods can be distinguished: from 1825 to 1921 – slight temperature fluctuations; from 1922 to 1945 – temperature increase; from 1946 to 1960 – slight temperature decrease; from 1961 to 1973 – slight temperature increase; from 1974 to 1994 – slight temperature decrease; from 1995 to 2023 – slight temperature increase (Fig. 3).

At all the studied weather stations over the entire observation period, the lowest average monthly temperatures in November were recorded in 1993, and the highest in 2010. All three weather stations had common periods of temperature increases and decreases, in particular, from 1922-1923 to 1934-1945 – a slight increase in temperature; from 1935-1946 to 1959-1960 – a slight decrease in temperature; from 1994-1995 to 2023 – an increase in air temperature.

Thus, the autumn season was the warmest in Kropyvnytskyi, and the coldest (except for Septem-

ber) in Poltava.

Conclusions. The analysis of meteorological data from meteorological stations in central Ukraine over the entire period of observation showed the following: average annual temperatures increased from 1.5°C in Kropyvnytskyi, 1.8°C in Uman to 2.8°C (since 1886 2.3°C) in Poltava. The highest average annual temperatures at all weather stations were recorded in 2020, 2021 and 2023.

Temperatures in autumn months increased the least. Over the entire observation period, average monthly temperatures in September increased from 0.3°C in Uman, 0.6°C in Kropyvnytskyi to 1.5°C (since 1886 0.9°C) in Poltava. The average monthly temperature in October increased from 0.1°C in Uman and Kropyvnytskyi to 1.2°C in Poltava (0.9°C since 1886). The average monthly temperature in November increased from 0.6°C in Kropyvnytskyi and 1.8°C in Uman to 1.9°C (since 1886 1.7°C) in Poltava. All three weather stations had common periods of temperature increases and decreases, in particular, an increase in average monthly autumn temperatures occurred from 1999-2001 to 2023.

The temperatures of summer months have increased quite significantly. Over the entire period of observation, the average monthly temperature in June increased from 0.9°C in Kropyvnytskyi, 1.9°C (since 1886 2.3°C) in Poltava to 2.0°C in Uman. The average monthly temperature in July increased from 0.3°C in Kropyvnytskyi, 1.1°C in Uman to 1.3°C in Poltava (1.2°C since 1886). The average monthly temperature in August increased from 0.7°C in Kropyvnytskyi and 1.1°C in Uman to 1.6°C (since 1886 1.6°C) in Poltava. All three meteorological stations had common periods of temperature increases and decreases, in particular, a decrease in average monthly summer temperatures occurred from 1947-1969 to 1985-1995; from 1986-1996 to 2023, an increase in air temperature.

Analyzing the 11-year sliding graphs, one can notice the presence of periods of increase-decrease in average monthly temperatures lasting about 33 years or doubling periods lasting about 66 years. Due to the lack of meteorological data for a long period, such patterns are difficult to identify, but this is a promising area for further research.

Bibliography

1. 13 Climate action (2024). The Global goals. Available at: <https://www.globalgoals.org/goals/13-climate-action/>
2. Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D.N. Schmidt, P. Alexander, K.Y. Børshheim, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg, & L. Whitmarsh, (2022): Europe. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1817–1927, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.015>
3. Borovska, H. & Khokhlov, V. (2023) Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 00, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>

4. Бойченко С. В. та ін. Особливості зміни клімату на території України: сценарії, наслідки для природи та агроєкосистем. *Вісник НАУ*. 2016. No 4. С. 96–113. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnau_2016_4_14. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.69.11061>
5. Copernicus Climate Change Service. (2023) Summary: European state of the climate 2022. DOI: <https://doi.org/10.24381/qvaf-h066>
6. European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since (2004). 1500 Jürg Luterbacher, Daniel Dietrich, Elena Xoplaki, Martin Grosjean, Heinz Wanner. Authors Info & Affiliations. *Science* Vol 303, Issue 5663, pp. 1499-1503. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1093877>
7. Гелевера Ольга. Багаторічна динаміка температури повітря зимового та весняного сезонів у центральній Україні / Ольга Гелевера, Микола Мосціпан, Сергій Топольний // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2023. – Вип. 59.–С. 83-94. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07>
8. Гелевера О. Ф. Багаторічна динаміка кліматичних показників за даними Кропивницької метеостанції. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Географічні науки*. 2019. Вип. 10. С. 107–113. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-10-15>
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1767-1926). Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
10. IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
11. IPCC (2023): Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
12. Jones, P. D., Briffa, K. R., & Osborn, T. J. (2003). Changes in the Northern Hemisphere annual cycle: Implications for paleoclimatology?, *J. Geophys. Res.*, 108(D18), 4588, DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JD003695>
13. Jucker Martin, Lucas Chris, & Dutta Deepashree (2023). Long-term surface impact of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai-like stratospheric water vapor injection. *ESS Open Archive*. August 04. DOI: <https://doi.org/10.22541/essoar.169111653.36341315/v1>
14. Краковська С. В., Білозерова А. К., Паламарчук Л. В. Проекції регіональних кліматичних характеристик у XXI столітті за даними моделювання (на прикладі Одеської області). *Фізична географія та геоморфологія*. 2015. No 2. С. 132. ISSN 0868-6939
15. Kundzewicz, Z. W., & Parry, M. L. (2001). in *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, J. J. McCarthy et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, 2001), pp. 641-692.
16. Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J.P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J.C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S. & Zhou T. (2021): Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
17. Mann, M.E., E.A. Lloyd, & Oreskes, N. (2017): Assessing climate change impacts on extreme weather events: the case for an alternative (Bayesian) approach. *Climatic Change*, 144(2), 131–142, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-978929169164710.1007/s10584-017-2048-3>
18. Marsz, A.A., Matuszko, D. & Styszyńska, A. (2022) The thermal state of the North Atlantic and macro-circulation conditions in the Atlantic-European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 42(2), 748–761. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7270>
19. Osadchyi, V., Skrynyk, O. A., Radchenko, R., & Skrynyk, O. Y. (2018). Homogenization of Ukrainian air temperature time series. *Int. J. Climatol.* (38), 497-505. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5191>
20. Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Температура повітря на території України в сучасних кліматичних умовах. *Український географічний журнал*. 2013. No 4. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2013.04.032>
21. Осадчий В. І., Бабіченко В. М., Набиванець Ю. Б., Скринник О. Ю. Динаміка температури повітря на території України за період інструментальних метеорологічних спостережень. Київ : Ніка-Центр, 2013. 307 с.
22. Perkins-Kirkpatrick, S.E. & Lewis, S.C. (2020) Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11, 3357. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
23. П'ясецька С. В., Щеглов О. М. Сучасний характер змін середньомісячної температури повітря протягом 2006-2020 років. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія „Геологія. Географія. Екологія”*. 2023. Вип. 58. С. 217–230. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17>

24. Решетченко С. І. та ін. Кліматичні індикатори змін гідрологічних характеристик (на прикладі басейну р. Псел). Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія „Геологія. Географія. Екологія”. 2020. Вип. 53. С. 155–166. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
25. Rybchenko, L. S., Savchuk, S. V., Timofeev, V. E., & Shcheglov, A. A. (2022). Динаміка фотосинтетично активної радіації за 1986–2015 рр. в Україні. Український гідрометеорологічний журнал, (30), 12–23. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.30.2022.02>
26. Semenova, I., & Vicente-Serrano, S. M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. International Journal of Climatology, 44(6), 1849–1866. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8416>
27. Замфірова М. С., Хохлов В. М. Режим температури повітря та опадів в Україні у 2021–2050 рр. за ансамблем моделей CORDEX. Український гідрометеорологічний журнал. 2020. № 25. С. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. 13 Climate action (2024). The Global goals. Available at: <https://www.globalgoals.org/goals/13-climate-action/>
2. Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D.N. Schmidt, P. Alexander, K.Y. Børsheim, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg, & L. Whitmarsh, (2022): Europe. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1817–1927, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844.015>
3. Borovska, H. & Khokhlov, V. (2023) Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. Geoscience Data Journal, 00, 1–12. Available from: <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>
4. Boychenko, S., Voloshchuk, V., Movchan, Y., Serdjuchenko, N., Tkachenko V., Tyshchenko, O., & Savchenko S. (2016). Features of Climate Change on Ukraine: Scenarios, Consequences for Nature and Agroecosystems. Proceedings of the National aviation university, (4), 96–113. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.69.11061> [in Ukrainian]
5. Copernicus Climate Change Service. (2023) Summary: European state of the climate 2022. DOI: <https://doi.org/10.24381/qvaf-h066>
6. European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since (2004). 1500 Jürg Luterbacher, Daniel Dietrich, Elena Xoplaki, Martin Grosjean, Heinz Wanner. Authors Info & Affiliations. Science Vol 303, Issue 5663, pp. 1499–1503. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1093877>
7. Helevera Olha, Mostipan Mykola, Topolnyi Sergii (2023). Winter and spring long - term dynamic of air temperature in Central Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (59), 83–94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07> [in Ukrainian]
8. Helevera, O.F. (2019). Long-term dynamics of climatic indicators according to the data of the Kropyvnytskyi weather station. Scientific Bulletin of Kherson State University. Series Geographical Sciences, (10), 107–113. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2019-10-15> [in Ukrainian].
9. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change Information for Regional Impact and for Risk Assessment. In Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 1767–1926). Cambridge: Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.014>
10. IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
11. IPCC (2023): Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 35–115, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
12. Jones, P. D., Briffa, K. R., & Osborn, T. J. (2003). Changes in the Northern Hemisphere annual cycle: Implications for paleoclimatology? J. Geophys. Res., 108(D18), 4588, DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JD003695>
13. Jucker Martin, Lucas Chris, & Dutta Deepashree (2023). Long-term surface impact of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai-like stratospheric water vapor injection. ESS Open Archive. August 04. DOI: <https://doi.org/10.22541/essoar.169111653.36341315/v1>
14. Krakovska, S.V., Bilozero, A.K., & Palamarchuk, L.V. (2015). Projections of regional climatic characteristics in the XXI century based on modeling data (on the example of Odesa region). Physical geography and geomorphology. Vol. 2(78) ~132. ISSN 0868-6939 [in Ukrainian]

15. Kundzewicz, Z. W., & Parry, M. L. (2001). in *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, J. J. McCarthy et al., Eds. (Cambridge Univ. Press, New York, 2001), 641–692.
16. Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J.P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J.C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S. & Zhou T. (2021): *Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.006>
17. Mann, M.E., E.A. Lloyd, & Oreskes, N. (2017): Assessing climate change impacts on extreme weather events: the case for an alternative (Bayesian) approach. *Climatic Change*, 144(2), 131–142, DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-978929169164710.1007/s10584-017-2048-3>
18. Marsz, A.A., Matuszko, D. & Styszyńska, A. (2022) The thermal state of the North Atlantic and macro-circulation conditions in the Atlantic-European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 42(2), 748–761. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7270>
19. Osadchyi, V., Skrynyk, O. A., Radchenko, R., & Skrynyk, O. Y. (2018). Homogenization of Ukrainian air temperature time series. *Int. J. Climatol.* (38), 497–505. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5191>
20. Osadchyi, V.I., & Babichenko, V.M. (2013) Air temperature on the territory of Ukraine in modern climate conditions. *Ukrainian Geographical Journal*, (4), 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2013.04.032> [in Ukrainian]
21. Osadchyi, V.I., Babichenko, V.M., Nabyvanets, Y.B., & Skrynnyk, O.Y. (2013) Dynamics of air temperature in Ukraine for the period of instrumental meteorological observations. Kyiv: Nika-Center Publishing House [in Ukrainian].
22. Perkins-Kirkpatrick, S.E. & Lewis, S.C. (2020) Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, 11, 3357. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16970-7>
23. Pyasetska Svitlana, & Shcheglov Oleksandr (2023). The modern nature of changes in the average monthly air temperature during 2006–2020. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 217–230. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-17> [in Ukrainian]
24. Reshetchenko, S.I., Dmitriyev, S.S., Cherkashyna, N.I., & Goncharova, L.D. (2020) Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyol river basin. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (53), 155–166, DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12> [in Ukrainian]
25. Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V., Timofeev, V.E. & Shcheglov, A.A. (2022) Dynamics of photosynthetic solar active radiation in Ukraine over 1986–2015. *Ukrains'kij Hidrometeorologichnij Zhurnal*, 30, 12–23. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.30.2022.02> [in Ukrainian]
26. Semenova, I., & Vicente-Serrano, S. M. (2024). Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *International Journal of Climatology*, 44(6), 1849–1866. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.8416>
27. Zamfirova, M. S., & Khokhlov, V. M. (2020). Air temperature and precipitation regime in Ukraine in 2021–2050 by CORDEX model ensemble. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. (25), 17–27. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.02> [in Ukrainian]

Багаторічна динаміка температури повітря літнього та осіннього сезонів у центральній Україні

Ольга Гелевера¹

к. геогр. н., доцент, кафедра загального землеробства,

¹ Центральнотукаїнський національний технічний університет,

Кропивницький, Україна;

Микола Мостіпан¹

к. біолог. н., професор, зав. кафедри загального землеробства;

Сергій Топольний²

к. біолог. н., докторант,

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,

Київ, Україна

Це друга частина трилогії, присвяченої аналізу кліматичних показників центральної України за весь період інструментальних спостережень, в якій проаналізовано дані про температуру повітря з метеостанцій Умані, Кропивницького та Полтави. Ця робота стосується питань, пов'язаних з 13-ю Ціллю сталого розвитку, яка полягає у боротьбі зі зміною клімату та посиленні стійкості й адаптації до пов'язаних з кліматом небезпек і катастроф у всіх країнах. На всіх метеостанціях спостерігається тенденція до підвищення як середньорічної температури повітря, так і температури для окремих місяців. Зокрема, в Умані середньорічна температура за весь період

спостережень (138 років) зросла з $+6,8^{\circ}\text{C}$ до $+8,6^{\circ}\text{C}$, тобто на 1,8 градуса. У Кропивницькому середньорічна температура за весь період спостережень (149 років) зросла з $+7,4^{\circ}\text{C}$ до $+8,9^{\circ}\text{C}$, тобто на 1,5 градуса. У Полтаві середньорічна температура за весь період спостережень (199 років) зросла з $+5,9^{\circ}\text{C}$ до $+8,7^{\circ}\text{C}$, тобто на 2,8 градуса (з 1886 року з $+6,4^{\circ}\text{C}$ до $+8,7^{\circ}\text{C}$, тобто на 2,3 градуса). На всіх метеостанціях найбільш значне зростання середньорічних температур відбулося в період з 1989 по 2023 рік. Найменше зросла температура в осінні місяці. За весь період спостережень середньомісячна температура вересня зросла від $0,3^{\circ}\text{C}$ в Умані, $0,6^{\circ}\text{C}$ у Кропивницькому до $1,5^{\circ}\text{C}$ (з 1886 року – $0,9$) у Полтаві. Середньомісячна температура у жовтні зросла від $0,1^{\circ}\text{C}$ в Умані та Кропивницькому до $1,2$ (з 1886 р. – $0,9$) градусів у Полтаві. Середньомісячна температура в листопаді зросла з $0,6^{\circ}\text{C}$ у Кропивницькому, $1,8^{\circ}\text{C}$ в Умані до $1,9^{\circ}\text{C}$ (з 1886 року – $1,7$) у Полтаві. Усі три метеостанції мають спільні періоди підвищення та зниження температури, зокрема, з 1947-1969 по 1985-1995 рр. спостерігалось зниження середньомісячних літніх температур; з 1986-1996 по 2023 рр. – підвищення температури повітря. Температура повітря в літні місяці підвищилася досить суттєво. За весь період спостережень середньомісячна температура червня зросла від $0,9^{\circ}\text{C}$ у Кропивницькому, $1,9^{\circ}\text{C}$ (з 1886 р. – $2,3$) у Полтаві до $2,0^{\circ}\text{C}$ в Умані. Середньомісячна температура липня зросла з $0,3^{\circ}\text{C}$ у Кропивницькому, $1,1^{\circ}\text{C}$ в Умані до $1,3$ (з 1886 року – $1,2$) градусів у Полтаві. Середньомісячна температура у серпні зросла з $0,7^{\circ}\text{C}$ у Кропивницькому та $1,1^{\circ}\text{C}$ в Умані до $1,6^{\circ}\text{C}$ (з 1886 року – $1,6$) у Полтаві. Усі три метеостанції мають спільні періоди підвищення та зниження температури, зокрема, підвищення середньомісячних осінніх температур відбулося з 1999-2001 по 2023 рік.

Ключові слова: *клімат, температура, кліматичні дії, середньомісячна температура повітря, територія України, регіональні зміни клімату, літо, осінь.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 5 червня 2024 р.

Прийнята 18 вересня 2024 р.

Роль турбулентних потоків тепла граничного шару атмосфери у формуванні радіаційних туманів

Олег Грушевський¹

к. геогр. н., доцент, начальник кафедри військової підготовки,

¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна,

e-mail: ogrush@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4396-5905>;

Наталя Міщенко¹

к. геогр. н., ст. викладач кафедри метеорології і кліматології,

e-mail: minatami@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-1152-0103>;

Анатолій Яцишен¹

викладач кафедри військової підготовки,

e-mail: yatanatoli@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-0878-503X>

У статті пропонується підхід до прогнозування еволюції радіаційних туманів через визначення турбулентних потоків тепла у шарі туманоутворення. З використанням даних радіозондування атмосфери збільшеної часової дискретності на ст. Lindenberg, сформована база випадків радіаційного туману. На підставі одержаної повторюваності різних типів стратифікації граничного шару атмосфери визначено, що утворення радіаційних туманів супроводжується формуванням приземного затримуючого шару, верхня межа якого коливається у межах від 200 до 800 м. Спосіб розрахунку коефіцієнта турбулентності, який проводився у межах затримуючого шару атмосфери, обраний з урахуванням особливостей температурної стратифікації граничного шару атмосфери і особливостей вертикального профілю вітру при утворенні радіаційних туманів. Одержані значення коефіцієнту турбулентності, осереднені для кожного з обраних для розрахунку шарів, свідчать, що їх максимальні значення спостерігаються в період формування затримуючого шару і туману. Розрахунок величини турбулентних потоків тепла у граничному шарі атмосфери упродовж періоду еволюції туману свідчить, що зміна їх значень у шарі 0-200 м і шарах 200-400 та 400-900 м знаходяться у протифазі. Максимальні значення турбулентних потоків тепла у шарі 400-900 м припадають на строк 00 СГЧ і коливаються у межах від 0,13 до 0,15 кВт/м², у той час коли їх мінімальні значення ($Q_T = 0,02$ кВт/м²) спостерігаються за 06 СГЧ на рівні 200 м. Розрахунок часової еволюції теплового балансу підстильної поверхні і граничного шару атмосфери, як різниці між турбулентними потоками тепла і ефективним випромінюванням підстильної поверхні, ідентифікував фізичні механізми трансформації температурної стратифікації граничного шару атмосфери і, водночас, показав доцільність використання цієї величини у якості пре-диктора для прогнозу часу утворення і розсіювання радіаційних туманів.

Ключові слова: радіаційний туман, граничний шар, інверсія температури, еволюція, вертикальна потужність, коефіцієнт турбулентності, турбулентний потік тепла.

Як цитувати: Грушевський Олег. Роль турбулентних потоків тепла граничного шару атмосфери у формуванні радіаційних туманів / Олег Грушевський, Наталя Міщенко, Анатолій Яцишен // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 156-165. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-13>

In cites: Hrushevskiy Oleh, Mishchenko Natalia, Yatsyshen Anatoli (2024). The role of turbulent heat flows of the atmospheric boundary layer in the formation of radiation fogs. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 156-165. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-13> [in Ukrainian]

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. В умовах широкомасштабної агресії російської федерації на територію України метеорологічна підтримка дій військ (сил) набула особливого значення. Фактор впливу погодних умов на ефективність ведення бойових дій має вагоме значення для усіх видів Збройних Сил України.

У холодну пору року дії Сухопутних військ суттєво залежать від інтенсивності опадів, видимості, швидкості вітру, прохідності ґрунтів тощо.

Останні події на фронті засвідчили, що інтенсивність атак малими групами при веденні штурмових дій майже не залежить від погодних умов, проте вони чинять вагомий вплив на їх тактику і ефективність. Це, насамперед, зумовлюється обмеженістю застосування FPV-дронів

для ведення аеророзвідки у тактичній глибині при значних швидкостях вітру і наявності обледеніння у хмарах. Інтенсивні опади, зменшуючи прохідність ґрунту, обмежують пересування колісної техніки і ускладнюють штурмові дії піхоти і логістичне забезпечення військ. Прихованість маневрів тактичних груп збільшується в умовах погіршеної видимості, оскільки таке явище як туман не дозволяє вести аеророзвідку і суттєво знижує ефективність застосування тепловізорів.

Зниження температури до від'ємних значень впливає на дальність стрільби артилерії, зменшуючи її на 1 км через підмерзання пороку у гаубицях. Крім цього, з настанням морозів зменшується маневреність артилерії, оскільки у промерзлому ґрунті, наприклад, важче проводити

підкопування гармати.

Варто окремо зупинитися на впливі погодних умов на діяльність авіації і безпілотних літальних апаратів. Якщо вплив хмарності і видимості на дії армійської і тактичної авіації досить відомий, то на дальність польоту і точність далекобійних БПЛА суттєво впливає перехід температури в бік від'ємних значень, через можливість їх подальшого обледеніння.

Оснащення іранських дронів типу Shahed бензиновими двигунами нівелює вплив температури, проте в умовах сильного вітру на висотах їх застосування обмежується. Натомість, для більшості дронів (FPV, «мавіки») на полі бою від'ємні температури є чинником, який може удвічі пришвидшувати розряджання їх літєвих батарей.

Ефективність роботи розвідувальних дронів у простих метеорологічних умовах дозволяє вести спостереження у секторі 25 квадратних кілометрів, а низька хмарність і обмежена видимість знижують цей показник до 5 разів, що є критично важливим для роботи далекобійної артилерії типу M777 та САУ Caesar. Наявність снігового покриву збільшує контрастність цілей, що сприяє їх ефективному виявленню і ураженню.

Усе вищезазначене дозволяє зробити висновок, що погодні умови можуть як ускладнювати, так і полегшувати ведення бойових дій, суттєво впливати на тактику і ефективність застосування підрозділів, озброєння і військової техніки. При однаковості дії погоди на обидві сторони, на перший план виходить точність врахування її впливу на той чи інший вид ведення бойових дій і розробка правильних рекомендацій стосовно урахування наявних чинників.

Як зазначалося, у низці випадків вагоме значення має прихованість маневру військ в умовах ведення противником безперервної аеророзвідки. Така прихованість може досягатися в умовах суттєво обмеженої видимості, яка зумовлюється утворенням туманів. Їх прогноз як в локальних умовах, так і на значних територіях залежить від багатьох чинників, які не завжди враховуються чисельними моделями. Саме тому, будь-яке покращення прогностичних методик для прогнозу усіх видів туману має вагоме значення, яке істотно збільшується в умовах ведення бойових дій.

Актуальність дослідження впливає з необхідності розвитку нових ефективних підходів до прогнозування туману на локальному рівні, з використанням предикторів високої інформативності, доступними у оперативній практиці з подальшою інтеграцією одержаних методик до спеціалізованих платформ.

Крім вже опрацьованих предикторів (синоптична ситуація, хмарність, вітер, вологість) на

утворення і еволюцію радіаційних туманів впливають турбулентні потоки тепла і вологи у граничному шарі атмосфери, які є порівняно маловивченим проте вагомим чинником підвищення ефективності їх прогнозування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Прогноз утворення радіаційних туманів, як правило, полягає у порівнянні мінімальної температури повітря з температурою туманоутворення. Якщо прогноз першої величини добре опрацьований, то труднощі прогнозу другої пов'язані, насамперед, з необхідністю визначення додаткового зниження температури (після досягнення нею значення температури точки роси приблизно у момент заходу Сонця), необхідного для конденсації певної кількості води у одиниці об'єму повітря, яке й забезпечить досягнення критеріального значення горизонтальної видимості.

Це додаткове зниження, як випливає з робіт [1,2,3], залежить від багатьох факторів – турбулентного переносу тепла й вологи, наявності або відсутності їх адвекції, а також процесів конденсації і випаровування з підстильної поверхні. Методики врахування усіх цих чинників висвітлені, наприклад, у [4,5]. Набагато менше уваги приділено аналізу особливостей температурної стратифікації граничного шару атмосфери на утворення туманів, хоча вони є дієвим механізмом формування у ньому турбулентного перенесення тепла й вологи.

Спроби врахування впливу температурно-вологісної стратифікації граничного шару атмосфери на температуру туманоутворення висвітлені у роботах Сандерса [12], які, з одного боку, не дають відповіді на питання щодо динаміки розвитку процесу туманоутворення, а з іншого – прив'язані до строків радіозондування атмосфери, що, безумовно, дещо не узгоджується з фізикою процесу і знижує ефективність застосування прогнозу у практичній діяльності.

Процес охолодження повітря, який є необхідною умовою утворення туману, відбувається у граничному шарі завдяки турбулентному перемішуванню у вертикальній площині, кількісним виразом якого є коефіцієнт турбулентності. Турбулентний потік тепла, який розраховується за формулою

$$Q_T = c_p \rho k \left(\frac{\partial T}{\partial z} - \gamma_a \right), \quad (1)$$

де $c_p = 1,03$ Дж/кг·К – питома теплоємність повітря при сталому тиску;

$\rho = 1,3$ кг/м³ – густина повітря; k – коефіцієнт турбулентності, м²/с;

$\frac{\partial T}{\partial z}$ – вертикальний градієнт температури повітря, °С/м;

$\gamma_a = 0,0098^\circ\text{C}/\text{м}$ – сухоадіабатичний градієнт температури;

через співвідношення з величиною ефективного випромінювання підстильної поверхні впливає на тип стратифікації граничного шару. Рівність величин турбулентного потоку і ефективного випромінювання означатиме утворення рівноважних умов (ізотермія), за умови $E_0 > c_p \cdot \rho \cdot k \cdot \gamma_a$ (2) спостерігатиметься приземна інверсія, а при $E_0 < c_p \cdot \rho \cdot k \cdot \gamma_a$ (3) – піднесена.

Виділення раніше невіршених проблем.

Таким чином, вказаний критерій, імовірно, дає змогу здійснювати прогноз еволюції туману, оскільки коливання видимості у ньому пов'язані з вертикальною перебудовою температурно-вологісної стратифікації. До утворення туману і на початку його існування виконується умова (2), що зумовлює утворення приземної інверсії, погіршення видимості біля поверхні землі і, у той же час, зниження величини ефективного випромінювання підстильної поверхні. Після цього випромінюючою поверхнею стає верхня межа шару туману, турбулентний потік тепла спрямовується донизу, приземна інверсія трансформується у піднесену (або взагалі руйнується), видимість біля землі покращується, що є свідченням виконання умови (3).

Метою роботи є визначення ролі турбулентних потоків тепла у граничному шарі атмосфери при утворенні радіаційних туманів та їх впливу на часову еволюцію туманів для оцінки використання їх характеристик у якості прогностичного критерію.

Основний матеріал дослідження та пояснення наукових результатів. Для проведення розрахунків накладалося декілька умов на характер вихідних даних. Перш за все, дані про температурну стратифікацію граничного шару атмосфери повинні були мати максимальну часову дискретність. Залучення прогностичних даних з 3-годинним розділенням вважалося недоцільним, оскільки точність прогнозування параметрів температурних інверсій у граничному шарі атмосфери наразі є недостатньою. Тому, як найінформативніші, залучалися дані температурно-вітрового зондування з 6-годинною дискретністю і паралельним проведенням наземних метеоспостережень на станції Lindenberg (3732) з координатами $52^\circ 12' 14''$ пн.ш., $14^\circ 06' 42''$ сх.д.

До відбору випадків туману, у якості головних, висувалися вимоги їх утворення у внутрішньомасових умовах (однорідність поля температури), час утворення після заходу Сонця (наявність радіаційного чинника), тривалості явища не менше 3 годин (усталеність процесу). Для підвищення об'єктивності результатів, перевага надавалася випадкам туманів, які утворилися

після 00 СГЧ, з метою одержання можливості діагностування передумов їх виникнення. Дані зондування, які залучалися для розрахунків, знаходилися у послідовності 18, 00, 06 та 12 СГЧ, тобто діагностиці підлягали умови від заходу Сонця (збільшення ролі радіаційного чинника) до повного прогрівання підстильної поверхні (мінімізація впливу радіаційного чинника).

Прогностична цінність формули (1) полягає у тому, що три величини, які входять до неї, є відносно сталими, а прогностичні значення температури у граничному шарі атмосфери досить ефективно визначаються наявними чисельними моделями.

Для з'ясування типів стратифікації нижньої частини ГША у дні з наявністю туману одержана гістограма їх повторюваності (рис. 1).

Для цього усі види стратифікації були розділені на 5 типів – піднесена та приземна інверсії ($\gamma \leq -0,3^\circ\text{C}/100\text{ м}$), піднесена та приземна ізотермії ($-0,3 < \gamma \leq 0,0^\circ\text{C}/100\text{ м}$) і зниження температури з висотою ($\gamma \geq 0,3^\circ\text{C}/100\text{ м}$). За кожен строк зондування (18, 00, 06 та 12 СГЧ) визначався тип стратифікації і розраховувалася його повторюваність від загальної кількості випадків.

Аналіз гістограми свідчить, що піднесені інверсія та ізотермія або не спостерігалися при утворенні туманів, або їх повторюваність є незначною (4,8%) незалежно від строку зондування. Для зручності розрахунків випадки наявності інверсій та ізотермій узагальнено як випадки наявності затримуючого шару біля поверхні землі. У цьому разі, для строку 00 СГЧ повторюваність приземного затримуючого шару становить 76,2%, а для строку 06 СГЧ – 95,3%. Таким чином, характерною ознакою періоду з 00 до 06 СГЧ у дні з утворенням туману є наявність приземного затримуючого шару, що цілком узгоджується з загальними уявленнями про метеорологічні умови утворення радіаційних туманів.

Натомість, зниження температури з висотою у шарі туманоутворення відзначається у строки 18 СГЧ (66,7%) та 12 СГЧ (71,4%), що демонструє внесок радіаційного чинника у процес туманоутворення.

Отже, від моменту заходу Сонця і до його сходу, у випадках утворення радіаційних туманів, відбувається перебудова стратифікації граничного шару атмосфери (наприклад, рис. 2), часова структура якої визначає еволюцію самого туману.

Процес перенесення водяної пари, тепло- і вологообмін підстильної поверхні з атмосферою та між її шарами зумовлюється, насамперед, величиною коефіцієнта турбулентності, з розрахунком якого виникають певні нюанси, які зумовлюються його варіативністю залежно від висоти

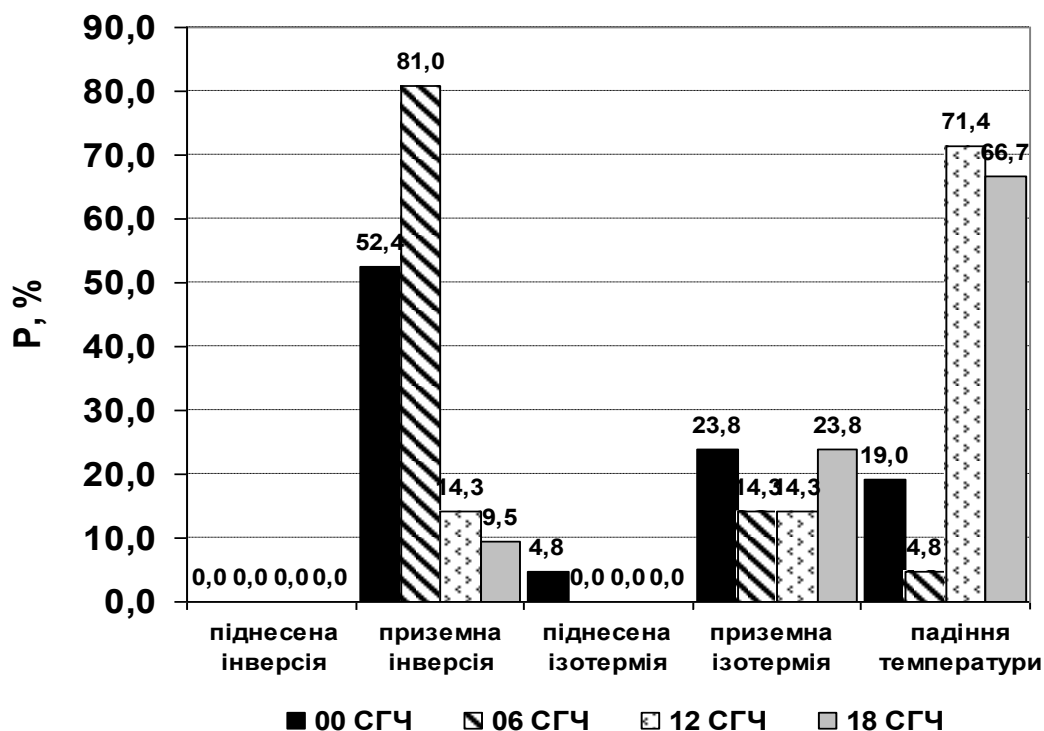


Рис. 1. Повторюваність типів стратифікації нижньої частини ГША у дні з утворенням радіаційного туману на ст. Lindenberg (3732) /
Fig. 1. The recurrence of stratification types in the lower part of the GHA on days with radiation fog formation at station Lindenberg (3732)

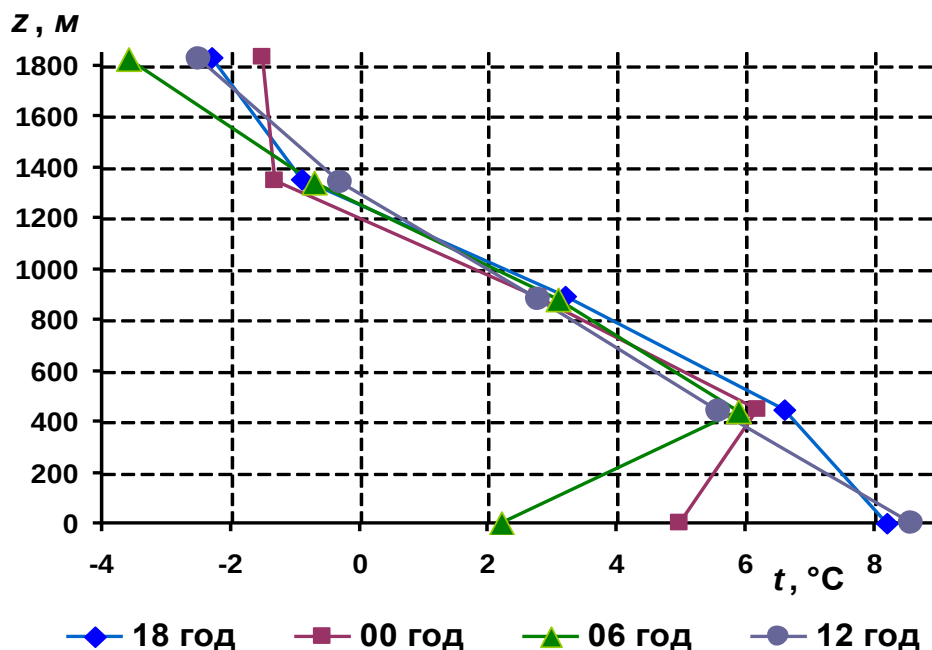


Рис. 2. Приклад часової трансформації температурної стратифікації у граничному шарі атмосфери при утворенні радіаційного туману (ст. Lindenberg, 12-13.10.2020) /
Fig. 2. An example of temporal transformation of temperature stratification in the atmospheric boundary layer during radiation fog formation (station Lindenberg, October 12-13, 2020)

та типу стратифікації атмосфери. Наприклад, припущення про лінійність його зміни до висоти 200 м порушується при наявності інверсій, що неможливо ігнорувати для випадків туманів. Розрахунок з урахуванням вертикальних градієнтів швидкості вітру наштовхується на їх малу

величину у туманах та помилки вимірювання у граничному шарі, що позначається на точності розрахунків і, внаслідок цього, на трактовці результатів.

Розрахунок коефіцієнта турбулентності може здійснюватися за декількома схемами, проте

кожна з них матиме певні обмеження, що пояснюється відмінністю розподілу температури і швидкості вітру у граничному шарі атмосфери при утворенні і еволюції туманів від тих законів їх розподілу (логарифмічний, степенний, експоненційний, універсальний тощо), які застосовуються для апроксимації вертикальних профілів метеовеличин при визначенні схеми для розрахунку турбулентних вертикальних потоків різних субстанцій [19,20]. Це досить суттєвим чином позначається на кількісних значеннях величини турбулентного обміну.

У якості варіанту для розрахунку коефіцієнта турбулентності набула поширення формула Лайхтмана

$$\bar{k} = 3,2u_g^2 \frac{\theta_0 \cdot 10^{-6}}{\gamma_a - \gamma} \sin \phi, \quad (4)$$

де u_g – складова швидкості геострофічного вітру;

θ_0 – потенціальна температура біля поверхні землі;

ϕ – широта місця.

З іншого боку, для розрахунку коефіцієнта турбулентності в умовах утворення радіаційних туманів доцільнішою для використання виглядає так звана 4-а формула Лайхтмана [10], яка одержана у припущенні незмінності температурних градієнтів з висотою

$$k = \frac{2l(lg e)^2}{\left(\frac{d \lg[(u_g - u)^2 + v^2]}{dz}\right)^2}, \quad (5)$$

де $l = 2\omega \cdot \sin \phi$ – параметр Коріоліса;

u, v – зональна і меридіональна складові швидкості вітру.

Або ж, у разі графічної побудови залежності за значеннями знаменника по вісі X і значеннями висоти по вісі Y , формула (5) набуде виду

$$k = \frac{2l(lg e)^2}{ctg^2 \alpha}, \quad (6)$$

де α – кут нахилу прямої апроксимації.

Додатковою перевагою саме цієї формули є її адаптованість для однорідних повітряних мас (рух стаціонарний, траєкторії частинок мають незначну кривизну, баричний градієнт з висотою не змінюється), що цілком задовольняє синоптичним і метеорологічним умовам утворення радіаційних туманів.

Далі постає необхідність визначення товщини шару, у якому необхідно розраховувати значення коефіцієнта турбулентності. У одному з підходів [10,11,18] пропонується використовувати значення висоти граничного шару атмосфери, одержане шляхом його розрахунку за допомогою формули

$$H_0 = u_g \sqrt{\frac{\pi}{g} \frac{\theta_0}{\gamma_a - \gamma}}.$$

Результати розрахунків для ст. Lindenberg свідчать, що одержані значення при утворенні радіаційних туманів коливаються у межах 200 м і узгоджуються, наприклад, з кліматологічними характеристиками верхньої межі шару радіаційних туманів над територією України [2].

Варто звернути увагу на те, що утворення радіаційних туманів супроводжується наявністю приземного затримуючого шару, що зумовлює доцільність визначення характеристик турбулентності у його межах. Використання у аналогічних розрахунках значення товщини граничного шару атмосфери виглядає доцільнішим для випадків адвективних туманів, для яких є очевидним утворення піднесених інверсій [13,14,15].

Оперуючи даними радіозондування збільшеної дискретності, розглянемо повторюваність висот верхньої межі приземної інверсії при утворенні туману (рис. 3) для строків 00 та 06 СГЧ.

Аналіз гістограми показує, що приземні інверсії, у разі утворення радіаційного туману, охоплюють шар від 200 до 800-1000 м, при цьому від строку 00 СГЧ до строку 06 СГЧ спостерігається «розбухання» шару інверсії, яке, імовірно, зумовлює аналогічний процес у тумані.

Автори [6,7,8,9] пропонують у якості товщини шару туману використовувати висоту нижньої межі інверсії або ж її поєднання зі значеннями відносної вологості повітря $f > 90\%$. Проте, як зазначалося, такий підхід не узгоджується з кліматологією інверсій при утворенні радіаційних туманів і може зумовити похибки у значеннях коефіцієнту турбулентності.

Якщо вважати, що верхня межа шару туману не перевищує висоту верхньої межі інверсії, розрахунок коефіцієнта турбулентності доцільно провести, як мінімум, у межах цих значень.

Зауважимо, що при виборі алгоритму розрахунку коефіцієнта турбулентності між (5) та (6), крім наведених вище аргументів, необхідно враховувати, що використання формули (5) нівелює у (1) вплив вертикального розподілу температури, поєднання впливу якого зі швидкістю вітру створює ту ступінь турбулентності, яка потрібна для поширення туману по вертикалі [16, 17].

Результати розрахунку коефіцієнта турбулентності для відібраних випадків туману, наведені у табл. 1, показують, що турбулентний обмін майже відсутній у шарі інверсії. Його величина поступово зростає зі збільшенням вертикальної потужності шару, що пояснюється наближенням швидкості вітру до геострофічних значень і, відповідно, зростанням різниці $u_g - u$.

Зауважимо, що середні значення k у шарах

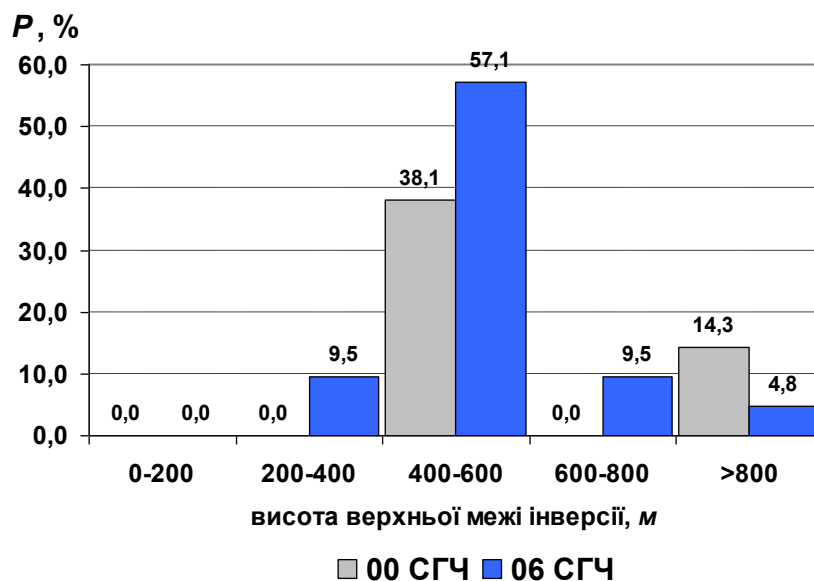


Рис. 3. Повторюваність градацій верхньої межі приземних інверсій для випадків радіаційного туману на ст. Lindenberg за 00 та 06 СГЧ /

Fig. 3. The recurrence of the upper boundary grades of surface inversions for cases of radiation fog at station Lindenberg at 00:00 and 06:00 UTC

200-1000 та 200-1500 м майже не відрізняються, що дозволяє зробити висновок про слабкий між-рівневий обмін у всьому ГША при формуванні туману. Іншою характерною рисою є те, що максимальні значення k спостерігаються від 00 до 06 СГЧ, тобто, як впливає з рис. 1, у період форму-

вання затримуючого шару.

Таким чином, турбулентні потоки тепла і вологи, необхідні для утворення туману, є найбільшими у шарах вище 200 м (табл. 2) при формуванні затримуючого шару і туману, ніж при їх деградації.

Таблиця 1 / Table 1

Значення коефіцієнта турбулентності k , m^2/s , розраховані за (5) для шарів різної товщини у дні з туманами на ст. Lindenberg /

The value of the turbulence coefficient k , m^2/s , calculated according to (5) for layers of different thicknesses on foggy days at St. Lindenberg

Години СГЧ	Товщина шару, м				
	200-700	200-800	200-900	200-1000	200-1500
18	0,08	0,06	0,85	1,80	2,11
00	0,09	0,03	2,29	2,70	3,92
06	0,15	0,14	2,46	2,64	2,34
12	0,01	0,03	0,71	1,08	1,59
$k_{\text{сер}}$	0,08	0,06	1,58	2,05	2,49

Таблиця 2 / Table 2

Осереднені значення турбулентних потоків тепла Q_t , kW/m^2 , у ГША при наявності туманів на ст. Lindenberg /

The average values of turbulent heat flows Q_t , kW/m^2 , in the GHA in the presence of fog at st. Lindenberg

Товщина шару, м	години СГЧ			
	18	00	06	12
0-200	0,07	0,06	0,02	0,06
200-400	0,09	0,13	0,10	0,08
400-900	0,09	0,15	0,11	0,08

З аналізу рис. 4 випливає, що у момент заходу Сонця спостерігається приблизна рівність

значень турбулентних потоків тепла на всіх рівнях ГША. Для періоду утворення приземного

затримуючого шару (з 18 до 00 СГЧ) є характерним збільшення турбулентних потоків тепла з його верхніх шарів – чим вище розташований шар, тим інтенсивніше відбувається теплопередача. У той же час у приземному шарі 0-200 м відбувається зменшення інтенсивності турбулентних потоків тепла через формування над ним затримуючого шару. Після досягнення максимальних значень, в період з 00 СГЧ до 06 СГЧ,

спостерігається зменшення інтенсивності теплопередачі, при цьому приземний шар майже не віддає тепло у вище розташовані шари – інтенсивність інверсії починає зменшуватися.

Після сходу Сонця (з 06 до 12 СГЧ) інтенсивність турбулентних потоків тепла у приземному шарі стрімко збільшується, а у вище розташованих продовжує падати, що є ознакою руйнування приземного затримуючого шару і розсіювання туману.

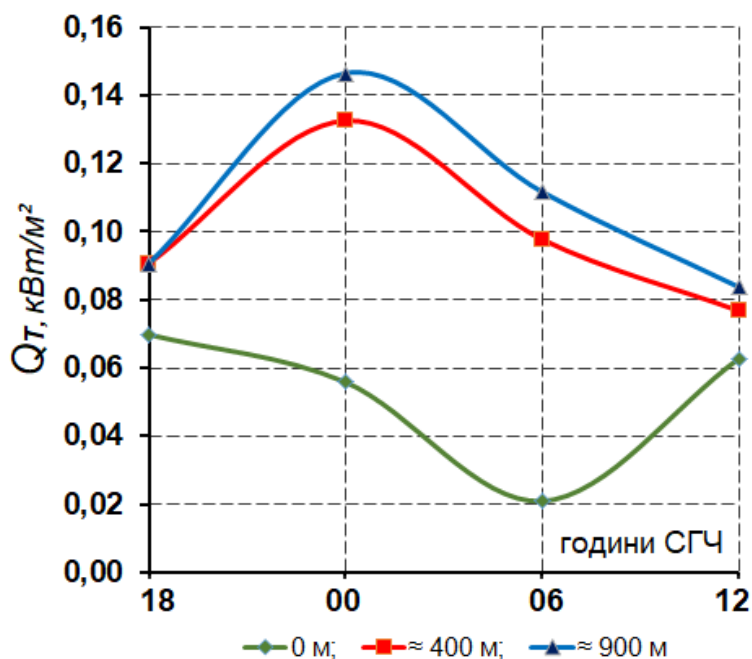


Рис. 4. Часова еволюція осереднених турбулентних потоків тепла (Q_T , кВт/м²) у ГША в радіаційних туманах на ст. Lindenberg /

Fig. 4. The temporal evolution of averaged turbulent heat fluxes (Q_T , kW/m²) in the atmospheric boundary layer during radiation fogs at station Lindenberg

Дослідження часової структури теплового балансу ГША (різниця між величиною турбулентних потоків тепла Q_T і ефективним випромінюванням підстильної поверхні E_0) показує, що період формування туману супроводжується інтенсивним охолодженням підстильної поверхні, яке триває до другої половини ночі. Натомість у шарі формування інверсії, до цього ж періоду, спостерігається перевищення турбулентних потоків тепла над ефективним випромінюванням, що створює умови для формування радіаційної інверсії.

Вирівнювання значень на визначених рівнях вказує на час зміни напрямку потоків тепла і трансформації інверсії з її подальшою руйнацією, що зумовлює розсіювання туману. Таким чином, визначення цього часу, а також величина різниці між значеннями Турбулентного потоку тепла і ефективним випромінюванням підстильної поверхні може використовуватися у якості предиктора для прогнозу часу розсіювання туману.

Висновки з дослідження та перспективи подальших розвідок:

1) утворення і подальша еволюція радіаційних туманів тісно пов'язані з наявністю приземного затримуючого шару (інверсії або ізотермії), який спостерігається у 76,2% випадків у 00 СГЧ та 95,3% випадків у 06 СГЧ, період до утворення туману характеризується відсутністю приземного затримуючого шару, а процес розсіювання – його руйнуванням;

2) вибір процедури розрахунку коефіцієнта турбулентності для випадків туману повинен враховувати особливості сприятливих для їх утворення синоптичних ситуацій та температурної стратифікації у ГША;

3) визначення коефіцієнта турбулентності для випадків утворення радіаційного туману доцільно проводити для шару, товщина якого охоплює весь приземний затримуючий шар (за винятком приземного шару), критерієм визначення його верхньої межі пропонується брати осереднені значення верхньої межі затримуючих шарів при наявності радіаційних туманів;

4) інтенсивність турбулентних потоків тепла у тумані визначається розподілом у ньому ко-

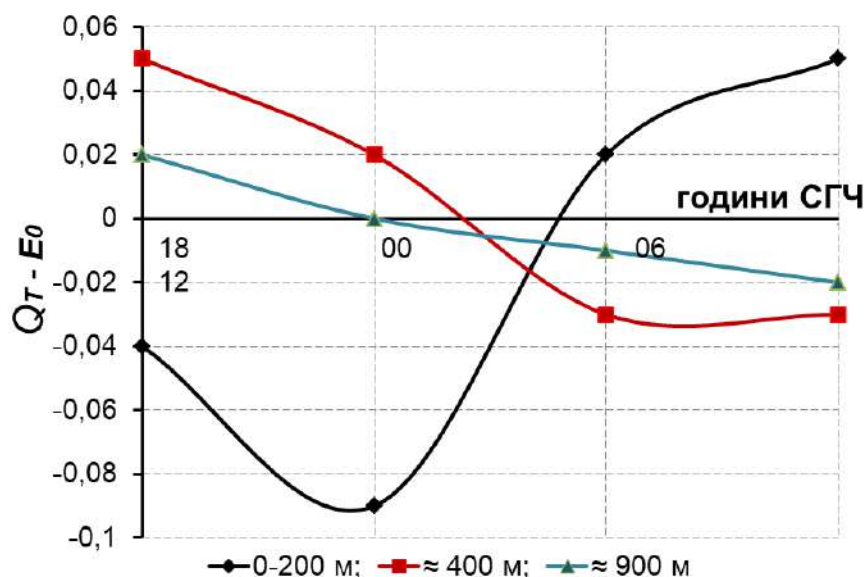


Рис. 5. Часові зміни різниці між турбулентним потоком тепла Q_T , кВт/м^2 і ефективним випромінюванням підстильної поверхні E_0 , кВт/м^2 біля поверхні землі і у ГША /

Fig. 5. Temporal changes in the difference between the turbulent heat flow Q_T (kW/m^2) and the effective radiation of the subsoil surface E_0 (kW/m^2) near the surface of the earth and in the atmospheric boundary layer (GHA)

ефіцієнта турбулентності, значення якого сягають пікових значень в період максимальної інтенсивності інверсії поблизу її верхньої межі;

5) періоди до початку утворення туману і після його розсіювання характеризуються приблизною рівністю значень турбулентних потоків тепла в усьому ГША, при утворенні туману відбувається зменшення теплопередачі від приземного шару та її інтенсивне збільшення з верхніх шарів затримуючого шару;

6) процес деградації затримуючого шару і

зменшення інтенсивності туману супроводжується збільшенням значень турбулентних потоків тепла від приземного шару і зменшенням від верхніх шарів ГША;

7) вирівнювання значень теплового балансу підстильної поверхні і на вищих рівнях у ГША є ознакою трансформації приземної інверсії і подальшого розсіювання туману і, відповідно, може використовуватися як прогностичний алгоритм за умови задовільного прогнозу температурної стратифікації у ГША.

Список використаної літератури

1. Грушевський О., Міщенко Н. Прогноз низької хмарності і туманів. Навчальний посібник. – ОДЕКУ, електронна версія, 2023. – 128 с.
2. Ефимов В.А., Грушевський О.Н. О роли подстилающей поверхности в формировании атмосферных мезомасштабных процессов над северным Причерноморьем // Вісник Одеського національного університету ім. Мечникова, 2007. – т. 12. – Вип. 8 – С. 80-85.
3. Кошеленко И.В. Туманы // Труды УкрНИГМИ. – 1977. – Вып. 155. – 215 с.
4. Dejmal, K., Repal, V. Implementation of methods for the radiation fog prediction. – International Journal of Energy and Environment. – 2010. – Vol. 4, No. 3. – P. 79-87. ISSN. 1109-9577.
5. D. Y. Liu, W. L. Yan, S. J. Yang, M. J. Pu, Z. H. Li Niu A study of the physical processes of an advection fog boundary layer / Boundary Layer Meteorology. 2016. Vol. 158. 1. Pp. 125-138.
6. Liu M., Yan W. L., Zhang B. Analysis on persistence and intensification mechanism of fog and haze in Jiangsu in January 2013. Meteorological Monthly, vol. 40. 2014, P. 835-843.
7. Roach, W.T., Back to basics: Fog: Part 2 - The formation and dissipation of land fog. Weather, 1995: 50, P. 7-11.
8. Stolaki S., Haefelin M., Lac J.-C. C. Influence of aerosols on the life cycle of a radiation fog event. A numerical and observational study. Atmospheric Research. 2015, vol. 151, P. 146-161.
9. Li Z. H., Liu D. Y., Yang J. The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. 2011, vol. 35. P. 41-54.
10. Лайхтман Д.Л. Некоторые свойства пограничного слоя атмосферы. Труды ГГО, вып. 56, 1956.
11. Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Muller, M.D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G. and Cober, S.G. Fog research: a review of past achievements and future perspectives. Pure and Applied Geophysics 2007, 164(6-7), 1121-1159. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>

12. Saunders, W.E., 1950: A method of forecasting the temperature of fog formation. *Meteorological Society*, 1950. – 76, 2403-2413.
13. Thierry B., Renaud L. On the predictability of radiation fog formation in a mesoscale model: a case study in heterogeneous terrain. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. 165 p. <https://doi.org/10.3390/atmos10040165>
14. Price J.D. Radiation fog. Part I. Observations of stability and drop size distributions. *Boundary Layer Meteorology*. 2011. Pp. 167–191. <https://www.proquest.com/docview/859504087> (Accessed: 24 May 2022).
15. Ismail Gultepe, Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting, 2012, pp.1121-1159.
16. Lang, H.; Qin, K.; Yuan, L.; Xiao, X.; Hu, Y.; Rao, L.; Wang, L. Particle size distributions and aerosol optical properties during haze–fog episodes in the winter of Xuzhou. *China Environ. Sci.* 2016, 36, 2260–2269.
17. Yang, Y.; Gao, S. The Impact of Turbulent Diffusion Driven by Fog-Top Cooling on Sea Fog Development. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JD031562>
18. Niu, S., C. Lu, H. Yu, L. Zhao, J. Lu. Fog research in China: an overview. *Adv Atmos Sci* 2010, 27(3), 639 – 662. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8174-8>
19. Lakra K, Avishek K. A review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rend Lincei Sci Fis Nat.* 2022;33(2):319-353. Epub 2022 Mar 14. PMID: 35309246; PMCID: PMC8918085. <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>
20. Stolaki, S., Pytharoulis, I. and Karacostas, T. A study of fog characteristics using a coupled WRF–COBEL model over Thessaloniki airport, Greece. *Pure and Applied Geophysics* 2012, 169(5-6), 961–981. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0393-0>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

The role of turbulent heat flows of the atmospheric boundary layer in the formation of radiation fogs

Oleh Hrushevskyi¹

PhD (Geography), Associate Professor, Head of the Department of Military Training,

¹ I. I. Mechnikov Odesa National University, Odesa, Ukraine;

Natalia Mishchenko¹

PhD (Geography), Senior Lecturer at the Department of Meteorology and Climatology;

Anatolii Yatsyshen¹

Lecturer at the Department of Military Training

Introduction. The article presents an approach to forecasting the evolution of radiation fog by determining the turbulent heat fluxes in the fog formation layer. Utilizing high temporal resolution data from atmospheric radio sondes at Lindenberg station, a database of radiation fog cases has been established. Based on the frequency of different types of stratification of the atmospheric boundary layer, it has been found that the formation of radiation fog is associated with the development of a near-surface inversion layer, where the upper boundary fluctuates between 200 and 800 meters.

The aim of the study. The purpose of the work is to determine the role of turbulent heat flows in the boundary layer of the atmosphere in the formation of radiation fogs and their influence on the temporal evolution of fogs in order to evaluate the use of their characteristics as a prognostic criterion.

Relevance of the research. Stems from the need to develop new effective approaches to fog forecasting at the local level, using highly informative predictors available in operational practice with further integration of the resulting techniques into specialized platforms. In addition to the already worked out predictors (synoptic situation, cloudiness, wind, humidity), the formation and evolution of radiation fogs are influenced by turbulent flows of heat and moisture in the boundary layer of the atmosphere, which are a relatively little-studied but important factor in improving the effectiveness of their forecasting

Analysis of recent research and publications. The forecast for the formation of radiation fog typically involves comparing the minimum air temperature with the temperature needed for fog formation. While the forecast for the former is generally well-developed, challenges in predicting the latter primarily stem from the need to determine the additional decrease in temperature (after it reaches the dew point temperature around sunset) that is necessary for the condensation of a specific amount of water per unit volume of air, which will ensure that the critical value of horizontal visibility is achieved.

Highlighting previously unsolved problems. Thus, the specified criterion likely enables the forecasting of fog evolution, as visibility fluctuations within it are associated with the vertical restructuring of temperature-humidity stratification. Prior to the formation of fog and at the beginning of its existence, condition (2) is satisfied, leading to the development of a surface inversion, a deterioration of visibility near the ground, and, at the same time, a reduction in the effective radiation of the underlying surface.

Results and discussion. The choice of the procedure for calculating the turbulence coefficient for fog cases should consider the characteristics of the synoptic situations favorable for their formation and the temperature stratification in the atmospheric boundary layer. Determining the turbulence coefficient for cases of radiation fog formation should ideally be conducted for a layer whose thickness encompasses the entire near-surface stabilizing layer (excluding the surface layer). The criterion for determining its upper boundary is proposed to be the averaged values of the upper limits of the stabilizing layers in the presence of radiation fogs.

Keywords: radiation fog, boundary layer, temperature inversion, evolution, vertical power, turbulence coefficient, turbulent heat flux.

References

1. Hrushevsky O., Mishchenko O.N. (2023). Forecast of low cloudiness and fog. Study guide. ODEkU, electronic version, 128. [in Ukrainian]
2. Efimov V.A., Grushevsky O.N. (2007). On the role of the underlying surface in the formation of atmospheric mesoscale processes over the northern Black Sea region. *Bulletin of the Odessa National University. Mechnikova*, 12 (8), 80-85.
3. Koshelenko I.V. (1977). *Fogs Proceedings. UkrNIGMI*, 155 –215.
4. Dejmal, K., Repal, V. (2010). Implementation of methods for the radiation fog prediction. – *International Journal of Energy and Environment*, 4(3), 79-87.
5. D. Y. Liu, W. L. Yan, S. J. Yang, M. J. Pu, Z. H. Li Niu A. (2016). Study of the physical processes of an advection fog boundary layer. *Boundary Layer Meteorology*, 158 (1), 125-138.
6. Liu M., Yan W. L., Zhang B. (2014). Analysis on persistence and intensification mechanism of fog and haze in Jiangsu in January. *Meteorological Monthly*, 40, 835-843.
7. Roach, W.T., Back to basics: (1995). Fog. The formation and dissipation of land fog. *Weather*, 2(50), 7-11.
8. Stolaki S., Haeffelin M., Lac J.-C. C. (2015). Influence of aerosols on the life cycle of a radiation fog event. A numerical and observational study. *Atmospheric Research*, 151, 146–161.
9. Li Z. H., Liu D. Y., Yang J. (2011). The microphysical processes and macroscopic conditions of the radiation fog droplet spectrum broadening. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 35, 41–54.
10. Leichtman D.L. (1956) Some properties of the atmospheric boundary layer. *Proceedings of GGO*, 56.
11. Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., Muller, M.D., Pagowski, M., Hansen, B., Ellrod, G., Jacobs, W., Toth, G. and Cober, S.G. (2007). Fog research: a review of past achievements and future perspectives. *Pure and Applied Geophysics*. 164(6-7), 1121–1159. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0211-x>
12. Saunders, W.E., (1950). A method of forecasting the temperature of fog formation. *Meteorological Society*, 76, 2403-2413.
13. Thierry B., Renaud L. (2019). On the predictability of radiation fog formation in a mesoscale model: a case study in heterogeneous terrain. *Atmosphere*, 10, 165. <https://doi.org/10.3390/atmos10040165>
14. Price J.D. (2011). Radiation fog. Part I. Observations of stability and drop size distributions. *Boundary Layer Meteorology*, 167–191. <https://www.proquest.com/docview/859504087>
15. Ismail Gultepe. (2012). Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting, 1121-1159.
16. Lang, H.; Qin, K.; Yuan, L.; Xiao, X.; Hu, Y.; Rao, L.; Wang, L. (2016) Particle size distributions and aerosol optical properties during haze–fog episodes in the winter of Xuzhou. *China Environ*, 36, 2260–2269.
17. Yang, Y.; Gao, S. (2020). The Impact of Turbulent Diffusion Driven by Fog-Top Cooling on Sea Fog Development. *J. Geophys. Res. Atmos.* <https://doi.org/10.1029/2019JD031562>
18. Niu, S., C. Lu, H. Yu, L. Zhao, J. Lu. (2010). Fog research in China: an overview. *Adv Atmos Sci*, 27(3), 639 – 662. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8174-8>
19. Lakra K, Avishek K. A. (2022). Review on factors influencing fog formation, classification, forecasting, detection and impacts. *Rend Lincei Sci Fis Nat.*, 33(2), 319-353. <https://doi.org/10.1007/s12210-022-01060-1>
20. Stolaki, S., Pytharoulis, I. and Karacostas, T. A. (2012). Study of fog characteristics using a coupled WRF–COBEL model over Thessaloniki airport, Greece. *Pure and Applied Geophysics.*, 169(5-6), 961–981. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0393-0>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 9 October 2024

Accepted 18 November 2024

Демографічний розвиток країн Північної Європи: актуальні тренди для українського досвіду

Ірина Гудзеляк

к. геогр. н., доцент, зав. кафедри економічної і соціальної географії імені професора Олега Шаблія,
Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна,
e-mail: iryna.hudzelyak@lnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0890-5085>

У статті за допомогою статистичного методу проаналізовано демографічний розвиток країн Північної Європи – Норвегії, Швеції, Фінляндії, Данії та Ісландії. Сучасні демографічні параметри регіону обумовлені відсутністю великих людських втрат у двох світових війнах, внутрішньополітичною та соціально-економічною стабільністю держав, які гарантують соціальну рівність, впевненість людей в добробуті та безпеці. У результаті сформувалася така модель демографічної поведінки населення, яка тривалий час забезпечувала природний і міграційний приріст населення. Тому демографічні параметри Північної Європи можна вважати еталоном для розробки заходів подолання демографічних загроз у поствоєнний період в Україні. Попри ефективну демографічну політику, в усіх країнах суттєво скоротився рівень народжуваності. Сумарний коефіцієнт народжуваності уже не забезпечує простого відтворення поколінь. Перехід до звуженого відтворення став незворотнім. Суттєво скоротилися темпи приросту населення. Міграційний приріст в основному забезпечує зростання людності в усіх країнах. Завдяки імміграції та порівняно з іншими європейськими державами високій народжуваності у регіоні сповна вдалося використати демографічні дивіденди, які забезпечили економічне зростання. Проте притік мігрантів не вирішив проблеми зниження народжуваності. Вікова структура населення країн Північної Європи зазнає помітних трансформацій. Зростання тривалості життя і зниження народжуваності визначили дуже високий рівень демографічного старіння. Це вимагає перегляду соціальної політики, впливає на бюджети територій. У регіоні на субнаціональному рівні посилюються демопросторові диспропорції: у багатьох сільських територіях відбувається депопуляція, а міські регіони зростають. Найгірша демографічна ситуація склалася у Фінляндії в прикордонних з Росією територіях. У Північній Європі помітно послабилось етнолінгвістичне домінування корінних народів. Загострилися інші внутрішньодержавні проблеми, пов'язані зі слабкою інтеграцією мігрантів у приймаючі суспільства. Визначення орієнтирів демографічної і міграційної політики України має враховувати нові виклики, які проявляються в країнах Північної Європи.

Ключові слова: населення, демографічний розвиток, темпи зростання, народжуваність, демографічне старіння, міграція, Північна Європа, Україна.

Як цитувати: Гудзеляк Ірина. Демографічний розвиток країн Північної Європи: актуальні тренди для українського досвіду / Ірина Гудзеляк // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 166-179. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-14>

In cites: Hudzelyak Iryna (2024). Demographic development of the countries of Northern Europe: current trends for the Ukrainian experience. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 166-179. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-14> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Північна Європа виділяється з-поміж інших країн Європи більш сприятливими тенденціями демографічного розвитку. В п'яти країнах регіону, Норвегії, Швеції, Фінляндії, Данії та Ісландії, після Першої світової війни формується соціально-демократична держава загального добробуту, або скандинавська модель, головною ознакою якої є підтримка загальної зайнятості, соціальна політика вирівнювання доходів населення, всезагальна доступність до усіх соціальних благ – якісної освіти та медицини, соціального захисту, особистої безпеки, пенсійного забезпечення, допомоги сім'ям з дітьми тощо. При цьому економічна політика цих держав, яка орієнтована на високий рівень і якість життя населення, ґрунтується на принципах економічної свободи, вільного ринку, відкритості до глобалізаційних процесів та демократичного управління [13]. Великий вплив на демографічний розвиток Північної Європи мало те, що регіон не зазнав великих демографічних втрат у двох світових війнах. В умовах внутріш-

ньополітичної та соціально-економічної стабільності держави, яка гарантує соціальну рівність, впевненість людей в добробуті та захищеності відбувається становлення особливої демографічної поведінки населення.

Усі ці соціально-економічні фактори зумовили формування у країнах Північної Європи особливих параметрів демографічної ситуації: у більшості країн народжуваність перевищує смертність населення; відбувався значний міграційний притік, який у часі уповільнив процес переходу до малодітної сім'ї; країнам вдалося сповна використати демографічні дивіденди для формування такого ринку праці, який максимально сприяв економічному росту. Отже, характер демографічних процесів і сучасну демографічну структуру в країнах Північної Європи можна вважати еталоном для порівняння з іншими країнами світу. А флагманом соціально-демографічних змін С. Канталіні, С. Ольссон-Вейк, Г. Андерссон вважають Швецію [15]. Досвід країн Північної Європи у здійсненні демографічної і міг-

раційної політики є важливим для українських фахівців, які безпосередньо залучені до розробки заходів щодо подолання негативних демографічних наслідків війни. Адже в Стратегії демографічного розвитку України на період до 2040 року [9] визначено головні демографічні виклики і загрози, серед яких і такі, що уже почали проявлятися у Північній Європі незважаючи на надзвичайно сприятливу соціально-економічну ситуацію. Важливо розуміти «ідеальні» (відносно інших країн Європи) тенденції демографічних процесів і структур в Північній Європі, аби визначити орієнтири для подолання демографічних викликів і вибудувати сценарії поствоєнного відновлення України з максимально реалістичними за сучасних геополітичних умов очікуваними результатами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи унікальність демографічних тенденцій Північної Європи, населення цих країн є об'єктом всебічного дослідження демографів, міграціологів, географів, соціологів тощо. Цьому сприяє добре сформована статистична база як на національному рівні, так і в рамках діяльності регіональних інтеграційних структур – Північної Ради та Європейського Союзу.

Комплексне дослідження демографічної ситуації у Північній Європі здійснено у праці «Демографічний виклик для Скандинавських країн» (Д. Раухут, Р. Расмуссен, Й. Рото, П. Франке, С. Остберг) [29]. Автори на основі ґрунтовних статистичних матеріалів розкрили особливості демографічних процесів у п'яти країнах – Норвегії, Швеції, Фінляндії, Данії та Ісландії. Вагомими для українського досвіду є декілька висновків. По-перше, головними чинниками поляризації за рівнем смертності і тривалості життя на внутрішньодержавному рівні є відмінності освітнього рівня населення і соціально-економічні умови. Акцентуючи на нових викликах, з якими стикнулися північноєвропейські країни, – демографічне старіння і перехід до звуженого відтворення населення – автори стверджують, що імміграція може запропонувати лише короткострокове рішення для вирішення цих проблем, тоді як у перспективі ці проблеми залишаться структурними і потребуватимуть довгострокових рішень.

По-друге, попри ефективну демографічну і соціальну політику, яка дозволяла тривалий час стримувати падіння народжуваності у Північній Європі, ця тенденція стала незворотною. Причини цього явища і нові тенденції в регіоні проаналізовано у працях С. Андерсен, Н. Дранге, Т. Лаппегорд [11], Я. Бергсвік, А. Фауске, Р. Гарт [14]. Г. Андерссон показав явище стрімкого зниження народжуваності у когортах жінок-іммігрантів [12].

Завдяки високій, у порівнянні з іншими країнами Європи, народжуваності і тривалості життя північноєвропейські країни позитивно виділяються показниками зростання людності. Більшість територій рівня NUTS-3 віднесено до двох груп – з високим зростанням та зростанням населення. Виняток становлять північні території Скандинавії і схід Фінляндії, а також окремі регіони Данії [16, с. 27].

Визначаючи першорядну роль демографічних процесів для економічного розвитку України в аналітичній доповіді центру Разумкова [8] розкрито значення демографічного чинника для повоєнного відновлення та економічного зростання. На основі емпіричних даних на прикладі ряду країн, у тім числі північноєвропейських, показано можливості використання демографічних дивідендів в умовах демографічного переходу та залучення іммігрантів. Однак у цій праці поза увагою залишаються проблеми суспільства, які є наслідком масової імміграції.

Притік мігрантів завжди призводить до етноструктурних трансформацій в державах-реципієнтах. Тривала історія інтеграції мігрантів у приймаючі суспільства країн Північної Європи дозволила оцінити найбільш актуальні проблеми, які проявляються у різних сферах. Е. Ейнгорн, С. Гарбісон, М. Гусс у праці “Міграція та мультикультуралізм у Скандинавії” роблять висновок, що скандинавські держави загального добробуту стають неоднорідними [19]. На основі норвезького і данського досвіду та у порівнянні з американською моделлю мультикультуралізму автори показують приклади антиімміграційної риторики та расової політики у регіоні, що варто враховувати при розробці міграційної політики в Україні.

Методика дослідження. Просторовий аналіз демографічного розвитку охопив п'ять країн – Данію, Швецію, Норвегію, Фінляндію та Ісландію, які означуємо як регіон Північна Європа. Територіальна структура досліджуваного регіону обумовлена його культурною та природною гомогенністю, зокрема наявністю чітких природних меж, які визначають певну ізольованість, автономність окресленого терену.

Загалом серед українських вчених усталене розуміння простору Північної Європи як п'яти вищеназваних держав. Зокрема, обґрунтовуючи регіоналізацію Європи, такого підходу дотримуються С. Кузик, Л. Котик, І. Ванда [6]. І. Зінько наголошує, що цей субрегіон, складений переважно моноетнічними державами, можна позначати топонімами Скандинавія, або Скандинавські країни [5], однак у своїй праці віддає перевагу назві Північна Європа.

Варто зазначити, що на сучасному етапі в

закордонних наукових публікаціях та аналітичних звітах міжнародних інституцій немає єдиного підходу до визначення меж Північної Європи. Частина науковців окреслює межі Північної Європи у широкому географічному охопленні. Наприклад, Г. де Блій, П. Муллер, О. Шаблій ототожнюють Північну Європу, Скандинавську Європу та Норден і включають до регіону, окрім п'яти держав, ще Естонію [4]. Цей простір завдяки природно-географічній ізоляції є периферією європейського серцевинного ареалу, а також вирізняється релігійною однорідністю, зокрема домінуванням лютеранської церкви, і внутрішньою етно-культурною єдністю, оскільки норвезька, шведська, данська та ісландська мови належать до північно-германської підгрупи германської групи індоєвропейської мовної сім'ї. Фінська та естонська мови належать до уральської мовної сім'ї. Фінляндія просторово та історично є близькою до Скандинавії, має давні політичні, господарські та культурні зв'язки у межах регіону, а особливо тісний історичний шлях розвитку з Швецією. Європейські науковці називають регіоном Норден всі вищезазначені країни окрім Естонії, а до Скандинавії відносять лише три – Норвегію, Швецію і Данію.

Структурні підрозділи ООН у своїх звітах та аналітичних матеріалах включають до Північної Європи, окрім п'яти названих держав, ще й Ірландію, Велику Британію, Литву, Латвію і Нормандські острови. Міжнародна субрегіональна організація Північна Рада (Nordic Council) об'єднує п'ять країн-членів – Данію, Швецію, Норвегію, Фінляндію та Ісландію, та асоційовані члени – Аландські острови, Гренландію і Фарерські острови, а також країни-спостерігачі – Естонію, Латвію, Литву. Згідно EuroVoc Північною Європою є регіон, який включає Швецію, Норвегію, Фінляндію, Ісландію, Данію і Фарерські острови, а також країни Східної Балтії – Естонія, Латвія, Литва.

Для просторового аналізу демографічного розвитку країн Північної Європи було використано офіційні статистичні дані міжнародних організацій – Відділу населення ООН [27], Статистичної комісії ООН [17], Євростату [26], Північної Ради [24, 25], Довідкового бюро з населення [28], а також матеріали з сайтів національних статистичних служб. Проведене дослідження охопило період з початку ХХ століття. Динаміку чисельності населення проаналізовано з 1900 року, а окремі показники відтворення населення, вікового складу та міграції з 1950 року.

Статистична оцінка демографічного розвитку країн Північної Європи базується на обчислених коефіцієнтах. Темп зростання населення відображає відсоткове значення чисельності у

кінці досліджуваного періоду при тому, що у базовому році умовно людність становить 100%. Аналогічно обчислено темпи зміни рівня народжуваності у країнах. Динаміка головних демографічних коефіцієнтів відображена графічно, що дозволило порівняти демографічний розвиток окремих країн з середніми показниками у регіоні Північної Європи та у Європі. Вікову динаміку та процеси демографічного старіння проаналізовано на підставі частки головних демографічних категорій населення – дітей, населення у віці 25–64 роки, 65 і старших. Показано динаміку з 1950 року коефіцієнту потенційної підтримки, який відображає кількість осіб у віці 25–64 роки у розрахунку на 1 особу у віці 65 років і старше.

Динаміка імміграції (з 1990 року) та етноструктурні зміни (з 1987 року) у країнах Північної Європи досліджено на матеріалах національних статистичних служб, Міжнародної організації міграції [23] та Верховного комісара ООН у справах біженців [31]. Для оцінки ступеня відкритості держав до імміграції застосовано два показники – індекс контролю міграційної політики та індекс контролю політики трудової міграції [23]. Їхні значення коливаються від 0 (найменш обмежувальна політика) до 1 (найбільш обмежувана).

Параметри демографічного розвитку Північної Європи, за якими проведено просторовий аналіз, корелюються з індикативними показниками моніторингу реалізації Стратегії демографічного розвитку України [9], що дозволить повноцінно використати досвід досліджуваних країн.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для розробки стратегії повоєнного відновлення України вкрай важливо враховувати роль демографічного чинника. Зокрема цінним досвідом є оцінка впливу демографічної політики країн Північної Європи на демографічні процеси та вікову трансформацію населення. Розуміння цих тенденцій дозволить визначити сценарії майбутнього розвитку України та виробити максимально ефективні заходи державних демографічної, міграційної, економічної і соціальної політики, адекватно підійти до визначення концептуальних основ регіональної політики.

Тому **метою дослідження** є виявлення тенденцій демографічного розвитку і демографічної ситуації країн Північної Європи як моделі, що можна вважати орієнтиром для українських фахівців, які будуть впроваджувати політику подолання демографічних викликів в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Північна Європа є найменш населеним регіоном Європи, що помітно вирізняється тенденціями

демографічного розвитку і сучасною демографічною ситуацією. На початок 2024 році у Північній Європі проживало 28162 тис. осіб, що становило 3,8% усього населення Європи (табл. 1). Упродовж XX–XXI століть населення Північної Європи стабільно зростало (рис. 1). За період 1900–2023 років кількість населення зросла у 2,2 рази, а частка регіону в загальній чисельності населення Європи збільшилася на 0,5%. З 1980

року, на тлі стагнації і депопуляції у багатьох європейських країнах, населення Північної Європи зросло майже на 4,8 млн осіб, або на 21%, тоді як у Європі у середньому приріст склав лише 4%. Ісландія відзначається найбільшим приростом – на 34%, у Норвегії приріст становив 32%. У Швеції населення зросло на 24%, а найменший приріст властивий Фінляндії (14%) і Данії (13%).

Таблиця 1 / Table 1

Динаміка головних показників відтворення населення країн Північної Європи /
Dynamics of the main indicators of population reproduction in the Nordic countries

Країни	Кількість населення на 1 січня 2024 року, осіб	Темп зростання населення у 2023 році, 2000 рік=100%	Частка іммігрантів у загальному прирості населення у 1990–2023 роках, %	Сумарний коефіцієнт народжуваності у 2023 році, осіб	Темп скорочення народжуваності у 2023 році, 1950 рік=100%
Швеція	10 551 707	118,8	71	1,5	-33
Данія	6 072 412	111,4	65	1,6	-37
Фінляндія	5 603 851	107,9	57	1,3	-57
Норвегія	5 550 203	122,9	55	1,4	-46
Ісландія	383 726	134,9	33	1,6	-59

Розраховано за [24, 28].

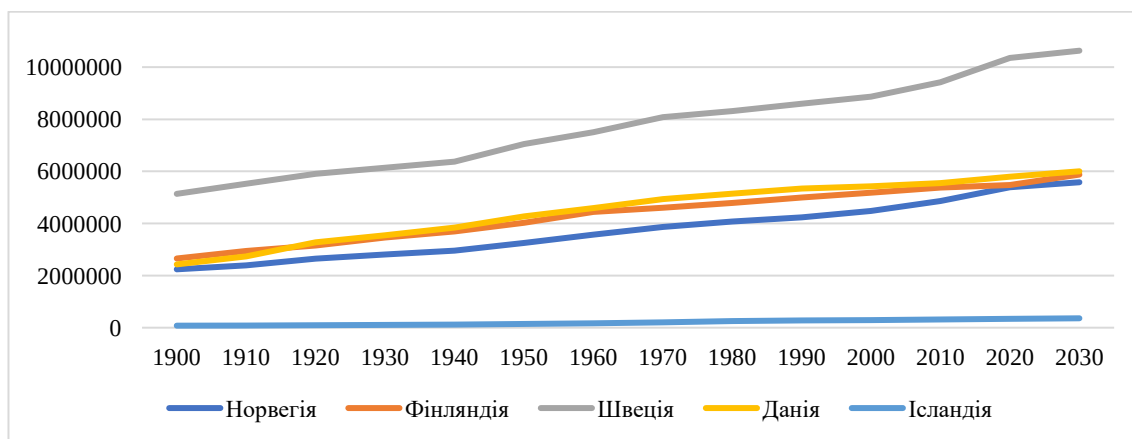


Рис. 1. Динаміка кількості населення країн Північної Європи, осіб [24] /
Fig. 1. Population dynamics in the Nordic countries, people [24]

Пік максимального загального приросту усі країни Північної Європи уже пройшли. Дуже швидко за рахунок імміграції вдалося зупинити зниження приросту у кінці XX – на початку XXI століття. Попри те, що у Європі у 2021 році уперше зафіксовано скорочення людності і депопуляція триватиме, за прогнозами ООН [27] очікується, що усі північноєвропейські країни зберігатимуть приріст чисельності населення до 2030 року, а найшвидше зростатиме людність Фінляндії та Ісландії (рис. 2).

Зростання людності країн Північної Європи у XX столітті обумовлено декількома чинниками: дуже малі демографічні втрати упродовж світових воєн порівняно з іншими країнами Європи; розширене природне відтворення як ре-

зультат сформованої моделі середньодітної репродуктивної поведінки, а також успішної демографічної і соціальної політики держав; додатне сальдо міграції, притік людей молодого віку з тих країн Азії та Африки, де традиційною є орієнтація на багатодітні сім'ї.

Політичний і воєнний нейтралітет більшості країн Північної Європи сприяв тому, що регіон майже не зазнав людських втрат у Першій і Другій світових війнах. Зокрема, цивільні втрати Норвегії, Швеції і Фінляндії разом у Першій світовій війні склали приблизно 2,7 тис. осіб. У Фінляндії у внутрішньому збройному конфлікті 1918 року загинуло за різними оцінками 31–37 тис. осіб. Серед країн Північної Європи Фінляндія також мала найбільші втрати військових і ци-

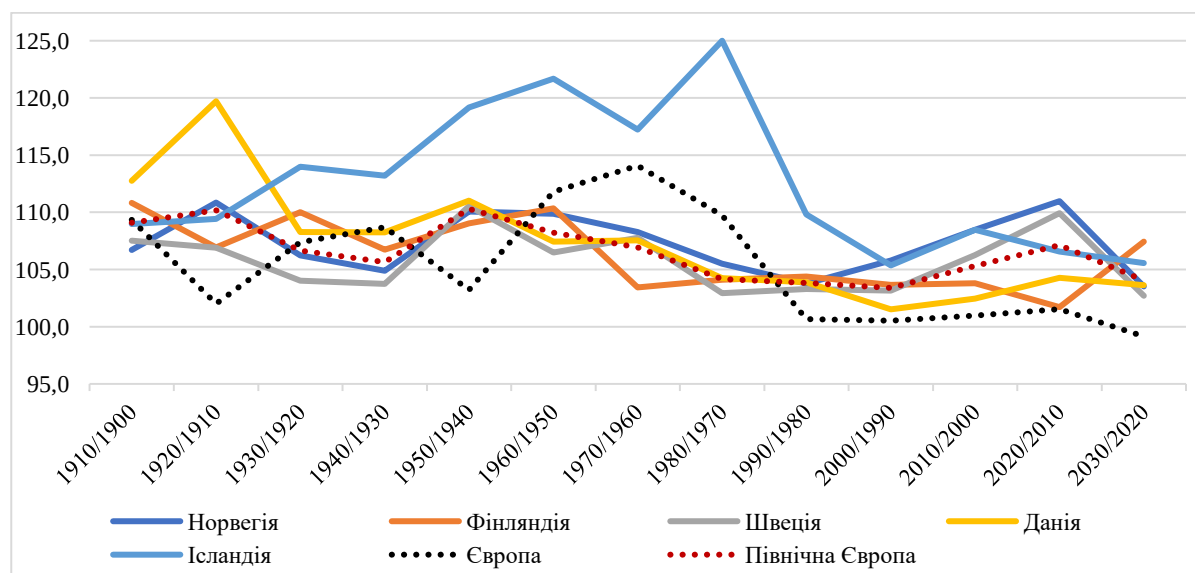


Рис. 2. Темпи зростання населення країн Північної Європи, % /

Fig. 2. Population growth rates in the Nordic countries, %

вільних у Другій світовій війні – понад 84 тис. осіб, що склало 2,27% від чисельності населення у 1939 році. У Норвегії сукупні демографічні втрати становили 0,35% від довоєнного населення, у Данії – 0,18%, в Ісландії – 0,17% [7]. А Швеція практично не мала демографічних втрат у війнах, тому її демографічну історію у XX–XXI століттях, як і загалом північноєвропейських країн, можна вважати еталоном, моделлю для порівняння. В Україні, до прикладу, в Другій світовій війні загинуло приблизно 20% від довоєнної чисельності населення. Це на 35,3% визначило загальні гіпотетичні втрати населення у XX столітті. Ще 18,3% демографічних втрат України зумовлено Голодомором 1932–1933 років [1, с. 191].

На початку XX століття темпи зростання населення у країнах Північної Європи збігалися з середньоєвропейським рівнем. Перша і Друга світові війни зумовили стрімке зниження темпу росту в Європі загалом, тоді як країни Північної Європи демонстрували протилежні тенденції. Феноменальним виявився той факт, що саме під час світових воєн темпи зростання людності Північної Європи були максимальними з початку XX століття – 110,2% за 1910–1920 роки та 110,3% за 1940–1950 роки. У міжвоєнні періоди тренди зміни населення також є протилежними – у країнах Європи, які пережили війни, завдяки компенсаційному збільшенню народжуваності темпи зростання збільшуються, а в країнах Північної Європи тривало повільне скорочення показника. Лише у 1970-х роках тенденції зміни людності у Північній Європі стали синхронними до середньоєвропейських. Проте темпи приросту ще залишалися дещо нижчими через менші обсяги міграційного приросту, тоді як у загальному

приростові домінував природний приріст. Водночас Європа дуже стрімко перетворювалася на імміграційний регіон. У 1980-х роках темпи зростання населення Північної Європи зрівнялися з середньоєвропейськими завдяки збільшенню притоку мігрантів. А в 1993 році у регіоні вперше міграційний приріст кількісно переважив природний приріст.

Від 2010 року швидкість зростання людності країн Північної Європи поступово уповільнюється. Це глобальна тенденція, що зумовлена передусім скороченням народжуваності. Однак, країни Північної Європи демонструють вищі темпи зростання людності за 2010–2020 роки (107,1%), порівняно з середньоєвропейським показником (101,5%) завдяки двом чинникам – потужній імміграційній складовій і природному приросту. Усі країни регіону віднесено до типу держав з високим загальним приростом населення за період 2000–2017 років [16]. До цієї групи, окрім північноєвропейських, належали ще чотирнадцять країн Європи, однак їхнє зростання в основному відбувалось завдяки імміграції.

Упродовж XIX – на початку XX століття Північна Європа, як і решта європейських регіонів, відзначалася міграційними втратами. Складні агрокліматичні умови для розвитку сільського господарства були головним чинником еміграції сільських жителів переважно до Північної Америки. У першій половині XX століття стрімкий розвиток видобувних та переробних галузей промисловості стимулював внутрішню міграцію до міських регіонів, а також став передумовою для зростання інтенсивності імміграції з-за кордону. Нейтральний статус скандинавських країн у Другій світовій війні посилив міграційну привабливість регіону: сюди прибували вихідці з

Німеччини, Великої Британії, Данії та інших країн Європи, охоплених війною.

Статус імміграційного регіону посилювався завдяки формуванню унікальної скандинавської моделі, яку визначають як колективістсько-універсалістську форму соціально-економічного розвитку на основі приватної власності і ринку, стійкому економічному зростанню, високій заробітній платі та наявності достатньої кількості робочих місць на ринку праці, високим соціальним стандартам та високою якістю життя, політичною стабільністю в державах та правовою захищеністю усіх громадян.

Формування у Північній Європі держав суспільного добробуту демонструють не лише макроекономічні індикатори, зокрема найвищі у світі значення індексу людського розвитку, але й суб'єктивні оцінки громадян щодо свого благополуччя, наприклад індекс щастя, що є вагомим чинником демографічної поведінки. З початку розрахунку індексу щастя у 2006 році країни регіону стабільно посідають найвищі позиції у світовому рейтингу [33].

Соціально-економічна та безпекова приваб-

ливість країн Північної Європи сприяла стабільному зростанню чисельності іммігрантів (табл. 2). У 1990 році найвищою серед країн регіону частка міжнародних мігрантів була у Швеції – 9,2%, а найменша – у Фінляндії, всього 1,3%. Непривабливість Фінляндії для мігрантів була зумовлена її вкрай вразливим географічним розташуванням у суспільстві з агресивною Російською імперією, а згодом СРСР і Росією. Це визначило втягнення країни у три війни упродовж XX століття, втрату частини державної території і майже 20% промислового потенціалу [10], зобов'язання виплати репарацій Радянському Союзу, відсутність доступу до фінансування для відбудови економіки після Другої світової війни у рамках плану Маршалла, примус до позаблоковості та значні обмеження державної самостійності, необхідність фінансування великої кількості внутрішніх переселенців з анексованих регіонів. З 1970-х років державні політики розвитку інноваційної економіки, освітньої сфери, посилення соціальної підтримки населення сприяли економічному зростанню та міграційній приваб-

Таблиця 2 / Table 2

Міграція та етноструктурна трансформація в країнах Північної Європи
Migration and ethno-structural transformation in the Nordic countries

Країни	Частка державо-формуючого етносу, %		Країни походження найбільших міграційних груп, 2022 р.	Частка мігрантів у загальній чисельності населення, %		Відносне сальдо міграції у 2021 р., ‰	Індекс контролю міграційної політики, 2016 р.	Індекс контролю політики трудової міграції, 2016 р.
	1987 р.	2024 р.		1990 р.	2020 р.			
Фінляндія	93,3	90,0	Естонія, Ірак, Росія, Сомалі, Китай	1,3	7,0	2,7	0,7	0,4
Швеція	93,0	79,6	Сирія, Ірак, Фінляндія, Польща, Іран	9,2	19,8	7,7	0,8	0,3
Норвегія	97,0	81,5	Польща, Литва, Швеція, Сирія, Сомалі	4,5	15,7	2,0	0,7	0,3
Данія	96,8	84,2	Польща, Сирія, Румунія, Туреччина, Німеччина	4,6	12,4	3,9	0,8	0,5
Ісландія	98,3	78,7	Польща, Україна, Афганістан	3,8	19,2	1,7	0,7	0,3

Складено за [23, 24]

Від 1990 до 2023 року зростання населення Північної Європи на 67% відбувалось за рахунок міграційного приросту. У 1990–2004 роках додатне міграційне сальдо становило у середньому 50 тис. осіб на рік [20]. У подальшому, за винят-

ком періоду пандемії COVID-19, фіксували посилення міграційної складової у загальному прирості. Особливо у пікові роки: період міграційної кризи у Європі у 2016 році, коли додатне сальдо у Північній Європі зросло до 197 тис. осіб, а

також у 2022 році унаслідок початку повномасштабної війни в Україні, що сприяло досягненню рекордного за історію регіону сальдо – 212 тис. осіб. Статистично визначено, що без великого міграційного притоку у 2022 році вже у цьому році у Північній Європі розпочалась би депопуляція [20].

У 2020 році за даними Nordic Co-operation у Північній Європі проживало 4025,1 тис. осіб міжнародних мігрантів, що становило понад 14% від усього населення регіону [25]. У Європі у середньому частка мігрантів є дещо меншою і становить 11,6% [23]. У результаті у Фінляндії за період 1990–2023 роки частка мігрантів зросла найбільше серед країн регіону – у 5,4 рази. В Ісландії зростання становило 5,1 рази. У Норвегії питома вага мігрантів у чисельності населення збільшилася в 3,5 рази. А в Данії та Швеції – у 2,7 та 2,2 рази відповідно.

Держави Північної Європи упродовж останніх десятиліть реалізовували ліберальну міграційну політику та приймали біженців з конфліктних регіонів. Особливо відкритими ці держави стали для трудових мігрантів, про що свідчить низький індекс контролю трудової міграції (див. табл. 2). Швеція була однією з перших держав Європи, яка у 1950-х роках на законодавчому рівні урегулювала трудову міграцію, заохочуючи притік висококваліфікованої робочої сили та обмежуючи в'їзд малоосвічених працівників. У 1960-х роках подібні правові норми ухвалено у Норвегії та Данії, згодом у Фінляндії та Ісландії. Однак, тільки в Данії міграційна політика набула вираженого асиміляційного типу [32].

Імміграція зумовила помітну етноструктурну трансформацію. Оскільки Північна Європа є привабливою для трудових мігрантів і для біженців з охоплених збройними конфліктами країн, або тих, де панують авторитарні чи тоталітарні режими, то частка некорінного населення зростала в усіх країнах, тому вони фактично втратили статус мононаціональних держав [21]. Помітною тенденцією є послаблення етнолінгвістичного домінування корінних народів (див. табл. 2). Якщо до початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну найбільшими етноменшинами були поляки, сирійці, іракці, шведи, естонці і литовці [3], то з 2022 року суттєво зросла частка українців. Станом на початок 2024 року в Норвегії проживало 68,1 тис. біженців з України, в Фінляндії – 65,5 тис., Швеції – 42,0 тис., Данії – 39,7 тис., а в Ісландії 3,9 тис. осіб [31].

Попри те, що етнічний і культурний плюралізм у країнах Північної Європи має давню історію, а також утверджене загальне усвідомлення того, що мігранти долучилися до побудови держав суспільного достатку, тут усе частіше наго-

лошують на проблемах сегрегації мігрантів, їхньої радикалізації, особливо молоді. Мігранти залишаються слабо інтегрованими на ринку праці. Зростають соціальні виплати для біженців і соціально вразливих груп мігрантів, а це фінансовим тягарем лягає на платників податків.

Згідно з дослідженням, проведеним у 2018 році, 63% людей африканського походження у Фінляндії зазнавали домагань на расовому ґрунті. У 12 країнах ЄС, де відбувалося опитування, цей показник був 30%. У Данії та Швеції цей показник становив 41%. Дослідження показало, що у Фінляндії погляди на імміграцію стали менш толерантними за останні п'ять років. Загалом акцентують на окремих проявах дискримінації мігрантів навіть попри те, що в країнах Північної Європи на законодавчому рівні визначено механізми протидії расовій та етнічній дискримінації [34].

Індикатором зростання напруги у суспільствах є посилення на внутрішньополітичній арені правих політичних сил. Плюралістичні суспільства в умовах відходу від моделі національної держави все частіше звертаються до праворадикальних поглядів. Без явних проявів етнічної інтолерантності посилюється національна ідентичність корінного населення.

Внутрішня міграція з сільської місцевості та зовнішня переважно спрямовані у столичні агломерації, які зростають досить високими темпами. Усі столиці Північної Європи належать до категорії міст-мільйонників, за винятком Рейк'явіку, найбільша – Стокгольм з населенням 2,2 млн осіб. Інші столиці майже однакові за розміром: Гельсінкі – 1,1 млн осіб, Осло – 1,2 млн, Копенгаген – 1,3 млн. Найвищі темпи зростання властиві Рейк'явіку, населення якого зросло майже на третину з 1990 року і на сучасному етапі становить понад 215 тис. осіб.

У країнах Північної Європи на субнаціональному рівні у контексті центр-периферійних відмінностей посилюються демопросторові диспропорції [18]. Міські центри демонструють зростання чисельності населення, в той час як у сільських районах здебільшого населення зменшується [16]. Хоча тут таких сільських територій, де відбувається депопуляція, є суттєво менше, ніж в інших регіонах Європи. Особливо стрімка депопуляція відбувається на сході та півночі Фінляндії у прикордонних з Росією територіях. У південно-західній Фінляндії демографічна ситуація відзначається позитивними параметрами та стійким зростанням людності. У Швеції і Норвегії рівень урбанізації також є чинником демографічної ситуації, але тут ще й помітні відмінності між природно-географічними регіонами з різною комфортністю для проживан-

ня – північними і південними.

Країни Північної Європи упродовж багатьох десятиліть виділялися досить високим рівнем народжуваності, порівняно з іншими європейськими країнами. У середині XX століття лише в Данії і Швеції сумарний коефіцієнт народжуваності був нижчим від середньоевропейського значення. Однак, тоді в усіх країнах регіону ще забезпечувалось розширене відтворення населення. Упродовж 1970–1980 років унаслідок зниження народжуваності Північна Європа перейшла межу простого заміщення поколінь. Завдяки ефективній демографічній політиці вдалося з 1980-х суттєво уповільнити тенденцію падіння народжуваності (рис. 3). Однак, стабільне

зниження рівня народжуваності у другій половині XX століття у результаті спричинило незворотній перехід до звуженого відтворення в усіх країнах Північної Європи. Притік мігрантів не вплинув позитивно на рівень народжуваності, бо їхня репродуктивна поведінка дуже швидко знає змін і наближається до норми приймаючого суспільства – малодітної сім'ї [12]. Сумарний коефіцієнт народжуваності у 2023 році знизився до мінімального рівня за всю демографічну історію регіону і становив від 1,6 осіб у Данії та Ісландії до 1,3 осіб у Фінляндії (табл. 2). Це такі значення, які суттєво нижчі від порогового рівня простого заміщення поколінь – 2,1 осіб на одну жінку репродуктивного віку.

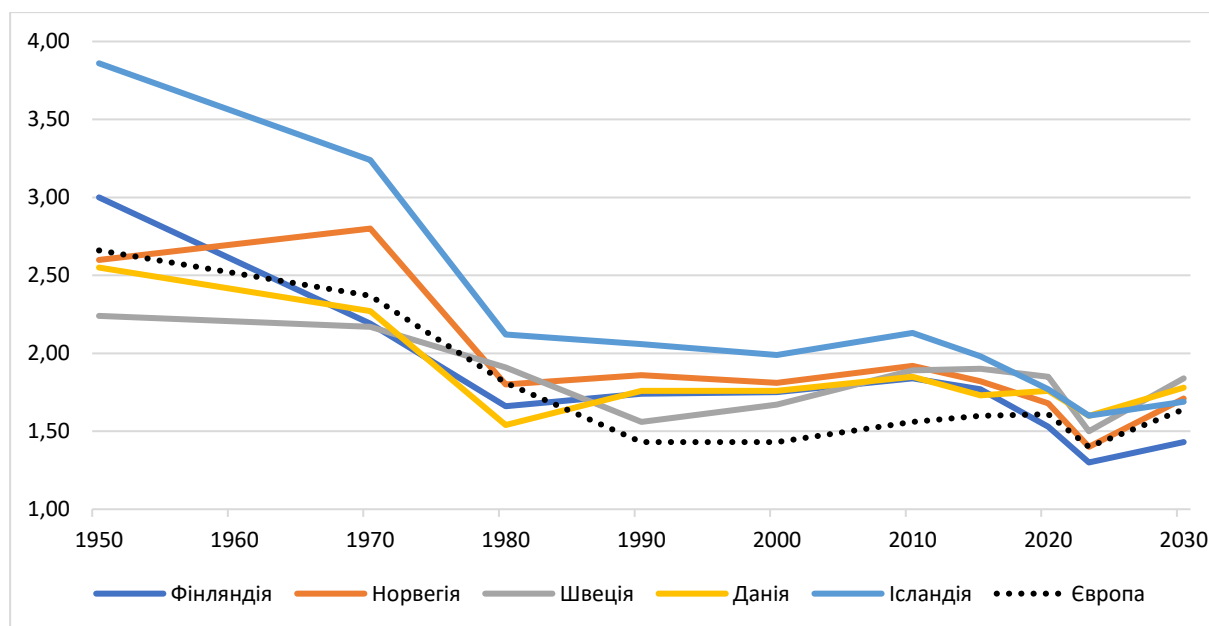


Рис. 3. Сумарний коефіцієнт народжуваності, осіб [24] / Fig. 3. Total fertility rate, persons [24]

Попри тривале зниження передчасної смертності і збільшення тривалості життя, країни Північної Європи вперше стикнулися з проблемами природного відтворення населення. Пік природного приросту минули усі держави, у деяких внаслідок зниження народжуваності розпочалось природне скорочення. У Швеції природне скорочення фіксувалось у 1997–2001 роках, і лише завдяки імміграції ці тенденції вдалося призупинити. У Фінляндії вперше смертність перевищила народжуваність у 2016 році, а в Данії природне скорочення розпочалося у 2022 році.

Дослідження С. Канталіні, С. Ольссон-Вейк і Г. Андерссон на матеріалах шведської статистики дозволило авторам зробити висновок, що внаслідок динамічної глобалізації зростає невизначеність людей щодо майбутнього. Індивідуальне сприйняття невизначеності в житті, щодо зміни структури ринку праці, нових інформаційних технологій, нових способів формування особистих стосунків і пов'язаної з цим політичної та

культурної поляризації може негативно впливати на рішення щодо народжуваності [15]. Економічні фактори, зокрема економічна невизначеність молоді, є домінуючою у зниженні народжуваності [29]. Оскільки це виявляється у відкладенні народжень, то передусім рекомендують запровадити державну політику подолання економічної невизначеності щодо майбутнього батьківства, посилення гендерної рівності у сфері догляду за дітьми, можливості для жінок поєднувати материнство і працю без загрози особистим доходам і сімейному добробуту. Подолання гендерної нерівності визначають як один із вагомих факторів зростання народжуваності у майбутньому [16]. Усі ці заходи загальнонаціонального рівня розраховані на перспективу життя цілого покоління, а це щонайменше 20 років. Короткострокові заходи демографічної політики, зокрема фінансові виплати, як свідчить досвід країн Північної Європи, не в змозі у довготривалій перспективі розв'язати проблему низької народжуваності [29].

Тенденції народжуваності і смертності спричинили помітні зміни у віковому складі населення Північної Європи. З 1970 року зростала частка людей в найбільш активному працездатному віці (25–64 роки) (рис. 4). Виважена економічна політика разом з демографічними дивідентами позитивно вплинули на економічну динаміку в регіоні. Зворотна тенденція, поступове зменшення робочої сили, намітилася у країнах регіону з 2010–2020 років. Зниження народжуваності, а отже й відповідна динаміка дитячого населення, безпосередньо негативно позначається на потенційній можливості відтворення робочої сили. Це, як зазначають Д. Раут, Р. Расмуссен, Й. Рото, П. Фран-

ке і С. Естберг [29] це вплине на системи соціального забезпечення у загальнонаціональних масштабах. Розв'язання проблеми, на думку авторів, можливе виключно у площині державної демографічної політики, яка включатиме заходи для стимулювання народжуваності. Однак, як свідчить український досвід запровадження демографічної політики на початку XXI століття, стимулювання народжуваності великими, диференційованими за порядком народження дітей, фінансовими виплатами суттєво не вплинули на зростання народжуваності. Відбувалося зростання народжуваності у тих сім'ях, які розглядали ці виплати як єдине джерело доходу родини [2].

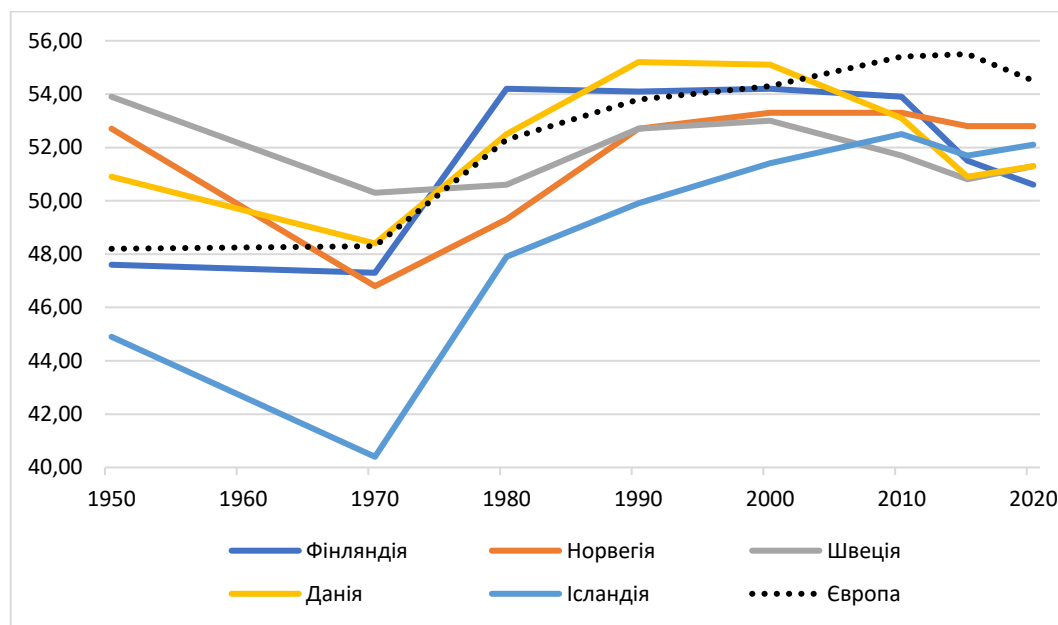


Рис. 4. Частка населення у віці 25–64 роки, % [24] / Fig. 4. Share of the population aged 25–64, % [24]

Країни Північної Європи одними із перших у світі стикнулися з проблемою демографічного старіння, яке зумовлене зниженням народжуваності й зростанням тривалості життя. Зростання частки людей літнього віку (рис. 5) разом зі зниженням частки дітей визначає стійку структурно-вікову динаміку в країнах регіону, яка матиме незворотні довготривалі наслідки не лише для демографічної, але навіть більшою мірою для економічної системи держав. Передусім це проявляється у зниженні коефіцієнта потенційної підтримки (рис. 6). Упродовж 1950–2020 років найбільше скорочення (у 3,3 рази) відбулось у Фінляндії, а найповільніше скорочення коефіцієнта зафіксовано у Норвегії та Ісландії (в 1,8 рази). Станом на 2020 рік в Ісландії на одну особу у віці 65 років і старше припадає 3,3 особи у віці 25–64 років. Це найбільш сприятлива ситуація в регіоні. У Фінляндії коефіцієнт потенційної підтримки був 2,2, що нижче від середньоевропейського рівня (2,9). Отже, вікова структура населення Північної Європи уже чинить негативний

вплив на потенціал економічного зростання і у майбутньому разом з деструктивними демографічними чинниками цей вплив ставатиме більш відчутний.

Зростання частки літніх людей у суспільстві зводить можливість наповнення бюджетів усіх рівнів, проявляється у все більшому навантаженні на систему соціального забезпечення, посилює соціальну напругу. Як свідчить досвід Північної Європи, короткотермінова внутрішня політика, спрямована на забезпечення достойного соціального захисту усіх категорій населення в умовах старіючого суспільства, не дає бажаного ефекту. Держави все частіше змушені вдаватися до непопулярних кроків, таких як підняття пенсійного віку, обмеження соціальної допомоги певним категоріям населення.

Висновки. Досвід країн Північної Європи є цінним для розуміння сценаріїв демографічного розвитку України, розробки демографічної і міграційної політики, стратегії поствоєнної адаптації економіки, соціальної системи і політичної

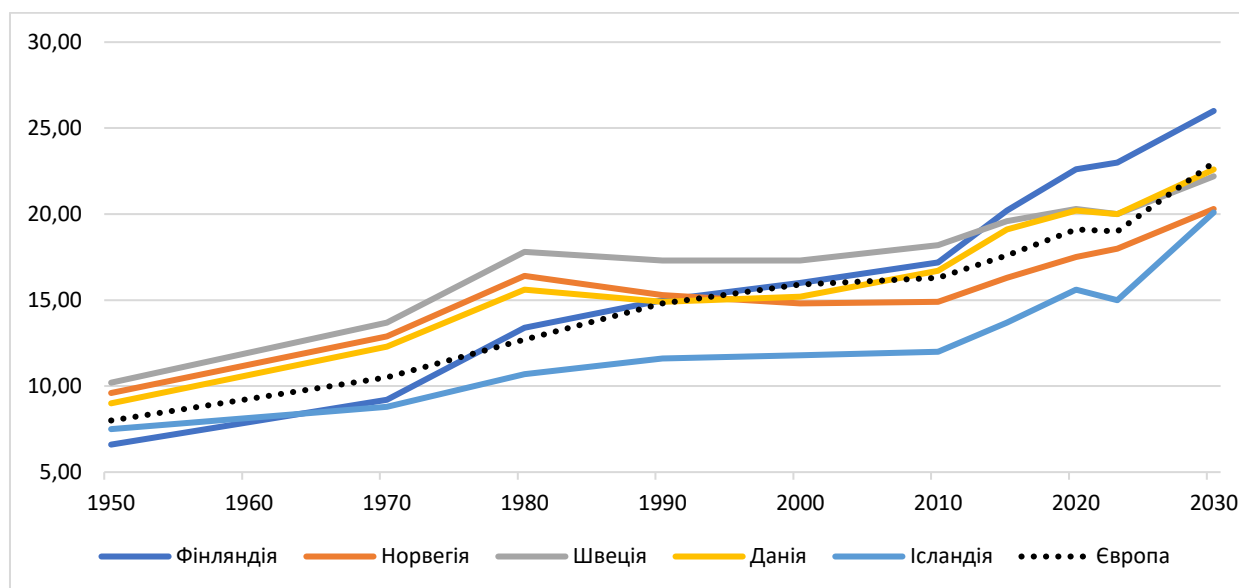


Рис. 5. Частка населення старше 65 років, % [27] / Fig. 5. Share of the population over 65 years old, % [27]

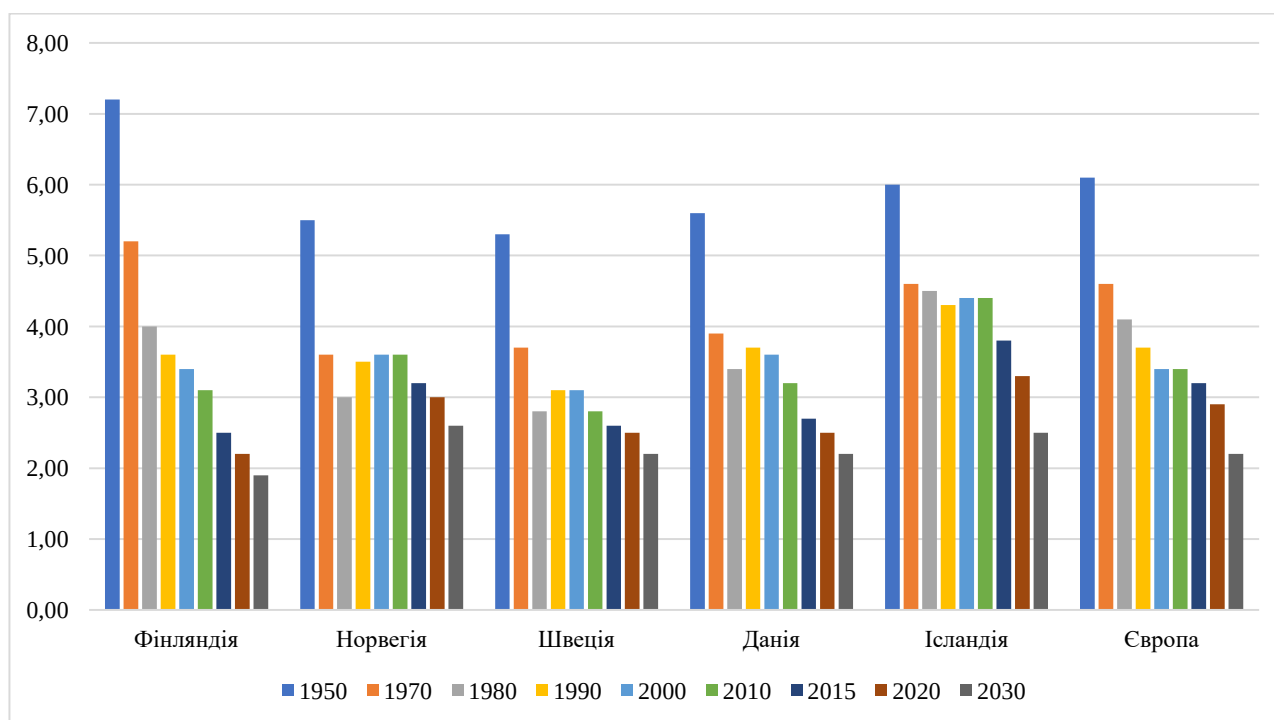


Рис. 6. Коефіцієнт потенційної підтримки, осіб у віці 25–64 роки / 1 особу у віці 65 років і старше [27] / Fig. 6. Potential support ratio, persons aged 25–64 / 1 person aged 65 and older [27]

сфери до нових демографічних реалій. Ключові тенденції у Північній Європі, які варто брати до уваги, це:

1. Вразливість геополітичного позиціонування України у сусідстві з Росією. Досвід Фінляндії засвідчує негативні повоєнні демографічні тенденції в східному прикордонні, що проявляються упродовж життя декількох генерацій.

2. Стійке падіння народжуваності. Глобальну тенденцію зниження народжуваності зупинити вкрай важко навіть надзвичайно ефективними заходами соціальної і демографічної політики, яку реалізовували країни Північної Європи з

1980-х років. Успіхи таких державних політик мають короткотривалий ефект.

3. Зростання рівня демографічного старіння. Це поставило країни Північної Європи перед необхідністю запровадження нових і нестандартних заходів у різних сферах суспільства, реалізація яких у майбутньому може стати еталонним прикладом для усіх країн світу, у тім числі для України.

4. Ліберальна імміграційна політика та значний притік мігрантів у довготривалій перспективі не вирішують проблеми депопуляції, оскільки мігранти надзвичайно швидко перей-

мають модель малодітної репродуктивної поведінки, яка усталена у приймаючому суспільстві.

5. Імміграція також не вирішила проблеми ринку праці країн Північної Європи, адже економічне зростання можливе винятково за рахунок розвитку інноваційних високотехнологічних галузей. Країни регіону отримали зворотній ефект – посилення тиску на соціальні фонди і зростання витрат на освіту для мігрантів. Мультикультуралізм в усіх його реальних формах і проявах стає загальноприйнятним, якщо він економічно обґрунтований і соціально справедливий.

6. Потужний притік мігрантів з країн Азії та Африки сприяв етнічній і релігійній диверсифікації суспільства. Навіть попри домінуюче толе-

рантне сприйняття мігрантів, у країнах Північної Європи з'являється напруга у суспільстві. Стратегії інтеграції мігрантів виявилися неспроможними досягнути визначених цілей.

Отже, в Україні важливо уникнути занадто високих очікувань щодо покращення демографічної ситуації після війни. Найбільш доцільною є міграційна політика з орієнтацією на повернення українських емігрантів та їхніх нащадків.

Перспективним напрямком для подальших досліджень є вплив оновленої міграційної і демографічної політики держав Північної Європи на демографічний розвиток, виявлення нових трендів демографічних процесів, соціально-економічна адаптація суспільств до демографічних та етнополітичних викликів.

Список використаної літератури

1. Гладун О.М. Нариси з демографічної історії України XX століття. НАН України, Ін-т демограф. та соціальн. дослідж. ім. М.В. Птухи. 2018. 224 с.
2. Гудзеляк І.І. Вплив демографічної політики на процеси народжуваності в Україні. Вісник Львівського університету. Серія географічна. 2011. Вип. 39. С. 122–130.
3. Гудзеляк І. Вплив міграції на етнічний склад населення Європи // Суспільна географія і картографія: наукова спадщина та сучасні українознавчі студії: матеріали Всеукраїнського наукового онлайн-семінару з участю закордонних учених, присвяченого 120-літтю від народження професора Володимира Кубійовича (1900–1985) (Україна, м. Львів, 20 травня 2021 р.). Львів: Простір-М. 2021. С. 184–188.
4. Де Блій Г., Муллер П., Шаблій О. Географія: світи, регіони, концепти. Київ: Либідь. 2004. 740 с.
5. Зінько І. З. Зовнішня політика країн Північної Європи: навч. посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2015. 327 с.
6. Кузик С. П., Котик Л. І., Ванда І. В. Регіональна економічна і соціальна географія світу: навч. посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2019. 148 с.
7. Лавер О.Г. Війни та народонаселення країн світу у XX–XXI століттях (1900–2016 pp.). Статистичне дослідження: монографія / вид. 2-е, допов. Ужгород: РІК-У. 2018. 760 с.
8. Пищуліна О. Оцінка ролі демографічного фактору для економічного зростання та повоєнного відновлення. Аналітична доповідь. Центр Разумкова. 2023. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2023/05/22/2023-MATRA-I-KVARTAL-7.pdf> (дата звернення: 08.07.2024).
9. Стратегія демографічного розвитку України на період до 2040 року (проект). URL: <https://www.msp.gov.ua/projects/870/> (дата звернення: 26.06.2024).
10. Фінляндія. Дослідження практик відновлення країни після руйнації. Інститут аналітики та адвокації. 2022. URL: <https://iaa.org.ua/portfolio/finlyandiya/> (дата звернення: 12.07.2024).
11. Andersen S. N., Drange N., Lappegård T. Can a cash transfer to families change fertility behaviour? Demographic Research. 2018. 38. P. 897–928. DOI: <https://doi.org/10.4054/DemRes.2018.38.33>
12. Andersson G. Childbearing after Migration: Fertility Patterns of Foreign-Born Women in Sweden. International Migration Review. 2004. 38 (2). P. 747–775. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-7379.2004.tb00216.x>
13. Askeland G. A., Strauss H. The Nordic welfare model, civil society and social work. In H. Strauss, C. Noble, & B. Littlechild (Eds.), Global social work: Crossing borders, blurring boundaries (pp. 241–254). Sydney University Press. 2014. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctv1fxm2q.21>
14. Bergsvik J., Fauske A., Hart R. K. Can policies stall the fertility fall? A systematic review of the (quasi-) experimental literature. Population and Development Review. 2021. 47(4). P. 913–964. DOI: <https://doi.org/10.1111/padr.12431>
15. Cantalini S., Ohlsson-Wijk S., Andersson G. Cohabitation and Marriage Formation in Times of Fertility Decline: The Case of Sweden in the Twenty-First Century. European Journal of Population. 2024. 40, 15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10680-024-09703-9>
16. Deimantas V.J., Şanlıtürk A.E., Azzollini L. et al. Population Dynamics and Policies in Europe: Analysis of Population Resilience at the Subnational and National Levels. Population Research and Policy Review. 2024. Vol. 43. (27). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11113-024-09871-w>
17. Demographic and Social Statistics. United Nations Statistics Division. URL: <https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/index.cshtml> (дата звернення: 31.07.2024).
18. Demographic changes: Challenge or opportunity for Nordic societies? Nordregio Report 2016. URL: <https://archive.nordregio.se/Global/Publications/Publications%202016/State%20of%20the%20Nordic%20Region%202016/Theme%20demographic%20changes.pdf> (дата звернення: 01.07.2024).

19. Einhorn E., Harbison S., Huss M. *Migration and Multiculturalism in Scandinavia*. University of Wisconsin Press. 2022. 368 p.
20. Heleniak T. Are we witnessing a new demographic reality in the Nordics? Nordregio. 2023. URL: <https://nordregio.org/blog/are-we-witnessing-a-new-demographic-reality-in-the-nordics/> (дата звернення: 10.07.2024).
21. Horwood C. The changing politics of immigration in Nordic countries. Mixed Migration Centre. 2024. URL: <https://mixedmigration.org/the-changing-politics-of-immigration-in-nordic-countries/> (дата звернення: 16.06.2024).
22. May J. (2015). *Population Policies in Europe*. *L'Europe en Formation*. Vol. 377. P. 136–150. DOI: <https://doi.org/10.3917/eufor.377.0136>
23. Migration Data Portal. The International Organization for Migration. URL: <https://www.migrationdataportal.org/> (дата звернення: 28.07.2024).
24. Nordregio. URL: <https://nordregio.org/> (дата звернення: 01.08.2024).
25. Numbers and statistics. Nordic Co-operation. URL: <https://www.norden.org/en> (дата звернення: 01.08.2024).
26. Population and Social Conditions. Eurostat. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/statistical-themes#population-social-conditions> (дата звернення: 30.07.2024).
27. Population Division. URL: <https://www.un.org/development/desa/pd/> (дата звернення: 31.07.2024).
28. Population Reference Bureau. URL: <https://www.prb.org/> (дата звернення: 30.07.2024).
29. Rauhut D., Rasmussen R., Roto J., Francke P., Östberg S. *The Demographic Challenge to the Nordic Countries*. Nordregio. Stockholm, 2008. 154 p.
30. State of the Nordic Region 2024. Nordregio. URL: <https://nordregio.org/publications/state-of-the-nordic-region-2024/> (дата звернення: 18.07.2024).
31. United Nations High Commissioner for Refugees. URL: <https://www.unhcr.org/> (дата звернення: 31.07.2024).
32. van Houtum H., & Pijpers R. The European union as a gated community: The two-faced border and immigration regime of the EU. *Antipode*. 2007. 39(2). P. 291–309.
33. World Happiness Report 2024. URL: <https://worldhappiness.report/ed/2024/> (дата звернення: 02.08.2024).
34. Zeisset M. The Happiest Xenophobes on Earth: Examining Antiimmigrant Sentiments in the Nordic Countries. *Res Publica – Journal of Undergraduate Research*. 2016. Vol. 21. URL: <https://digitalcommons.iwu.edu/respublica/vol21/iss1/6> (дата звернення: 28.07.2024).

Demographic development of the countries of Northern Europe: current trends for the Ukrainian experience

Iryna Hudzelyak

PhD (Geography), Associate Professor,

Head of the Department of Economic and Social Geography named after Professor Oleg Shablii,
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

ABSTRACT

Problem statement. The current demographic parameters of Northern Europe are due to the absence of large human losses in the two world wars, and domestic political and socio-economic stability in the countries. As a result, a model of the demographic behavior of the population was formed, which for a long time ensured natural and migration growth. Therefore, the demographic parameters of the region can be considered a benchmark for developing measures to overcome demographic threats in the post-war period in Ukraine.

The purpose of the study is a spatial analysis of the demographic development of the countries of Northern Europe - Norway, Sweden, Finland, Denmark and Iceland.

Methods. The study was carried out on the basis of official data of the Nordic Council and Eurostat. Using the statistical method, the dynamics of the population, the main indicators of demographic processes and structures, migration and ethno-structural changes were assessed.

Results. Effective demographic policy in the countries of Northern Europe had a short-term effect. In all countries, the birth rate has significantly decreased, which no longer ensures the simple reproduction of generations. The transition to narrowed reproduction has become irreversible. Population growth rates have decreased significantly. Population growth in all countries is mainly provided by migration growth. Thanks to immigration and high birth rates compared to other European countries, the region has managed to fully use the demographic dividend that has ensured economic growth. However, the influx of migrants has not solved the problem of declining birth rates, as migrants quickly adopt the norms of low-childbearing reproductive behavior of host societies. The increase in the level of demographic aging and the decrease in the coefficient of potential support for the elderly have put the countries of the region in need of introducing new and non-standard measures in various spheres of society. The implementation of such a policy in the future may become a reference example for post-war Ukraine. Demospacial disparities are increasing in the region at the subnational level: many rural areas are depopulating, and urban regions, especially metropolitan agglomerations, are

growing. The worst demographic situation has developed in Finland in the border areas with Russia, where the rates of depopulation are the highest in the region. A powerful influx of migrants from Asia and Africa has contributed to the ethnic and religious diversification of society. In recent years, the share of Ukrainians has been growing. In Northern Europe, the ethnolinguistic dominance of indigenous peoples has noticeably weakened. Other internal problems associated with the weak integration of migrants into host societies have become more acute, and tension is emerging in society. The experience of the countries of Northern Europe is valuable for understanding the scenarios of demographic development of Ukraine, the development of demographic and migration policies, and the strategy of post-war adaptation of the economy, social system, and political sphere to new demographic realities.

Keywords: population, demographic development, growth rates, birth rate, demographic aging, migration, Northern Europe, Ukraine.

References

1. Hladun, O. M. (2018). *Essays on the Demographic History of Ukraine in the Twentieth Century*. Ptoukha Institute for Demography and Social Studies of the National Academy of Sciences of Ukraine. [in Ukrainian]
2. Hudzelyak, I. (2011). Influence of demographic policy on fertility processes in Ukraine. *Lviv University Bulletin. Geographical series*, 39, 122–130. [in Ukrainian]
3. Hudzelyak, I. (2021). The impact of migration on the ethnic composition of the population of Europe. In: *Public Geography and Cartography: Scientific Heritage and Modern Ukrainian Studies: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Online Seminar with the participation of foreign scientists dedicated to the 120th anniversary of the birth of Professor Volodymyr Kubyovych (1900–1985)*, Ukraine, Lviv, 184–188. [in Ukrainian]
4. De Blij, G., Muller, P., Shabliy, O. (2004). *Geography: Worlds, Regions, Concepts*. Kyiv, Lybid. [in Ukrainian]
5. Zinko, I. Z. (2015). *Foreign policy of the countries of Northern Europe*. Lviv, Ivan Franko National University of Lviv. [in Ukrainian]
6. Kuzyk, S. P., Kotyk, L. I., Vanda, I. V. (2019). *Regional economic and social geography of the world: a textbook*. Lviv, Ivan Franko National University of Lviv. [in Ukrainian]
7. Laver, O. G. (2018). *Wars and population of the world countries in the XX–XXI centuries (1900–2016). A statistical study*. 2nd ed. Uzhhorod, RIK-U. [in Ukrainian]
8. Pyshchulina, O. (2023). Assessment of the role of the demographic factor for economic growth and post-war recovery. Analytical report. Razumkov Centre. Available at: <https://razumkov.org.ua/images/2023/05/22/2023-MATRA-I-KVARTAL-7.pdf>
9. *Strategy of Demographic Development of Ukraine for the period up to 2040 (draft)*. Available from <https://www.msp.gov.ua/projects/870/>
10. Finland. A study of the country's recovery practices after destruction. (2022). Institute for Analysis and Advocacy. Available at: <https://iaa.org.ua/portfolio/finlyandiya/>
11. Andersen, S. N., Drange, N., & Lappegård, T. (2018). Can a cash transfer to families change fertility behaviour? *Demographic Research*, 38, 897–928. DOI: <https://doi.org/10.4054/DemRes.2018.38.33>
12. Andersson, G. (2004). Childbearing after Migration: Fertility Patterns of Foreign-born Women in Sweden. *International Migration Review*, 38(2), 747–774. <https://doi.org/10.1111/j.1747-7379.2004.tb00216.x>
13. Askeland, G. A., & Strauss, H. (2014). The Nordic welfare model, civil society and social work. In H. Strauss, C. Noble, & B. Littlechild (Eds.), *Global social work: Crossing borders, blurring boundaries* (pp. 241–254). Sydney University Press. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctv1fxm2q.21>
14. Bergsvik, J., Fauske, A., & Hart, R. K. (2021). Can policies stall the fertility fall? A systematic review of the (quasi-) experimental literature. *Population and Development Review*, 47(4), 913–964. DOI: <https://doi.org/10.1111/padr.12431>
15. Cantalini, S., Ohlsson-Wijk, S., Andersson, G. (2024). Cohabitation and Marriage Formation in Times of Fertility Decline: The Case of Sweden in the Twenty-First Century. *European Journal of Population*. 40, 15. <https://doi.org/10.1007/s10680-024-09703-9>
16. Deimantas, V.J., Şanlıtürk, A.E., Azzollini, L. et al. (2024). Population Dynamics and Policies in Europe: Analysis of Population Resilience at the Subnational and National Levels. *Population Research and Policy Review*. Vol. 43. (27). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11113-024-09871-w>
17. Demographic and Social Statistics. United Nations Statistics Division. Available at: <https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/index.cshtml>
18. Demographic changes: Challenge or opportunity for Nordic societies? Nordregio Report 2016. Available at: <https://archive.nordregio.se/Global/Publications/Publications%202016/State%20of%20the%20Nordic%20Region%202016/Theme%20demographic%20changes.pdf>
19. Einhorn, E., Harbison, S., Huss, M. (2022). *Migration and Multiculturalism in Scandinavia*. University of Wisconsin Press.
20. Heleniak, T. (2023). Are we witnessing a new demographic reality in the Nordics? Nordregio. Available at: <https://nordregio.org/blog/are-we-witnessing-a-new-demographic-reality-in-the-nordics/>

21. Horwood, C. (2024). The changing politics of immigration in Nordic countries. Mixed Migration Centre. Available from <https://mixedmigration.org/the-changing-politics-of-immigration-in-nordic-countries/>
22. May, J. (2015). Population Policies in Europe. *L'Europe en Formation*, 377, 136–150. <https://doi.org/10.3917/eufor.377.0136>
23. Migration Data Portal. The International Organization for Migration. Available at: <https://www.migrationdataportal.org/>
24. Nordregio. Available at: <https://nordregio.org/>
25. Numbers and statistics. Nordic Co-operation. Available at: <https://www.norden.org/en>
26. Population and Social Conditions. Eurostat. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/statistical-themes#population-social-conditions>
27. Population Division. Available at: <https://www.un.org/development/desa/pd/>
28. Population Reference Bureau. Available at <https://www.prb.org/>
29. Rauhut, D., Rasmussen, R., Roto, J., Francke, P., Östberg, S. (2008). *The Demographic Challenge to the Nordic Countries*. Nordregio, Stockholm.
30. State of the Nordic Region 2024. Nordregio. Available at: <https://nordregio.org/publications/state-of-the-nordic-region-2024/>
31. United Nations High Commissioner for Refugees. Available at: <https://www.unhcr.org/>
32. van Houtum, H., & Pijpers, R. (2007). The European union as a gated community: The two-faced border and immigration regime of the EU. *Antipode*, 39(2), 291–309.
33. World Happiness Report 2024. Available at: <https://worldhappiness.report/ed/2024/>
34. Zeisset, Maggie (2016) "The Happiest Xenophobes on Earth: Examining AntiImmigrant Sentiments in the Nordic Countries," *Res Publica – Journal of Undergraduate Research*: Vol. 21 Available at: <https://digitalcommons.iwu.edu/respublica/vol21/iss1/6>

Received 4 July 2024
Accepted 17 October 2024

Комплексна оцінка посушливості клімату України

Василь Затула

к. геогр. н., доцент, кафедра метеорології та кліматології,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail vaszatula@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5598-0200>

Дану роботу присвячено проблемам оцінки посушливості клімату України. Для проведення такої оцінки застосовано комбінований індекс Пінна (PCI) та його модифікацію (PCI_m). Базові обчислення цих індексів виконувалися більш як для 150 метеостанцій країни за два останні 30-річні періоди. Запропонована автором модифікація індексу краще відображає особливості аридності клімату в країнах помірного поясу, необхідні для прийняття рішень щодо іригації сільськогосподарських угідь. Розглянуто особливості географічного розподілу різних типів клімату України за цими індексами в 1961-1990 та в 1991-2020 рр. Показано, що в обидва періоди тут переважали гумідні різновиди клімату. Найбільший ступінь гумідності властивий зоні мішаних лісів та Українським Карпатам, а найбільш аридними є рівнинні простори півдня країни. Представлено карти розподілу посушливості клімату для цих двох періодів, а також карту зміни індексів аридності між ними. Для модифікованого варіанту індексу проведено поглиблений статистичний аналіз. Посушливість клімату України з просуванням із півночі на південь зростає принаймні у півтора рази швидше, ніж з віддаленням від Атлантичного океану у східному напрямку. Особливо чітко (коефіцієнт детермінації $R^2 > 0,7$) виявилася тенденція до посилення гумідності клімату з висотою. Коефіцієнти лінійного тренду цього показника в обох частинах досліджуваного періоду наближаються до 6 од. у перерахунку на 100 м висоти. Побудовані моделі множинної регресії дозволили встановити вид залежності індексу від усього комплексу елементів географічного положення в різні частини розглядуваного періоду, а також те, що провідну роль у формуванні загальної дисперсії індексу відіграє абсолютна висота (з часткою понад 60-65 %) та географічна довгота (з часткою понад 20 %). У різних регіонах України спостерігалися різні за знаком зміни індексу PCI_m. Як правило, за абсолютними значеннями вони не перевищували 5 од., однак вихід цього показника за межі одного середньоквадратичного відхилення (~2,5 од.) уже вказує на значне порушення попередніх кліматичних умов. Обчислені зміни індексу PCI_m приблизно на половині території країни перебувають фактично на межі цього критерію необоротних кліматичних змін. Аридизація клімату стає важливою ознакою розбалансування регіональної кліматичної системи України, а тому вимагає невідкладного реагування на рівні розробки і впровадження науково обґрунтованих заходів державної кліматичної політики у відповідності з цілями сталого розвитку ООН.

Ключові слова: гумідність і аридність клімату, комбінований індекс Пінна, модифікований комбінований індекс Пінна, моделі регресії, зміни клімату, адаптація сільського господарства до змін клімату, Україна; цілі сталого розвитку ООН.

Як цитувати: Затула Василь. Комплексна оцінка посушливості клімату України / Василь Затула // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 180-192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15>

In cites: Zatul Vasyl (2024). Complex assessing of aridity in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 180-192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Аридність або посушливість є фундаментальною властивістю клімату, яка потребує точності і зваженості підходів до її опису та оцінки. Попри формальну простоту формулювання аридності як властивості клімату певної території, в кліматології усе ще є місце для пошуку найкращих показників та методів її дослідження. Виконання такого роду досліджень сприятиме розробці і впровадженню науково обґрунтованих заходів державної кліматичної політики відповідно до цілей сталого розвитку ООН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аридність клімату тісно переплітається з поняттями бездошової погоди і посухи, часто оперує до таких елементів метеорологічного режиму, як вологість повітря, хмарність та атмосферні опади. У зволоженні деяких екосистем Землі винятково важливу роль відіграють роса та тумани.

В описі характеру зволоження важливе місце відводиться випаровуванню, швидкість якого,

згідно із формулою Джона Дальтона, залежить від різниці тиску насичення при температурі випарювальної поверхні і парціального тиску водяної пари, атмосферного тиску, а також від швидкості вітру та пов'язаної з нею інтенсивності турбулентного перенесення водяної пари [2]. На випаровування з поверхні ґрунту, окрім метеорологічних чинників, впливає також стан ґрунтово-рослинного покриву, а в умовах розчленованого рельєфу ще й абсолютна висота та експозиція схилу, інші фактори [4; 7; 18]. Це пояснює велику розмаїтість підходів щодо виділення сухих і вологих кліматів [18; 22].

Серед проявів сухого клімату особливо небезпечними є посухи, які за своєю природою є регіональним явищем [11]. Географічне положення України сприяє регулярному виникненню і розвитку на її території посух різної інтенсивності та просторового охоплення. Їх частота в сучасних умовах клімату зростає [1]. Встановленню посушливої погоди в Україні сприяє три-

вала трансформація повітря в антициклонах, причому одним з основних процесів при цьому є блокування зонального потоку в атмосфері [8].

У середніх кліматичних умовах як посуха, так і посушливість проявляються через дефіцит вологи [12]. Однак між цими поняттями є й принципові відмінності. Зокрема, на відміну від посухи, яка є обмеженим у часі природним явищем, посушливість є постійною особливістю клімату [6; 24; 27].

Посушливість відображає складний комплекс умов навколишнього середовища, що описується температурою повітря, атмосферними опадами, випаровуванням і за якої формується низький рослинний покрив [22], характерний для степових і пустельних ландшафтів.

Зазвичай посушливість зумовлена встановленням на великих просторах Землі стійкої циркуляції атмосфери й океану, вплив якої посилюються регіональними орографічними особливостями. На формування посушливих явищ в окремих регіонах найбільший вплив мають області високого тиску, холодні океанічні течії і сухі вітри, які дмуть над материками, а також ефект дощової тіні, спричинений орографічними перешкодами [12; 24; 28]. Однак метеорологічні чинники формування посушливості важко відокремити від нестачі води, пов'язаної з особливостями геологічної будови території та гідрогеологічними умовами залягання і динаміки підземних вод [13].

Причини посушливості важливі з погляду сучасної зміни глобального клімату, а відтак великого значення набуває і оцінка самих умов посушливості.

Однією з найважливіших проблем сучасності є нестача водних ресурсів та поширення посушливості й прогресуюче опустелювання в багатьох регіонах Земної кулі. Одеські дослідники [8] переконані, що збільшення повторюваності посух в Україні спричинене зміною регіонального клімату, зокрема підвищенням температури повітря, впливом Атлантики при зміщенні на схід центрів дії атмосфери та відхиленням траєкторій переміщення баричних утворень від типових. В Україні з аридизацією клімату пов'язане також зростання дефіциту насичення повітря [10].

Атмосферна посуха завдає великої шкоди сільськогосподарським культурам. Її прогнозування вимагає врахування сезонності явища та оцінки зміни властивостей підстильної поверхні. Значна увага приділяється попередженню та розробці стратегічних методів послаблення впливу посух. Вирішення цих завдань може досягатися різними шляхами, зокрема і завдяки проведенню ефективної економічної політики з перерозподілу та збереження водних ресурсів в

аридних регіонах [9].

Серед численних показників посушливості в сучасній кліматологічній практиці широко використовуються індекси аридності де Мартонна, запропоновані ним ще на початку XX ст. Відомо декілька типів таких індексів, які обчислюються за річний або коротший період часу.

Перший із них ґрунтується на використанні річних показників температури повітря і кількості опадів:

$$I_{DM} = P/(t + 10), \quad (1)$$

де I_{DM} – індекс аридності де Мартонна; P – річна кількість опадів, мм; t – середня річна температура, °C.

На основі місячних даних обчислюється інший тип індексу:

$$I_m = 12P'/(t' + 10), \quad (2)$$

де P' і t' – середні місячні значення кількості опадів та температури повітря, відповідно, для даного місяця. Вважається [16; 17; 30], що при $I_m < 20$ необхідна іригація землі.

Комбінований індекс Пінна (Pinna Combina-tive Index, PCI) враховує обидва підходи й обчислюється за формулою [16; 17; 25; 30]:

$$PCI = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{t+10} + \frac{12P'_d}{t'_d+10} \right), \quad (3)$$

де P'_d і t'_d – середні місячні значення кількості опадів і температури повітря для найсухішого місяця року.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Певною проблемою опису посушливості клімату в різних країнах світу за допомогою комбінованого індексу Пінна є певна незлагодженість у встановленні кількісних меж гумідних різновидів клімату різними авторами. Досі не було запропоновано жодного критерію для оцінки критичності змін умов аридності, накопичених в період глобального потепління. На регіональному рівні не можна вважати закритим питанням створення повних кліматологічних описів аридності в багатьох країнах світу, в Україні зокрема.

Основною метою роботи є критичний аналіз застосовності індексу PCI для дослідження посушливості клімату України та власне сама характеристика аридності, насамперед встановлення закономірностей просторового розподілу і зміни у часі індексів посушливості клімату на території країни за період 1961-2020 рр.

Матеріал і методи досліджень. Представлені нижче результати отримано шляхом обчислення та кліматологічного опрацювання індексів аридності на 153 метеорологічних станціях України за останні шість десятиріч. В емпіричну основу цих індексів покладено дані Кліматичних

кадастрів України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Перелік пунктів спостереження в даному дослідженні формувався зі станцій державної метеорологічної мережі України з повними кліматологічними рядами спостережень за температурою повітря і кількістю опадів в обох періодах спостереження. Ці станції достатньо рівномірно розподілені по материковій частині території країни і належним чином репрезентують усі її природно-кліматичні зони.

Опрацювання даних проводилося з використанням стандартних інструментів статистичного аналізу, реалізованих в пакеті програм "Microsoft Excel". Просторові моделі розподілу індексів аридності в Україні будувалися за допомогою методу обернених зважених відстаней в програмі QGIS (версія 3.34 "Prizren").

Загальний характер і ступінь впливу елементів географічного положення на показники аридності клімату оцінювалися за допомогою методів регресійного аналізу. Для оцінки їх залежності від окремих складових географічного положення – географічної довготи (λ , град.), широти (ϕ , град.) та висоти над рівнем моря (h , м н.р.м.) використовувався метод парної лінійної регресії, для сукупності географічних умов – метод множинної лінійної регресії. Зокрема, модель множинної регресії у нашому випадку можна подати у вигляді:

$$\hat{y} = a_{\lambda}\lambda + a_{\phi}\phi + a_h h + a_0, \quad (4)$$

де $\hat{y}$ – оцінка залежної величини (індексів аридності клімату); λ , ϕ , h – незалежна величина (досліджувані фактори впливу); a_{λ} , a_{ϕ} , a_h і a_0 – деякі безрозмірні коефіцієнти.

Якість побудованих моделей оцінювалася за допомогою прийнятих у математичній статистиці методів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відомо, що помірно-континентальний клімат України зі своєрідними рисами аридності в різних частинах її території, є сприятливим для сільського господарства. За даними метеорологічних спостережень, середнє багаторічне значення комбінованого індексу Пінна на материковій частині території України становило 39,9 у 1961-1990 рр. та 40,5 у 1991-2020 рр. Сам показник при цьому варіював від 13-15 на крайньому півдні Херсонської обл. до 90 і більше одиниць у високогірних районах Карпатських гір (метеорологічні станції Плай та Пожежевська). Такий широкий діапазон його значень зумовив необхідність виділення додаткової градації екстремально гумідного клімату, яка розробником класифікації не передбачалася (див., наприклад, [25]). Розподіл типів клімату за метеорологічними станціями України з урахуванням додаткової градації представлено в табл. 1.

Таблиця 1 / Table 1

Розподіл типів клімату в Україні за комбінованим індексом Пінна /
Distribution of climate types in Ukraine according to the Pinna combinative index

Тип клімату	Індекс аридності Пінна	1961-1990 рр.		1991-2020 рр.	
		кількість метеостанцій	%	кількість метеостанцій	%
аридний	до 10	0	0,0	0	0,0
напіваридний	від 10 до 20	15	9,8	12	7,8
гумідний	від 20 до 30	49	32,0	24	15,7
дуже гумідний	від 30 до 50	54	35,3	92	60,1
екстремально гумідний	50 і більше	35	22,9	25	16,3
	Разом	153	100,0	153	100,0

Аналіз табл. 1 показує сильне зростання гумідних умов на території країни за індексом аридності Пінна в другій половині розглядуваного періоду. Оскільки ця тенденція вступає у суперечність з висновками інших досліджень сучасної динаміки аридності клімату України та очікуваного її розвитку до кінця ХХІ ст. [3; 4], то потрібно розібратися з причинами такої невідповідності. З цією метою було проаналізовано час настання максимальної сухості (табл. 2).

Виявилося, що найсухішими місяцями року за параметром середньої місячної кількості опа-

дів є місяці холодного півріччя (з жовтня по березень), коли немає потреби в додатковій іригації сільськогосподарських угідь. Крім того, як часовий (див. табл. 2), так і просторовий (рис. 1) розподіл найсухішого періоду року за місяцями у різних частинах досліджуваного періоду виявився дуже нестійким. Очевидно, ці обставини демонструють обмеженість підходу, що лежить в основі комбінованого індексу Пінна. Їх не було виявлено в попередніх дослідженнях аридності клімату за показником PCI тому, що вони стосувалися переважно країн із середземноморським ти-

Найсухіші місяці року на метеостанціях України / Driest months of the year at weather stations in Ukraine

Місяць	Число випадків	Відсотків	Число випадків	Відсотків
	1961-1990 рр.		1991-2020 рр.	
I	14	9,2	42	27,5
II	28	18,3	66	43,1
III	49	32,0	11	7,2
IV	2	1,3	21	13,7
V	0	0,0	0	0,0
VI	0	0,0	0	0,0
VII	0	0,0	1	0,7
VIII	0	0,0	9	5,9
IX	1	0,7	1	0,7
X	59	38,6	2	1,3
XI	0	0,0	0	0,0
XII	0	0,0	0	0,0
Рік	153	100,0	153	100,0

пом клімату (Греції [16; 30], Італії [26], країн Іберійського півострова [14; 15; 25] та Туреччини [21]), в яких посушливий сезон збігається з основним (літнім) вегетаційним періодом. Серед європейських країн з континентальним кліматом просторовий розподіл PCI розглядався тільки для Сербії [19; 23], Румунії [20; 29] та Болгарії [29]. Оскільки ж вони повністю або частково

розташовані в центральній і північній частинах Балканського півострова, клімат яких значною мірою створюється під впливом Середземного моря, то автори останніх публікацій також ще не відчували значних незручностей у користуванні відомими градаціями показника PCI. Разом з тим, у деяких районах Сербії [23] значення PCI уже можуть перевищувати 100 одиниць.

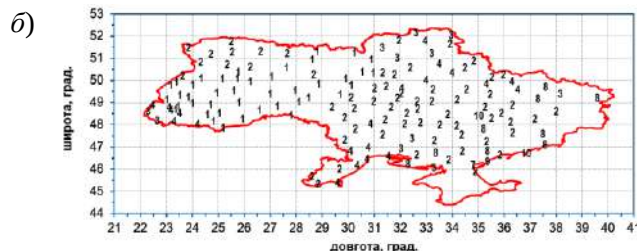
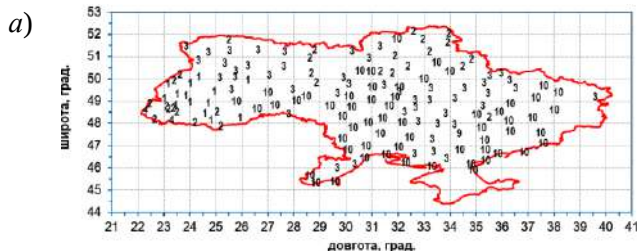


Рис. 1. Найсухіший місяць року (номер) в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. /
Fig. 1. Driest month of the year (number) in Ukraine: a. 1961-1990; b. 1991-2020

Тому було запропоновано модифікацію комбінованого індексу Пінна (PCI_m), яка акцентує увагу на умовах посушливості саме теплої половини року:

$$PCI_m = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{t+10} + \frac{12P'_d}{t'_d+10} \right), d \in W, \quad (5)$$

де P'_d і t'_d – середні місячні значення кількості опадів і температури повітря для найсухішого місяця множини W місяців теплої півріччя (в Україні це період з квітня по вересень).

Можна припустити, що завдяки відомим особливостям річного ходу атмосферних опадів в країнах середземноморського клімату, розрахункові показники PCI та PCI_m там практично не будуть відрізнятися. Натомість первинну шкалу умов аридності, яку запропонував Пінна для індексу PCI, можна буде поширити і на показник

PCI_m для значно ширшого діапазону географічних умов.

Географічний розподіл комбінованого індексу Пінна на території України представлено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, клімат країни за ступенем посушливості в різних її регіонах дуже відрізняється. Найбільшим ступенем гумідності вирізняються Українські Карпати. У створенні більш гумідних умов відчутною, хоч і не завжди, є роль Кримських гір (на рис. 2, а це не показано з метою дотримання однорідності картографічного представлення території), а також височин на півночі країни: Волино-Подільської, Придніпровської та Середньоросійської. В межах рівнинної частини території України найбільш посушливі умови склалися в межах Причорноморської низовини та степового Криму. Можна стверджувати,

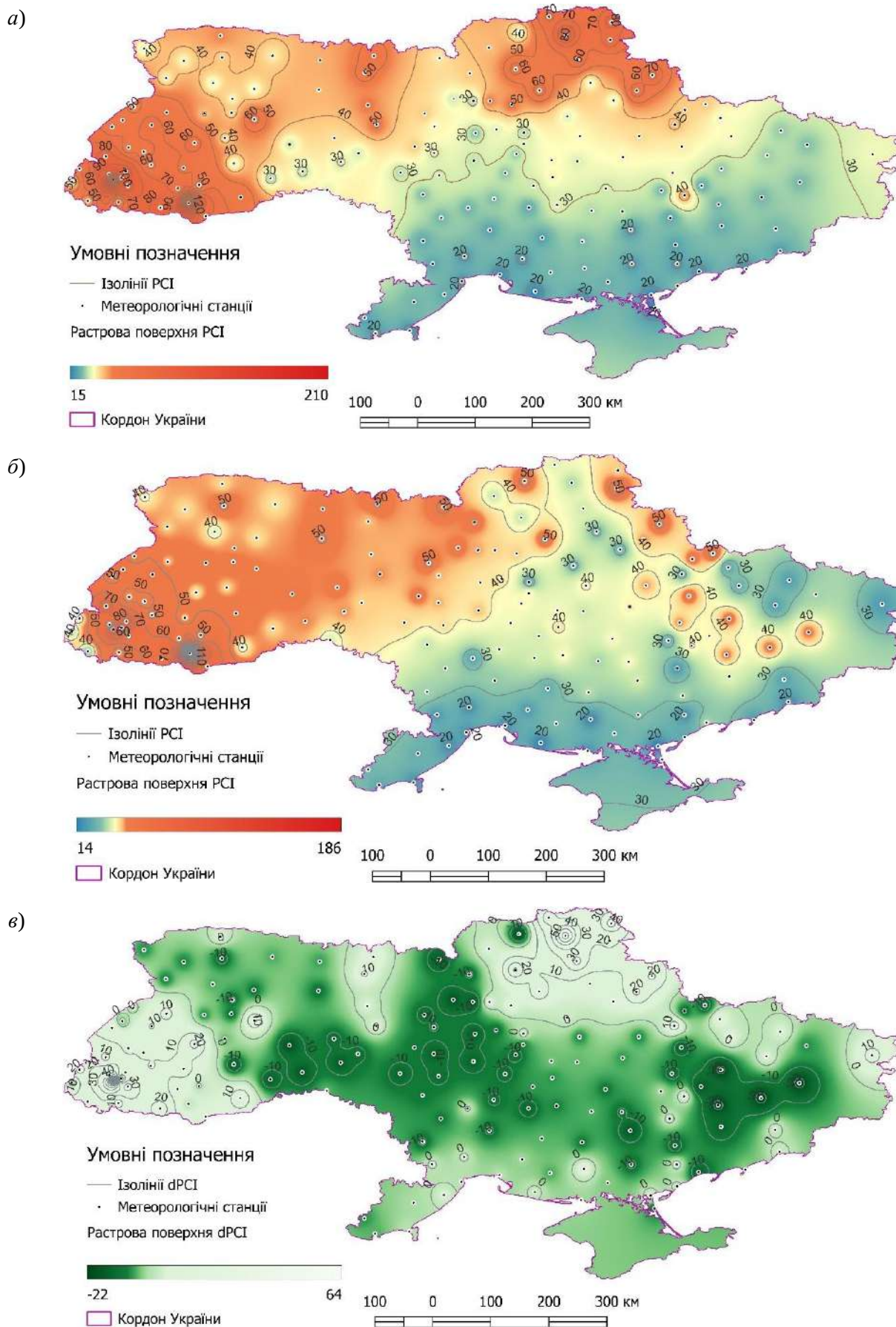


Рис. 2. Комбінований індекс аридності Пінна:

a) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр.; в) зміни в 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр. /
Fig. 2. Pinna combinative index: a. 1961-1990; b. 1991-2020; c. changes 1991-2020 relative to 1961-1990

що південніше 49-ї паралелі клімат України більш аридний, а на північ від неї він є дуже гумідним, або навіть екстремально гумідним.

Утім, на рис. 2 можна помітити й певну невідповідність, коли гумідні умови північного сходу країни виявляються ближчими до умов Українських Карпат, ніж гумідні умови на північному заході країни. Таку невідповідність не можна пояснити якимись об'єктивними причинами, а тому доводиться вчергове говорити про приховані недоліки в конструюванні самого індексу Пінна.

Перед тим, як приступити до аналізу показника PCI_m зазначимо, що розподіл найсухіших місяців теплого півріччя в обох частинах розгля-

дуваного періоду відрізняється набагато менше, ніж для індексу PCI . Зауважимо також, що у 1991-2020 рр. кількість випадків, коли цим місяцем був квітень зросла порівняно із 1961-1990 рр. зі 103 (67,3 %) до 132 (86,3 % усіх станцій) (рис. 3). Це тривожна тенденція, оскільки початок вегетаційного сезону відіграє дуже важливу роль у формуванні урожаю усіх вітчизняних культур. Водночас, значно змінилася ситуація і з вереснем. Якщо у 1961-1990 рр. він був найсухішим місяцем теплого півріччя на 42 метеостанціях (27,5 %), то в 1991-2020 рр. ці показники знизилися до 3 метеостанцій (2,0 %). Це може мати значення для формування врожайності озимих культур.

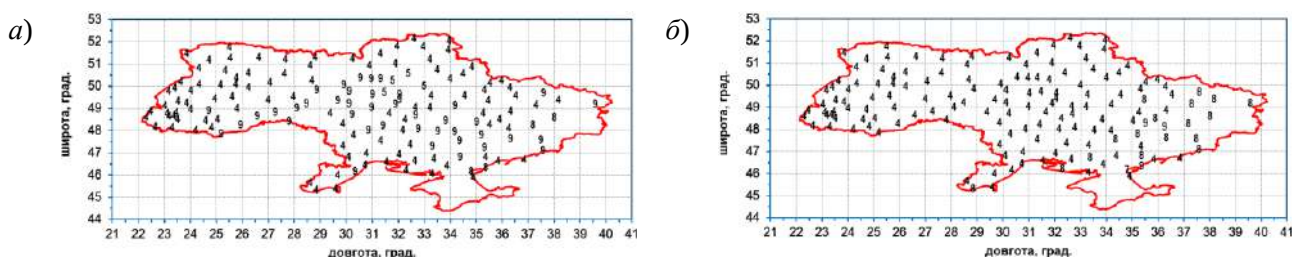


Рис. 3. Найсухіший місяць (номер) теплого півріччя в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. / Fig. 3. Driest month of the warm half-year (number) in Ukraine: a. 1961-1990; b. 1991-2020

Залежність показника PCI_m від елементів географічного положення показано на рис. 4. На ньому можна легко виявити два викиди з найбільшими значеннями PCI_m , які отримано для високогірних станцій Українських Карпат (Пожежевська і Плай). Оскільки застосування багатьох статистичних методів для вибірок з викидами є проблематичним, то ці станції довелось вилучити із вибірки, скоротивши тим самим кількість точок до 151.

Отримані для цих метеостанцій рівняння лінійної регресії та їх параметри представлено в табл. 3. У ній показано також параметри рівнянь лінійної регресії для показника $dPCI_m$, який відображає зміни індексу PCI_m в 1991-2020 рр. відносно його значення в 1961-1990 рр.:

$$dPCI_m = PCI_m(1991 - 2020) - PCI_m(1961 - 1990). \quad (6)$$

Усі побудовані рівняння лінійної регресії для показника PCI_m відображають не випадковий характер виявлених залежностей за F -критерієм та є значущими при рівні значущості $\alpha = 0,01$. Коефіцієнт детермінації R^2 вказує на велику тісноту залежності між абсолютною висотою і показником PCI_m та помірну тісноту залежності для інших чинників впливу на аридність клімату. Попарний аналіз знаку та абсолютної величини коефіцієнтів в отриманих рівняннях лінійної регресії для обох половин розглядуваного періоду вказує на те, що загальний характер просто-

рових закономірностей розподілу PCI_m залежно від довготи, широти або висоти над рівнем моря за цей час не змінився, що не можна сказати про інтенсивність самого зв'язку. Імовірною причиною таких змін можна назвати довгострокові коливання атмосферної циркуляції, під впливом яких модулюються прояви впливу елементів географічного положення.

Залежності, що описуються показником $dPCI_m$, апіорі не можуть бути такими тісними як у випадку PCI_m . Тому рівень значущості для них у табл. 3 не зазначено. Однак представлені тут рівняння відображають тонкі і слабо виражені зміни (R^2 тільки в одному випадку перевищує 0,05) у характері залежностей між відповідними величинами, а тому можуть становити певний інтерес також.

Як видно із табл. 3, посушливість клімату в Україні зростає із просуванням із півночі на південь, про що говорять додатні значення коефіцієнтів a_ϕ , та у напрямку із заходу на схід, на що вказують від'ємні значення коефіцієнтів a_λ . Зауважимо, що незважаючи на значно меншу тісноту залежності, абсолютні зміни індексу PCI_m на 1 градус широти у 1,5-1,7 разів перевищують їх зміни у перпендикулярному напрямку. Такі особливості просторового розподілу індексу добре помітно і на рис. 5, а), б).

Ще чіткішим ($R^2 > 0,7$) є зростання індексу PCI_m з висотою. Вертикальний градієнт цього показника в обох частинах досліджуваного пері-

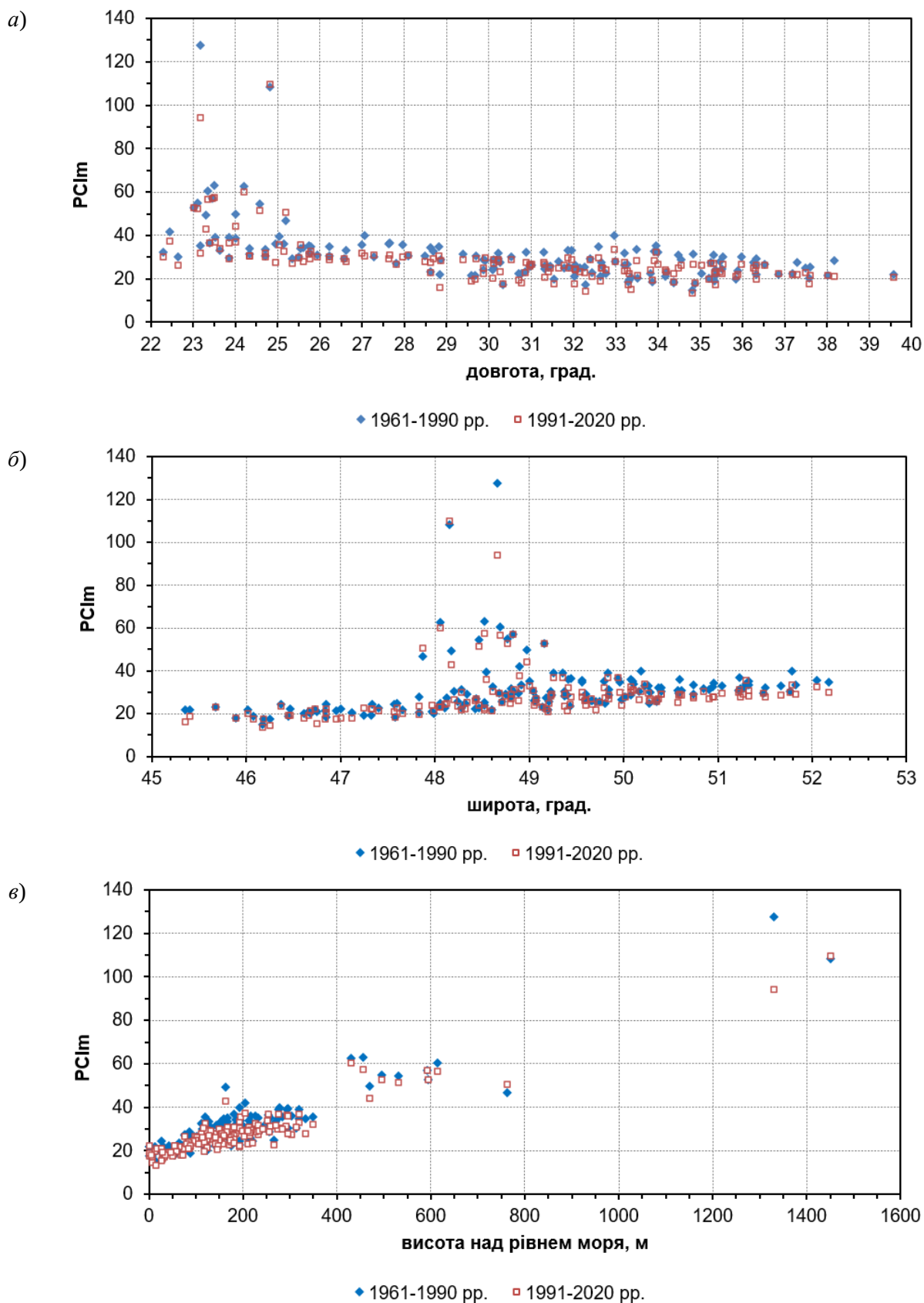


Рис. 4. Залежність PCI_m від окремих складових географічного положення:

a) від довготи; б) від широти; в) від висоти над рівнем моря /

Fig. 4. Dependence of PCI_m on individual components of geographical position:

a. on longitude; b. on latitude; c. on absolute elevation

Рівняння лінійної регресії для індексів аридності та основні їх параметри
(коефіцієнт детермінації R^2 та рівень значущості α) /
Linear regression equations for aridity indices and their main parameters
(determination coefficient R^2 and significance level α)

Період	Рівняння регресії	Параметри
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	довгота $\widehat{PCI}_m = -1,3445\lambda + 70,76$ $\widehat{PCI}_m = -1,2747\lambda + 66,518$ $d\widehat{PCI}_m = 0,0698\lambda - 4,2424$	$R^2 = 0,4379$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,4464$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,0146$
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	широта $\widehat{PCI}_m = 2,2897\varphi - 82,448$ $\widehat{PCI}_m = 1,8989\varphi - 65,411$ $d\widehat{PCI}_m = -0,3908\varphi + 17,038$	$R^2 = 0,161$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,1256$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,058$
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	висота над рівнем моря $\widehat{PCI}_m = 0,0594h + 19,346$ $\widehat{PCI}_m = 0,0579h + 17,489$ $d\widehat{PCI}_m = -0,0015h - 1,8568$	$R^2 = 0,7063$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,7623$; $\alpha = 0,01$ $R^2 = 0,0053$

оду наближається до 6 од. на 100 м висоти і виявляє значно вищу стійкість у часі, ніж горизонтальні градієнти PCI_m . Це вказує на те, що у високогір'ї Українських Карпат і на височинах країни завжди створюються більш гумідні умови, ніж на найближчих до них низовинах.

Залежність модифікованого комбінованого індексу Пінна від усіх елементів географічного положення можна описати за допомогою таких моделей:

$$\widehat{PCI}_m(1961 - 1990) = -0,469\lambda + 1,063\varphi + 0,046h - 16,11, \quad (7)$$

$$\widehat{PCI}_m(1991 - 2020) = -0,410\lambda + 0,686\varphi + 0,047h - 1,73. \quad (8)$$

Коефіцієнти детермінації 0,777 та 0,810 отриманих рівнянь переконливо вказують на тісну залежність PCI_m від розглядуваної сукупності чинників впливу. На невипадковий характер виявлених взаємозв'язків між залежною і незалежними величинами вказує і велике значення F -статистики (170,7 та 208,6). Обчислені для рівня значущості $\alpha = 0,01$ значення t -статистики значно перевищують критичне значення 2,610 і вказують на статистичну значущість отриманих коефіцієнтів при незалежних величинах, що після побудови нормованих (стандартизованих) моделей регресії уможливило оцінку внеску окремих елементів географічного положення в загальну дисперсію показника PCI_m . За обома моделями регресії більша частина дисперсії PCI_m зумовлена абсолютною висотою (61,0 та 67,5 % відповідно). На частку географічної довготи припадає не менше 20 % дис-

персії (21,6 та 20,4 %). Решта 17,4 та 12,1 % дисперсії індексу аридності – за географічною широтою.

Загалом, для більшості метеорологічних станцій країни досягається задовільна відповідність оціночних значень PCI_m за моделями (7) і (8) їхнім фактичним значенням. Середня абсолютна похибка оцінки цього індексу за рівнянням (7) дорівнює 3,0, а за рівнянням (8) – 2,5 од.; середня відносна похибка – 9,8 та 8,8 % відповідно. Для 90 % усіх станцій відносна похибка оцінки PCI_m не перевищує 20 %.

Перейдемо тепер до аналізу змін індексу PCI_m від однієї половини розглядуваного періоду до іншої. Насамперед потрібно зазначити, що величина його зміни лежить у дуже широкому діапазоні від -33,4 (Плай) до 4,2 од. (Нижні Сірогози). Після вилучення викидів найменшим числом у цій вибірці стало -9,5 (Шепетівка). Оскільки, як і очікувалося, модель множинної регресії навіть на рівні значущості 0,05 побудувати не вдалося, обмежимося тут просторовим аналізом ГІС-моделі розподілу величини $dPCI_m$ (див. рис. 5 в)).

Для 87,4 % станцій зміни індексу PCI_m не перевищували 5 од. (табл. 4). Індекс зменшився, а рівень аридності посилювався у 80,1 % випадків. З огляду на малу мінливість $dPCI_m$ по остаточній вибірці станцій в Україні (середньоквадратичне відхилення $\sigma = 2,533$) та відому ширину градацій різних типів клімату у вихідній класифікації кліматів Пінна (10 од.), умовно можна вважати, що зміна індексу PCI_m на 2,5 од. уже є кліматологічно значною зміною умов аридності клімату.

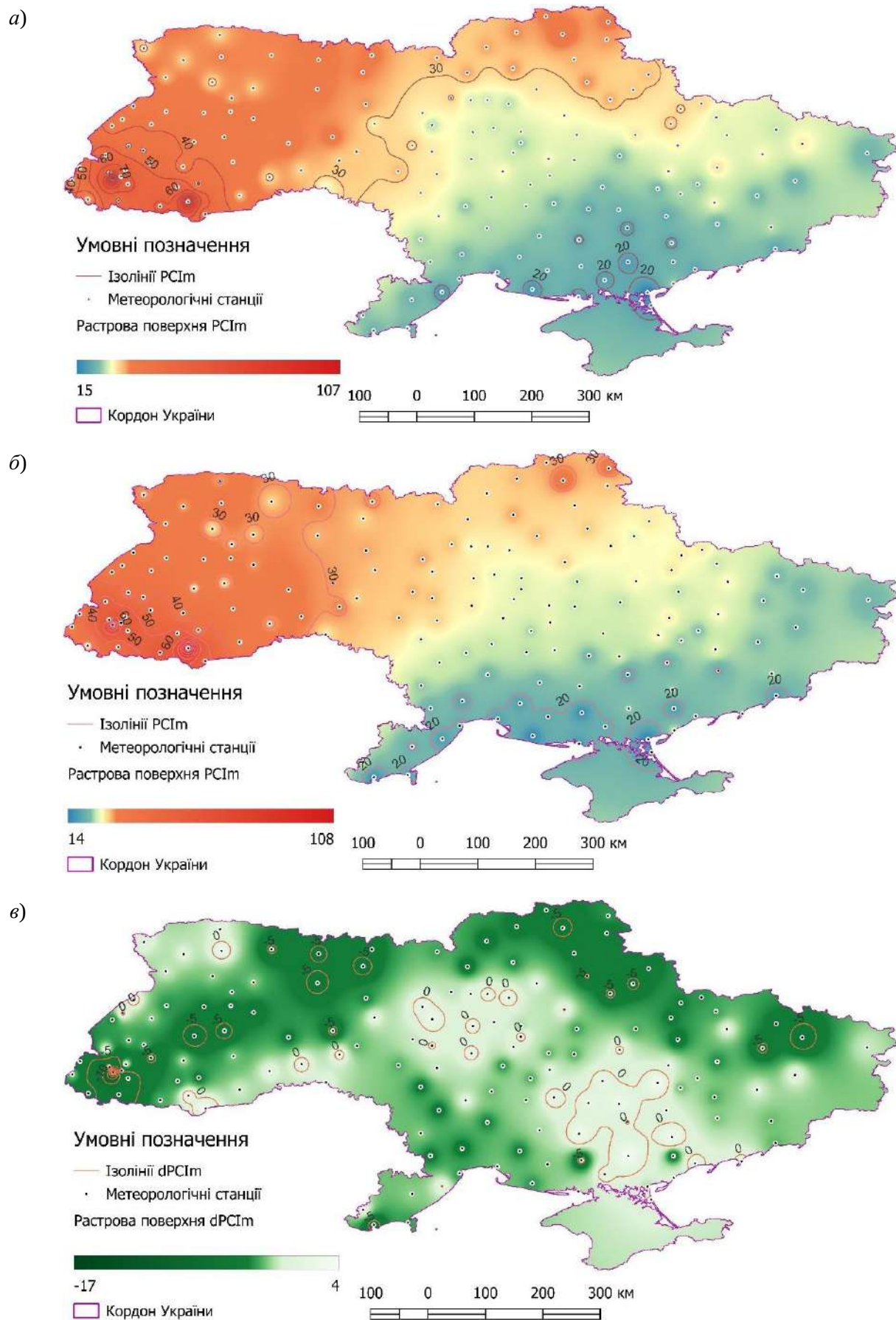


Рис. 5. Модифікований комбінований індекс аридності Пінна:

а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр.; в) зміни 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр. /

Fig. 5. Pinna modified combinative index: a. 1961-1990; b. 1991-2020; c. changes 1991-2020 relative to 1961-1990

Якщо виходити з цих міркувань, то приблизно на половині (52,3 %) метеостанцій спостережувані зміни індексу PCI_m ще не набули статусу змін в кліматологічному сенсі слова, а залишилися на рівні коливань клімату. Так чи інакше, це вимагає продовження моніторингу клімату та використання даних прогнозування змін клімату.

На більшій частині території країни індекс PCI_m зменшився, особливо сильно на заході, півночі і північному сході країни, тобто в регіонах з найкращим забезпеченням атмосферними опадами. Несприятливі процеси аридизації клімату охопили також Подільську височину, північне Причорномор'я та схід України. Протилежна

тенденція найбільш характерною була для нижнього і середнього Придніпров'я.

Відомо, що в регіонах прогресуючої аридизації клімату створюються передумови для більшого поширення C_4 -видів дикорослих і культурних рослин, які завдяки кращому пристосуванню до нових екологічних умов та вищій продуктивності фотосинтезу отримують об'єктивні переваги над представниками інших видів. В умовах України це може сприяти зміні структури посівів на користь таких культур як кукурудза, пшона, сорго й амарант [5], що вимагатиме розробки і впровадження відповідних заходів адаптації сільського господарства.

Таблиця 4 / Table 4

Повторюваність зміни індексу PCI_m різних градацій / Repeatability of PCI_m index change by gradations

Зміни PCI_m		Число випадків	Відсотків
від	до		
-10,0	-7,5	2	1,32
-7,5	-5,0	17	11,26
-5,0	-2,5	47	31,13
-2,5	0,0	55	36,42
0,0	2,5	24	15,89
2,5	5,0	6	3,97
Разом:		151	100,00

Висновки. Комбінований індекс Пінна є важливим кліматологічним індексом, який широко використовується сучасними дослідниками для встановлення ступеня гумідності або посушливості клімату. Згідно з класифікацією Пінна, клімат України є переважно гумідним. Найбільшим рівнем гумідності вирізняється клімат зони мішаних лісів та Українських Карпат. На півдні країни, за винятком Гірського Криму, домінують напіваридні умови.

В роботі було показано приховані недоліки в конструюванні цього індексу, які можуть виявлятися при дослідженні умов аридності клімату країн помірного поясу, а також було запропоновано й обґрунтовано простий спосіб їх усунення. Основна частина даного дослідження аридності клімату України проводилася уже за модифікованим комбінованим індексом Пінна (PCI_m).

В цілому аридність клімату України зростає у напрямку із північного заходу на південний схід

за великого впливу висоти над рівнем моря. На підвищених формах рельєфу створюються більш гумідні умови. В роботі отримано регресійні моделі, згідно з якими швидкість зміни показника PCI_m з широтою в 1,5 і більше рази перевищує швидкість її зміни у довготному напрямку. Провідну роль у просторовому розподілі індексу відіграють абсолютна висота та географічна довгота, на частку яких припадає понад 60 та понад 20 % загальної дисперсії відповідно.

В останні десятиріччя в різних регіонах України відбуваються різнонаправлені зміни показника PCI_m . На більшій частині території країни ці зміни не перевищують ± 5 од. Однак процеси аридизації не тільки домінують над іншими, але й демонструють загрозливу тенденцію до набуття статусу необоротних змін, що вимагає розробки і впровадження відповідних заходів адаптації сільського господарства країни у відповідності з цілями сталого розвитку ООН.

Список використаної літератури

1. Адаменко Т.І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату [Текст]. – Біла Церква: ТОВ «РІА» БЛІЦ, 2014. – 16 с. ISBN 978-617-7219-01-8.
2. Водчиць О.Г., Затула В.І. Основи метеорології і кліматології [Текст]: навч. посібник. – Київ : НАУ, 2017. – 360 с.
3. Гнатюк Н.В. Проекції температури повітря та кількості опадів в Україні в XXI столітті [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук : 11.00.09 "метеорологія, кліматологія, агрометеоро-

- логія" / Гнатюк Наталія Володимирівна; Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – Київ, 2017. – 20 с.
4. Затула В.І. Статистичний аналіз аридності клімату в Україні [Текст] / В.І. Затула, Н.І. Затула // Фізична географія та геоморфологія. – 2019. – Вип. 93(1). – С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.1.03>.
 5. Затула В.І. Аридизація клімату України та її вплив на сільське господарство [Текст] / В.І. Затула, Н.І. Затула // Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення: Матеріали III Міжнар. наук.-практич. конф. [Херсон, 11-12 червня 2020 року]. – Херсон : ДВНЗ «ХДАУ», 2020. – С. 121-124.
 6. Лобода Н.С. Оцінка характеристик посушливості Закарпаття в сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління) [Текст] / Н.С. Лобода, В.М. Хохлов, Ю.В. Божок // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2011. – Т. 2(23). – С. 49-56.
 7. Муха Б. Випаровування в Українському Розточчі (за матеріалами Розтоцького ландшафтно-геофізичного стаціонару) [Текст] / Б. Муха., І. Булаченко, М. Мельничук // Вісник Львівського університету. Серія географічна. – 2014. – Вип. 48. – С. 117-124.
 8. Нажмудінова О.М. Деякі аспекти формування інтенсивних посушливих явищ літню 2010 р. над Східною Європою [Текст] / О.М. Нажмудінова, Н.С. Єрмоленко // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011, № 9. – С. 79-84.
 9. Продан А.В. Огляд стану закордонних досліджень з вивчення посух та послаблення їх негативного впливу [Текст] / А.В. Продан, В.І. Затула // Фізична географія та геоморфологія. – 2009. – Вип. 57. – С. 157-161.
 10. Сидоренко А.В. Особливості просторово-часової структури полів дефіциту насичення та їх зв'язок з Північноатлантичним коливанням в умовах сучасного клімату України [Текст] / А.В. Сидоренко, В.І. Затула // Наук. праці УкрНДІГМІ. – 2011. – Вип. 260. – С. 95-109.
 11. Хохлов В.М. Регіональні особливості розподілу посух в Україні [Текст] / В.М. Хохлов, Г.О. Боровська, Г.В. Хоменко, Т.В. Шараєва // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 73-78.
 12. Agnew C. and Anderson W. Water resources in the arid realm [Text]. – Routledge, London, U.K., 1992. – 329 p. (Routledge physical environment series).
 13. Al-Zamili H.S. Assessment of spatial distributions of some climate indices in Iraq [Text] / H.S. Al-Zamili, A.M. Al-Lami // Journal of applied and advanced research. – 2018. – Vol. 3(4). – P. 96-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2018.v3i4.217>.
 14. Andrade C. Aridity conditions in the Iberian peninsula during the XX century [Text] / C. Andrade, J. Corte-Real // International journal of environmental science. – 2016. – Vol. 1. – P. 52-58.
 15. Andrade C. Climate change projections of aridity conditions in the Iberian peninsula [Text] / C. Andrade, J. Contente, J.A. Santos // Water. – 2021. – Vol. 13, Iss. 15. – P. 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152035>.
 16. Baltas E. Spatial distribution of climatic indices in northern Greece [Text] / E. Baltas // Meteorological applications. – 2007. – Vol. 14, Iss. 1. – P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.7>.
 17. Baltas E.A. Surface representation of climatic variables and indices in Greece using GIS methods [Text] / E.A. Baltas // The international journal of meteorology. – 2010. – Vol. 35, No. 348. – P. 123–136.
 18. Blüthgen J. Allgemeine Klimageographie [Text] / J. Blüthgen. – Berlin, Boston: De Gruyter, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783111440293>.
 19. Burić D. Contribution to the study of climate change in Serbia using continentality, oceanity, and aridity indices / D. Burić, J. Mihajlović, V. Ducić, M. Milenković and G. Anđelković // IDŐJÁRÁS. – 2023. – Vol. 127, No. 3. – P. 379–399. DOI: <https://doi.org/10.28974/idojaras.2023.3.6>.
 20. Croitoru A.-E. Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania [Text] / A.-E. Croitoru, A. Piticar, A.M. Imbroane, D.C. Burada // Theoretical and applied climatology. – 2013. – Vol. 112, No 3-4. – 597-607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0755-2>.
 21. Deniz A. Spatial variations of climate indices in Turkey [Text] / A. Deniz, H. Toros, S. Incecik // International journal of climatology. – 2010. – Vol. 31, Iss. 3. – P. 394–403. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2081>.
 22. Encyclopedia of world climatology [Text] / John E. Oliver (Ed.). – Springer, Dordrecht, Netherlands; New York, 2005. 854 p. – Encyclopedia of Earth sciences series. ISBN 978-1-4020-3264-6.
 23. Hrnjak I. Aridity in Vojvodina, Serbia [Text] / I. Hrnjak, T. Lukić, M.B. Gavrilov, S.B. Marković, M. Unkašević, I. Tošić // Theoretical and applied climatology. – 2014. – Vol. 115. – P. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0893-1>.
 24. Maliva R.G. and Missimer T.M. Arid lands water evaluation and management. Environmental Science and Engineering [Text]. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – P. 21–39. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2.
 25. Moral F.J. Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain [Text] / F.J. Moral, F.J. Rebollo, L.L. Paniagua, A. García-Martín, F. Honorio // Theoretical and applied climatology. – 2016. – Vol. 126, Iss. 3-4. – P. 801–814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1615-7>.
 26. Nistor M.M. Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region [Text] / M.M. Nistor // Meteorological applications. – 2016. – Vol. 23, Iss. 2. – P. 304–313. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.1555>.
 27. Smakhtin V.U. Droughts: The impact of semantics and perceptions [Text] / V.U. Smakhtin, E.L.F. Schipper // Water Policy. – 2008. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 131–143. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2008.036>.

28. Thompson R.D. *The climatology of the arid world* [Text]. University of Reading, UK, Department of Geography. *Geographical Papers*. – 1975. – No. 35. – P. 39.
29. Vlăduț A.Ș. Aridity assessment within southern Romania and northern Bulgaria [Text] / A.Ș. Vlăduț, N. Nikolova, M. Licurici // *Hrvatski geografski glasnik*. – 2017. – Vol. 79, No 2. – P. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.21861/HGG.2017.79.02.01>.
30. Zambakas J. *General Climatology* [Text]. Department of Geology, National and Kapodistrian University of Athens: Athens, 1992.

Complex assessing of aridity in Ukraine

Vasyl Zatula

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Introduction. The aridity is an important part of the climate characterization of a territory. Over the past 100 years, aridity indices have been used to assess it.

The purpose of article is to characterize the patterns of the spatial distribution and changes over time of aridity indices on the territory of Ukraine for the period 1961-2020.

Data and methods. The Pinna combinative index (PCI) and its modification (PCIm) were used to determine the aridity assessment. Basic calculations of these indices were performed for more than 150 weather stations in Ukraine over the last two 30-year periods. The main results of the research were obtained using statistical methods and GIS technologies.

Results. It has been found that the use of the PCI index in temperate countries may be constrained by its high sensitivity to the moisture conditions in the driest month of the year, which often extends beyond the growing season. The modification of the index proposed by the author better reflects the peculiarities of aridity in temperate countries, which are necessary for making decisions on agricultural irrigation. Maps of the distribution of aridity indices for 1961-1990 and 1991-2020 periods and its changes between them are presented. For the modified version of the index, an in-depth statistical analysis was conducted. It is shown that the aridity of Ukraine increases at least one and a half times faster with moving from north to south than with moving away from the Atlantic Ocean in the eastern direction. The tendency to increase the humidity of the climate with elevation turned out to be particularly clear (the coefficient of determination $R^2 > 0.7$). The coefficients of the linear trend of this indicator in both parts of the studied period are close to 6 units in terms of elevation per 100 m. Multiple regression models were shown that the leading role in the formation of the total variance of the index is played by absolute elevation (with a share of more than 60-65%) and geographic longitude (with a share of more than 20%). Changes in the PCIm index were observed in different regions of Ukraine with different signs. As a rule, they did not exceed 5 units, but the fact that this indicator exceeds one standard deviation (~2.5 units) already indicates a significant violation of previous climatic conditions. The calculated changes in the PCIm index in about half of the country's territory are actually on the verge of this criterion of irreversible climate change. Aridization of the climate is becoming an important signal of the imbalance of the regional climate system of Ukraine, and therefore requires an urgent response at the level of development and implementation of appropriate state climate policy measures.

The scientific novelty. The paper analyses for the first time the limits of applicability of the Pinna combinative index and proposes and justifies its improvement.

Practical significance. The proposed modification of Pinna combinative index can be of great importance for the comparability of climate aridity assessments in countries with temperate and subtropical climates. The assessment of the aridity in Ukraine will be useful in the development and implementation of state climate policy measures in areas of intensive climate aridization according to Sustainable Development Goals of United Nations.

Keywords: humidity and aridity; Pinna combinative index; Pinna modified combinative index; regression models; climate change; agricultural adaptation to climate change; Ukraine; Sustainable Development Goals of United Nations.

References

1. Adamenko, T.I. (2014). *Agro-climatic zoning of Ukraine taking into account climate change*. Bila Tserkva, Ukraine, 16. ISBN 978-617-7219-01-8. [in Ukrainian]
2. Vodchyts, O.G., Zatula, V.I. (2017). *Fundamentals of meteorology and climatology*. Kyiv, Ukraine, 360. [in Ukrainian]
3. Gnatiuk, N.V. (2017). *The projections of air temperature and precipitation in Ukraine in the 21st century*. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv, Ukraine, 20. [in Ukrainian]
4. Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2019). Statistical analysis of aridity in Ukraine. *Physical geography and geomorphology*, 93(1), 19-24. DOI: <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.1.03>. [in Ukrainian]
5. Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2020). Aridization of Ukraine's climate and its impact on agriculture. *The impact of climate change on spatial development of Earth's territories: implications and solutions*. 3rd International scientific and practical conference. June 11-12, 2020. Kherson, Ukraine, 121-124. [in Ukrainian]

6. Loboda, N.S., Khokhlov, V.N., Bozhok, Y.V. (2011). Assessment of droughtiness descriptions of Transcarpathia in modern and future terms (global climate change scenarios). *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 2(23), 49-56. [in Ukrainian]
7. Mucha, B., Bulavenko, I., Melnychuk, M. (2014). Evaporation in Ukrainian Roztochia (for materials belongs to the Rostochye landscape geophysical full-time department). *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 48, 117-124. [in Ukrainian]
8. Nazhmudinova, E.M., Yermolenko, N.S. (2011). Some aspects of formation of intensive droughts conditions in summer of 2010 over eastern Europe. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 9, 79-84. [in Ukrainian]
9. Prodan, A.V., Zatula, V.I. (2009). Overview of the state of foreign research on the study of droughts and mitigation of their negative impact. *Physical geography and geomorphology*, 57, 157-161. [in Ukrainian]
10. Sydorenko, A.V., Zatula, V.I. (2011). Features of spatial and temporal structure of saturation deficit fields and their relationship with the North-Atlantic oscillation in the conditions of Ukrainian modern climate. *Proceedings of Ukrainian research hydrometeorological institute*, 260, 95-109. [in Ukrainian]
11. Khokhlov, V.N., Borovska, G.A., Khomenko, G.V., Sharaieva, T.V. (2011). Regional features of droughts distribution in Ukraine. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 9, 73-78. [in Ukrainian]
12. Agnew C. and Anderson W. (1992). *Water resources in the arid realm*. Routledge, London, U.K., 329. Routledge physical environment series.
13. Al-Zamili H.S., Al-Lami A.M. (2018). Assessment of spatial distributions of some climate indices in Iraq. *Journal of applied and advanced research*, 3(4), 96-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2018.v3i4.217>.
14. Andrade C., Corte-Real J. (2016). Aridity conditions in the Iberian peninsula during the XX century. *International journal of environmental science*, 1, 52-58.
15. Andrade C., Contente J., Santos J.A. (2021). Climate change projections of aridity conditions in the Iberian peninsula. *Water*, 13(15), 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152035>.
16. Baltas, E. (2007). Spatial distribution of climatic indices in northern Greece. *Meteorological applications*, 14(1), 69-78. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.7>.
17. Baltas, E.A. (2010). Surface representation of climatic variables and indices in Greece using GIS methods. *The international journal of meteorology*, 35(348), 123-136.
18. Blüthgen, J. (1966). *Allgemeine Klimageographie [General Climatic Geography]*. Berlin, Boston: De Gruyter. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783111440293>. [in German]
19. Burić D., Mihajlović J., Ducić V., Milenković M. and Anđelković G. (2023). Contribution to the study of climate change in Serbia using continentality, oceanity, and aridity indices. *IDŐJÁRÁS*, 127(3), 379-399. DOI: <https://doi.org/10.28974/idojaras.2023.3.6>.
20. Croitoru, A.-E., Piticar, A., Imbroane, A.M., Burada, D.C. (2013). Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania. *Theoretical and applied climatology*, 112(3-4), 597-607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0755-2>.
21. Deniz A., Toros H., Incek S. (2010) Spatial variations of climate indices in Turkey. *International journal of climatology*, 31(3), 394-403. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2081>.
22. Oliver J.E. (Ed.) (2005). *Encyclopedia of world climatology*. Springer, Dordrecht, Netherlands; New York, 2005, 854. *Encyclopedia of Earth sciences series*. ISBN 978-1-4020-3264-6.
23. Hrnjak I., Lukić T., Gavrilov M.B., Marković S.B., Unkašević M., Tošić I. (2014). Aridity in Vojvodina, Serbia. *Theoretical and applied climatology*, 115, 323-332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0893-1>.
24. Maliva R.G. and Missimer T.M. (2012). *Arid lands water evaluation and management*. Environmental Science and Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 21-39. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2.
25. Moral F.J., Rebollo F.J., Paniagua L.L., García-Martín A., Honorio F. (2016). Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and applied climatology*, 126(3-4), 801-814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1615-7>.
26. Nistor M.M. (2016). Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region. *Meteorological Applications*, 23(2), 304-313. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.1555>.
27. Smakhtin V.U. and Schipper E.L.F. (2008). Droughts: The impact of semantics and perceptions. *Water Policy*, 10(2), 131-143. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2008.036>.
28. Thompson R.D. (1975). *The climatology of the arid world*. University of Reading, UK, Department of Geography. *Geographical Papers*, 35, 39.
29. Vlăduț A.Ș., Nikolova N., Licurici M. (2017). Aridity assessment within southern Romania and northern Bulgaria. *Hrvatski geografski glasnik*, 79/2, 5-26. DOI: <https://doi.org/10.21861/HGG.2017.79.02.01>.
30. Zambakas J. (1992). *General Climatology*. Department of Geology, National and Kapodistrian University of Athens: Athens.

War consequences and prospects for post-war reconstruction (case of Ukrainian urban agglomerations)

Kateryna Kravchenko¹

PhD (Geography), Associate Professor,

K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: kateryna.kravchenko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-4654-3185>;

Liudmyla Niemets¹

DSc (Geography), Professor,

Head of the K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,

e-mail: ludmila.niemets@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9943-384X>;

Kateryna Sehida¹

DSc (Geography), Professor, K. Niemets Department of Human Geography and Regional Studies,

e-mail: kateryna.sehida@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-1122-8460>

ABSTRACT

During the years of Russia's last war against Ukraine, cities and suburbs have become the main centers of military aggression. The restoration and revitalization of territories – particularly cities and urban agglomerations – is a pressing issue, as they serve as concentrators and catalysts for development. Many countries of the world have experience of recovery after large-scale hostilities. Their successful recovery practices should be studied and can be implemented for effective recovery and post-war development of cities and urban agglomerations of Ukraine.

The purpose of this study is to identify the key characteristics of the war's consequences, as well as the challenges and prospects for post-war recovery in Ukraine's urban agglomerations, incorporating successful global practices and aligning with the goals of sustainable development. This analysis incorporates successful global practices and aligns with the goals of sustainable development. The research aims to develop a flexible recovery model that integrates economic, social, and environmental aspects, adapted to the contemporary challenges facing Ukraine.

Results. The study highlights the multidimensional impact of the war on Ukrainian cities, including the physical destruction of infrastructure, socio-economic disintegration, and environmental challenges. Drawing on international experiences of post-war reconstruction in countries such as Germany, Japan, and South Korea, the research identifies effective strategies, including infrastructure modernization, industrial recovery, social integration of internally displaced persons, and land restoration. The article examines urban agglomerations around the world that have experienced significant destruction, including Warsaw, Berlin and Tokyo, and identifies key features of their reconstruction processes. The study emphasizes the importance of rebuilding Ukraine in alignment with the principles and goals of the Concept of Sustainable Development, adhering to the "build back better" strategy. This includes the reuse of "post-war brownfields," the integration of innovative technologies, and the active involvement of local communities in the recovery process. The article outlines the potential for restoring Ukraine's urban agglomerations and presents a comprehensive set of measures and practical recommendations for the recovery of cities, urban areas, and affected regions. These recommendations are rooted in the framework of the 17 Sustainable Development Goals.

Keywords: urban agglomerations, post-war reconstruction, sustainable development, post-war brownfields, urbicide.

In cites: Kravchenko Kateryna, Niemets Liudmyla, Sehida Kateryna. (2024). War consequences and prospects for post-war reconstruction (case of Ukrainian urban agglomerations). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 193-211. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-16>

Relevance. The foundation of the modern world order lies in powerful cities and urban agglomerations, which, alongside countries, play a pivotal role in transforming the global system. The 21st century is often referred to as the "century of cities," as, for the first time in history, more than half of humanity resides in urban areas. The roots of this phenomenon, however, were established in the 19th and 20th centuries, when the processes of rapid urbanization became a global trend, manifesting across all regions of the world. These processes led to unprecedented urban expansion, along with increased construction, destruction, and regeneration of urban spaces. Urban agglomerations are ambas-

sadors of economic growth, which perform an organizational, social, ecological and innovative function, and ensure the comprehensive evolution of countries and regions of the world [18]. The reuse of the territories of the centers and peripheries of agglomerations comes to the fore, especially in the context of sustainable development, disproportionate urban growth and the revival of urban centers [14]. The number, capacity and competitiveness of urban agglomerations today become the identifier of the development of the territory. And the key feature of cities and urban agglomerations is determined by sustainability and the ability to synergize [30].

War accompanies humanity throughout its exis-

tence. However, the ways and means of waging war are evolving quite quickly. It is in our time that their destructive influence is the most powerful in the entire history of mankind. Military operations have a multidimensional negative impact on cities and urban agglomerations. It covers a wide range of different aspects. The physical destruction of infrastructure is one of the most obvious consequences, which includes damage to housing stock, leaving thousands homeless, destruction of transport routes, bridges and roads, complicating logistics and access to services, and damage to utility networks such as electricity, water supply and sewerage. The social impact of hostilities is manifested in the occurrence of forced resettlement of the population, which destabilizes both the affected regions and places of temporary stay. Social ties and cultural centers are destroyed, leading to the loss of local identity, and the psychological stress of the residents due to hostilities makes it difficult for them to return to normal life. Economic consequences include the loss of jobs due to the destruction of businesses, a drop in revenues for local budgets, and the loss of investment attractiveness of damaged areas, which slows down their economic recovery [39, 42].

The war in Ukraine has been going on since February 2014, its full-scale phase – from February 2022. During the Russian-Ukrainian war, cities and suburbs became the main centers of military aggression [24]. Before the war in Ukraine, in 2013, there were 23 urban agglomerations in the country, with a population of 38,000 and over. persons (the largest – Kyiv, the smallest – Debaltseve) [41]. During this time, some regions and cities were occupied, de-occupied, some of them are being re-occupied. These processes are accompanied by significant destruction. There are settlements that have been completely destroyed and can no longer function due to the large-scale destructive impact. In cities such as Shchastya, Bakhmut, Avdiivka, Toretsk, Vovchansk, and many others, not a single building remains intact, and all communications have been destroyed. A number of front-line cities such as Kharkiv, Mykolaiv, Sumy, and Kramatorsk are being destroyed on a daily basis. All these are manifestations of direct urbicide. At the same time, cities that are under Russian occupation and have experienced a greater degree of non-military destruction have experienced indirect urbicide [24]. However, after the war, the restoration and revitalization of territories – particularly cities and urban agglomerations – will become a pressing issue, as they serve as concentrators and catalysts for development [3]. Many countries of the world have experience of recovery after large-scale hostilities. Their successful recovery practices should be studied and can be implemented for effective recovery and post-war

development of cities and urban agglomerations of Ukraine.

Analysis of recent research and publications.

A significant body of scientific research focuses on the impact of military operations on cities and territories, as well as their subsequent restoration. This is a critical issue, as most countries worldwide have, in some form, experienced post-war reconstruction. The speed and efficiency of this process directly influence the prospects for the further development and renewal of cities and urban agglomerations. With the ongoing war in Ukraine, located at the heart of Europe, the destruction of the physical urban environment, shifts in the social landscape, and other challenges have intensified. Consequently, a growing number of studies and publications are addressing issues related to post-war planning, reconstruction, and recovery [22], as well as analysis of the restoration of architecture in a number of European cities after the Second World War [35]. Among the studies devoted to the restoration of cities, urban agglomerations and countries of Europe and the world, the following studies should be noted.

Alvanides, S., Ludwig, C. argue that the full-scale destruction caused by war creates multi-layered challenges for urban regeneration. Post-war reconstruction covers not only the restoration of physical infrastructure, but also the revival of the socio-economic sphere, the preservation of cultural heritage and the adaptation of cities to modern challenges [5]. According to the authors, physical reconstruction plays a key role in post-war reconstruction, and one of the effective tools in this process is geo-spatial analysis, which allows visualization and assessment of the scale of destruction. Using the example of the city of Essen (Germany), using historical maps of destruction and modern geo-information technologies (GIS), the authors proposed a destruction index (BDI), which contributed to the identification of the most affected areas and, in the future, to optimize the planning and recovery processes. The study also demonstrates a clear connection between the scale of destruction during the Second World War and socio-economic disparities in the modern development of the city, because the areas that suffered the most destruction were more vulnerable in terms of unemployment and low levels of home ownership. The authors note that innovations in urban planning become especially important in terms of adaptation to modern challenges. In the post-war "new towns" of Great Britain, the concept of "neighborhood units" was actively implemented, which provided access to all necessary facilities within walking distance. Therefore, the study of historical examples, in particular, the experience of rebuilding cities after the Second World War to

solve modern problems and create sustainable urban environments in the future [5].

The research of Bugalski, Ł., Lorens, P. is devoted to the analysis of the post-war reconstruction of Polish cities, which is based on historical, political and social aspects that influenced the reconstruction processes [7]. Polish cities suffered extensive destruction during the Second World War. Their consequences required the creation of a multi-layered recovery strategy, which included the restoration of historical heritage, adaptation to new social realities and the integration of modern urban principles. In particular, the reconstruction of Warsaw, Gdańsk and other cities based on pre-war plans was aimed at reproducing the pre-war appearance and restoring the symbolic role of cities. In the 1950s, the political emphasis shifted to meeting the housing needs of the working class. New quarters were created according to the principles of industrialized construction, which sometimes contradicted the preservation of historical centers. The reconstruction of cities such as Malbork or Slupsk shows an example of the synthesis of new architectural styles with the remains of historical buildings [7].

Since the 1980s, the restoration of cities such as Elblong and Głogów involved the integration of historical forms into modern architecture. The idea of "retroversion" of cities was based on preserving the spirit of the past, but with innovative approaches to design. Modern trends and commercialization began to appear in 2004, after Poland's accession to the EU. Nowadays, the reconstruction of historical cities includes the development of tourism and thematization of urban space [4]. Although this contributes to economic growth, there is a risk of loss of architectural authenticity due to "facadism" and excessive "tourismization", which is a certain challenge.

Abdulla, Z. R., Hussein, S. H. investigated post-war recovery using the example of the revitalization of the city of Mosul [1]. One of the leading ideas emphasized in the study is the importance of involving local professionals and the community in recovery processes. The study shows that local experts have access to valuable information and can make informed decisions that meet the needs of residents. This bottom-up approach helps ensure that recovery is aligned with expectations and needs. The challenge of post-war recovery raises questions about the best strategies for physical and social recovery. In the case of Mosul, the main strategies suggested by local experts are the mixed use of development, rehabilitation, restoration and conservation of cultural heritage. For example, experts point to the importance of integrating the old and the new in the building, which is critical for preserving the city's identity. In view of the existing significant

destruction, most experts agreed that, first of all, it is necessary to restore residential buildings, since many residents were forced to leave their homes, and social infrastructure institutions, communal services. In summary, it is worth noting that the development of recovery plans should be based on the opinion of the local community, and in the recovery process it is necessary to use technological solutions for monitoring and optimizing the recovery process [1].

In the study of Vialard, A. the process of reconstruction of French cities after the Second World War is analyzed, in particular, the impact of relevant reconstruction plans on urban spaces [44]. Recovery strategies varied based on the level of destruction, ranging from localized interventions to a complete reimagining of the city's layout. While some cities chose the path of innovation, others tried to preserve the old plan with some modifications, such as widening of streets, etc. The study examines how new urban plans facilitate navigation in redesigned spaces while highlighting their impact on city identity. It notes that many plans fail to adequately preserve historical essence, raising concerns about cultural heritage preservation. The research emphasizes the crucial role of public associations in safeguarding urban heritage and stresses the importance of involving local communities in the restoration process. In particular, the study characterizes how post-war urban regeneration in France reflects the complex interrelationships between architectural solutions, urban structure and cultural heritage, and provides insight into contemporary approaches to urban regeneration [44].

Shaaban, M. H. I., presents an approach to the restoration of polluted and abandoned areas (brownfields) in the context of sustainable urban development in his research. In particular, it considers brownfields as a resource for restoration and reducing the consumption of new land. Brownfields can be strategically transformed into places for housing, new businesses, cultural and social centers. The author suggests considering sustainable development as the main principle of recovery. The author has performed an analysis of brownfield rehabilitation practices in cities such as New York, London, and Stockholm, which allows for the creation of adapted strategies for other war-affected cities. On the basis of the achieved development, it is worth noting that the reconstruction of urban areas after the war through the use of brownfields can become a powerful tool for sustainable development, especially in conditions of scarcity of new land. It is important to do this through inclusive, ecological and cost-effective planning that delivers long-term results for cities and urban agglomerations [37].

A significant amount of research is devoted di-

rectly to the post-war reconstruction of Ukraine. In particular, in December 2023, an international seminar was held under the auspices of NATO Science for Peace and Security. The scientific event is dedicated to the reuse of military brownfields, sustainable reuse of facilities, community involvement, risk assessment, war-related consequences of the war in Ukraine [27].

Among other studies aimed at finding ways to restore the cities of Ukraine, the study carried out with the support of the Konrad Adenauer Foundation is significant. It presents an opportunity to evaluate approaches to the post-war reconstruction of Ukrainian cities and urban agglomerations, taking into account modern challenges and principles of sustainable development [36]. The focus of the study is the concept of "green reconstruction" and "green transformation", which is the basis for building sustainable urban environments in the post-war period. In the study, all cities of Ukraine are divided into two groups: those that have suffered significant destruction, and those that have kept their infrastructure relatively intact. For the first group, the authors consider physical restoration a priority, and for the second - transformation in accordance with modern environmental standards. The authors consider human resources as the basis for the restoration of cities and territories, the importance of the return of the population, which requires the creation of comfortable living and working conditions, including housing, functioning infrastructure, access to medical services and education, is emphasized. Human capital is defined as a central element in the development of urban infrastructure. It is important that as the main principle of urban regeneration, the authors note "it should be better than before", which includes energy efficiency, use of renewable energy sources, etc. [26]. The main sources of financing are international aid, reparations, the state budget and private investments. It also emphasizes the need for transparent funding mechanisms that will avoid delays and ensure effective use of funds. Thus, the post-war recovery of Ukrainian cities is seen as an opportunity for a systematic rethinking of urban approaches. "Green reconstruction" not only complies with the European principles of sustainable development, but also contributes to building a sustainable future for the country [36].

The study of Pidorycheva, I., examines the post-war recovery of Europe. This is an experience for the implementation of the applied policy in Ukraine. In particular, the study examines France's post-World War II modernization plans, including the Monnet Plan and the Marshall Plan, emphasizing the need for integration between existing government organizations, businesses, and the public. These programs served as the basis for the forma-

tion of qualitatively new forms of cooperation in the reconstruction of cities and villages, which can be adapted in Ukraine in the conditions of post-war reconstruction. The author emphasizes that the reconstruction of cities should be based on the creation of an innovative industrial economy, excluding the reproduction of the agrarian and raw material model that existed before the war. This means the need to transition from an agrarian economy to Industry 4.0, with an emphasis on technological and digital solutions for the modernization of industry and infrastructure, which includes housing policy and the development of social infrastructure. In particular, the experience of France shows that the implementation of recovery plans can be delayed or not implemented at all without strong management control and support from the state [34].

Aiginger, K., & Moskalenko, O. analyzed the post-war reconstruction of cities and urban agglomerations in the context of Ukraine after the war. In particular, the proposals for a new Marshall Plan focus on rebuilding infrastructure, including roads, bridges, railroads, housing, and social facilities such as schools and hospitals. However, recovery should be based not only on physical needs, but also take into account socio-economic aspects, such as previous GDP growth and pre-war poverty levels [2]. The authors also point out that the demographic aspect is crucial for recovery planning, as strategies must be adapted to the new demographic system. Undoubtedly, the process of post-war urban reconstruction in Ukraine requires a comprehensive, strategic approach that takes into account economic, social and environmental aspects, including significant international support and involvement of the local community to achieve success [2].

In another study, Faraponov V. conducts an analysis of the Marshall Plan in terms of the evolution of US assistance [13]. The author examines the development of this policy from the middle of the 19th century to the present, highlighting the transition from technical to complex economic and political programs. This approach allows for a better understanding of the genesis and changes in the administrative goals of aid, as well as its role in the formation of international relations. This study offers a new perspective on the experience of implementing the Marshall Plan for the military recovery of Ukraine. The author emphasizes the parallels between historical experience and contemporary challenges, emphasizing the importance of strategic planning, intergovernmental coordination, and long-term perspectives in the implementation of the aid program.

In the article Duka A. and others, the post-war reconstruction experience of Germany, Japan, South Korea, Bosnia and Herzegovina, and Singapore is

systematized. It is proposed to understand the experience of these countries for the purpose of implementation in Ukraine [9]. The authors emphasize that the success of recovery depends on the correct choice of strategic directions, which form the basis for long-term positive changes. Research emphasizes the systematization of the positive experience of exiting the crisis, paying attention not only to the reproduction of what was lost, but also to the provision of social, economic and political development. Among the key areas emphasized by the authors, for the successful restoration of countries, cities and urban agglomerations, it is worth noting: anti-corruption measures, because the fight against corruption is presented as a basis for the effective use of resources; prioritization of innovations, in particular, through the concentration of limited financial resources on education, scientific research and the latest technologies; appropriate tax regulation, in particular, the implementation of effective tax management mechanisms to stimulate economic growth.

A series of semi-structured, in-depth interviews with participants in the reconstruction process in Ukraine is given in the study by Dulko, I. The author analyzes the key role of post-war physical reconstruction for national economic development and rehabilitation. The concepts of urbicide and ecocide are also introduced to study the spatial context of the destructive impact of military actions on the state of Ukrainian cities [10].

Mezentsev, K., Mezentsev, O.'s research is devoted to the issue of urbicide, that is, the deliberate destruction of cities, in the context of the ongoing war in Ukraine. The main focus is on new forms of urbicide that arise as a result of military operations and the impact of this process on the post-war reconstruction of cities and urban agglomerations. The study includes various aspects such as changes in urban infrastructure; the terrible state of the occupied cities; social and economic factors; which influence migration processes and intentions of internally displaced persons (IDPs). In the article, the author singles out three key aspects of urbicide, which are important for post-war reconstruction. In particular, direct urbicide, which includes violent acts, planned destruction of urban infrastructure; indirect urbicide, manifested through the destruction of social ties; disintegration of communities and management strategies. The authors emphasize that the reconstruction of cities after urbicide should include the development of a recovery strategy that takes into account the needs of IDPs and local communities; the integration of new technologies and approaches to city management, which can contribute to the restoration of social ties and communications; creation of inclusive policies to prevent new forms of urbicide, for example through control of

construction and social infrastructure [24].

Our previous research examined the challenges caused by the war in Ukraine and the possibilities of reusing military brownfields, considering their potential to contribute to the social, economic and environmental post-war reconstruction (development) of Ukraine [32]. Given that the Russian war in Ukraine has significantly increased the number, spatial scale, and concentration of brownfields, the key characteristics of four generations of brownfield transformations in Ukrainian cities under the challenges of war have been identified [25]. An approach for monitoring urban areas affected by military influence is presented. Its application to Kharkiv, which suffered from hostilities caused by Russian aggression, is demonstrated [17]. We also analyzed the experience of European countries for the post-war recovery of Ukraine, in particular the cases of Germany, Poland, Croatia, Albania, Kosovo, etc. Although the destruction after World War II was larger in area, newer and more powerful weapons were used in the territory of the former Yugoslavia [19].

Therefore, a significant number of thorough scientific works have been devoted to the issue of post-war reconstruction of cities, urban agglomerations, regions and countries of the world, including Ukraine. Some of them reveal the possibilities of implementation of successful world and European practices, a number of previously unresolved parts of the general problem remain. In particular, in our opinion, it is necessary to develop a scientifically based flexible recovery model based on the concept of sustainable development and its components: economic, social and environmental. This would allow combining the best practices of recovery and development, and be adaptive to modern realities. The need for post-war reconstruction of the territory of Ukraine is undeniable. For effective implementation, the recovery strategy should be aimed at the development of cities and urban agglomerations. However, the development of the program for the recovery and development of Ukraine, its cities and regions based on the best European and world practices is an urgent need right now. Since, for its successful implementation, it is necessary to involve a wide range of specialists of various subject areas, discussion with the public and agreement at various hierarchical levels of power. Therefore, it is urgent to develop an effective recovery model based on the concept of sustainable development. Such a model would be comprehensive and adaptive for cities and urban agglomerations that have experienced various levels and types of destruction. The development of the program is an extremely difficult task, because the war continues, and it is impossible to predict the level of further destructive influence on the cities

and urban agglomerations of our country. It is also impossible to assess the real level of destruction in the temporarily occupied territories due to the lack of access there by independent specialists of international organizations. Unfortunately, the Ukrainian Recovery Plan proposed in 2022 [29], could not take into account the devastating consequences of Russian aggression that took place in 2023 and 2024, such as the blowing up of the Kakhovskaya HPP, the destruction of Ukraine's energy system, etc. [8]. Also, given the fact that cities and urban agglomerations are the main drivers of economic, social, cultural and innovative development, in our opinion, an important task is the development of a recovery and development model that could be an element of the recovery program and would contribute to the rapid recovery due to influence on potential and existing "growth points" - cities and urban agglomerations.

The purpose of this study is to identify the key characteristics of the war's consequences, as well as the challenges and prospects for post-war recovery in Ukraine's urban agglomerations, incorporating successful global practices and aligning with the goals of sustainable development. The research employs a variety of approaches and methods, including systemic and synergistic approaches, which account for the unique characteristics of urban agglomerations, and a socio-geographical approach, which provides a comprehensive analysis. The study also utilizes content analysis to examine literary sources, concepts, and development plans, as well as the method of analogy to adapt recovery and development programs and strategies. Additionally, quantitative and qualitative assessment methods are applied to evaluate the extent of destruction.

The main material. The war in Ukraine is the largest conflict in Europe since the Second World War. The enemy employs powerful weapons with highly destructive and devastating effects. As a result, the consequences for Ukraine are unprecedented in scale and devastation. However, post-war recovery has become a critical and timely task for Ukraine. Its planning and implementation must begin immediately. The experience of European countries in rebuilding their territories and economies after the Second World War serves as an invaluable and important resource in this context [6, 43]. At the beginning of the war, a theory like the Marshall Plan for Ukraine was quite common, based on the experience of European countries that actually "rose from the ashes." In July 2022, the Recovery Plan of Ukraine was presented in the city of Lugano (Switzerland) as part of the "Ukraine Recovery Conference" [29]. However, since that time, Ukraine has suffered even greater destruction (in particular, in the field of energy infrastructure). This deepened the

crisis, and requires more global actions for recovery with their rapid implementation. Also, the experience of restoring European countries after the armed conflicts of the 1990s is useful for Ukraine.

The war in Ukraine has been going on for over 10 years, which is unprecedented for Europe in the 21st century. During this time, the occupying forces caused, in many respects, devastating and irreparable losses to our country. This is a concentrated destructive effect on the main components of the socio-geosystem – Society, Economy, and Nature, and the connections between them, specifically [31, 32]:

- *impact on society*: the appearance of forced migrants (since 2014, from the occupied territories, as a result of hostilities, there are people who have been forced migrants several times over the years, because they chose for life the territory close to home, which over time the occupiers chose) for a new goal), many people have gone abroad and have already adapted there, and are not planning to return; they are also dead soldiers and civilians, including children;

- *impact on the economy*: forced "deindustrialization": industrial enterprises of Donetsk, Kharkiv, Dnipropetrovsk, Zaporizhzhya and other frontline regions of Ukraine were destroyed and disabled. These enterprises mostly formed the GDP of the country in the pre-war period [16]. Considering the proximity to the front line, restoring the integrity of these enterprises in modern conditions is practically impossible. The destruction of energy capacities: Kakhovska HPP and Dnipro HPP, Trypilska TPP, and many others – had an irreparable impact on the energy system of Ukraine, hindering not only generation (as of the summer of 2024, only 5% of the former generating capacities have been preserved), but also energy transmission. This, accordingly, causes an increase in the price of not only the cost of electricity, but also, as a result, of almost all goods and services, because electricity is an important factor in pricing. Due to shelling and mine danger, there are problems with the development of the agro-industrial complex. Fields are burning, farmers are being blown up almost daily in the frontline regions while cultivating the fields, enemy rockets are destroying terminals with harvested grain;

- *impact on nature* – mine danger and constant forest fires, fires in the fields. Destruction of the Kakhovskaya HPP dam is ecocide. Destruction of ecosystems, as bombing, artillery shelling and ground fighting lead to the destruction of trees, vegetation and animal life. The rivers and lakes of the frontline regions are full of unexploded shells, dangerous for both people and animals. The loss of flora and fauna is irreparable, because the chances of escape from fires after shelling are minimal. Some species, having lost their natural range of exi-

stence, are doomed to perish.

Currently, due to military operations, a significant area of the territory of Ukraine can be classified as "brownfields". In our research, special attention is paid to brownfields of cities (urban agglomerations) of Ukraine, which are post-war brownfields as a result of military operations. They can be very small areas in mixed urban or rural areas, or large military complexes, public places, industrial facilities, airports, etc., which arose as a result of military operations in large cities and agglomerations [32]. Today, Post-war brownfields in Ukraine are territories that were formed as a result of shelling and military attacks in central areas, on the outskirts of the city, in historical areas, in traditional industrial areas, in the metropolis and in the countryside. The full-scale war in Ukraine led to significant destruction and unprecedented consequences, creating new types of brownfields. Which, among other things, also contain social consequences and memory [32] that remains in the landscape and must be taken into account both physically, regarding the reconstruction of the remains, and psychologically, in the light of rethinking and re-evaluating the heritage [45], search for new meanings, formation of collective memory including "places of pain and shame" and pride at the same time [25]. When discussing post-war reconstruction, the main question is whether the abandoned territories will remain deserted for an extended period or whether the conflict will escalate without a clear resolution. Therefore, determining the best approach to address these challenges is crucial [11].

In the State Regional Development Strategy for 2021-2027 (with changes introduced in accordance with the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 940 of 13.08.2024), it is clearly defined that "...measures for the implementation of state regional policy are aimed at restoring infrastructure, economic activity, public services and the balance of ecosystems, creating safe conditions for the return of internally displaced persons to the regions, creating favorable conditions for the activities of all business entities on the restoration of territories, support and effective use of the potential of territories with special conditions for development, expansion of the positive influence of regional poles, growth (urban agglomerations, cities) and territories of sustainable development, which contributes to the reduction of disparities in the development of territorial communities and the quality of human life" [15]. Therefore, in this regulatory document, urban agglomerations are recognized as "poles of growth" and areas of sustainable development. Also, the strategic goal is "Formation of a united state in social, humanitarian, economic, climatic, ecological, security and spatial dimensions." In the aspect of

operational goal No. 1 "Ensuring the integrated development of territories taking into account the interests of future generations", the task, in accordance with the direction "Stimulation of the development of territories", is defined as "Creating a legislative basis for the functioning and development of agglomerations, ensuring balanced spatial development of the territories that are part of them" [15]. In fact, this document is one of the first to declare the importance of restoring and stimulating the development of urban agglomerations. According to the State Strategy, urban agglomerations are defined as Kyiv, Kharkiv, Dnipro-Kamyanske, Zaporizhzhya, Kryvorizka, Odesa and Lviv [15].

The Russian war in Ukraine significantly increased the number, concentration and spatial scale of brownfields. In addition to all existing problems, there are challenges associated with the massive destruction of industrial zones in cities and the forced relocation of industrial facilities. Therefore, Ukrainian cities face the task of finding effective post-war strategies both for brownfields in cities and agglomerations that are directly bombarded and destroyed, as well as temporarily occupied, that is, that directly and indirectly experience urbicide [25].

Among the most affected agglomerations, Kharkiv, Dnipro-Kamyanske, and Odesa stand out, as they have faced, and continue to face, frequent and devastating attacks. Overall, large-scale assaults have impacted nine regions of Ukraine, with the majority of attacks concentrated in the East and South. This reflects the aggressor's strategic focus on densely populated and industrially developed areas. The shelling has targeted residential buildings, railway stations, shopping centers, and other infrastructure facilities, demonstrating the indiscriminate nature of the aggression. The social impact of Russian attacks on cities and urban agglomerations has been profound. Some of the deadliest incidents include the strikes on the Kharkiv Regional Administration, the Mykolaiv Regional Administration, the railway station in Kramatorsk, the market in Kostyantynivka, the shopping center in Kremenchuk, and the city centers of Vinnytsia, Chernihiv, and Zaporizhia. Residential buildings in cities like Dnipro and Lviv have also suffered severe damage. Almost every attack has resulted in civilian casualties, leaving a lasting impact on local communities and sparking widespread public outrage. The destruction of critical infrastructure has led to enormous economic losses. Attacks on logistics facilities, such as the "Nova Poshta" terminals in Kharkiv and Odesa, have caused significant casualties and economic damage. The total economic losses from these attacks are estimated to exceed \$6 billion. In addition, large-scale ecocide has had long-term environmental consequences. For instance, the spill of

3,800 tons of oil products in Kharkiv has severely impacted the environment. The destruction of the Kakhovska HPP caused extensive flooding, disrupted ecosystems, and destroyed agricultural land. The majority of these mass attacks have been aimed at destroying critical infrastructure, including energy, transport, logistics hubs, and residential buildings, posing substantial challenges for future recovery efforts.

The consequences of the most large-scale shelling prove the vulnerability of urban areas to military threats. Cities that can exist for hundreds or even thousands of years are subjected to systematic destructive effects, and are not always able to recover in a short period of time due to lack of resources. For example, the majority of historical and cultural monuments cannot be restored in case of significant damage. It is also necessary to take into account the fact that it is currently impossible to calculate the number of victims in the temporarily occupied territories. Obviously, an important and urgent issue is the rapid recovery of the affected areas, in particular, the cities and urban agglomerations there. Let's consider the cases of cities and urban agglomerations of countries in Europe and the world, which have experience of effective post-war recovery (table 1).

Military actions have caused significant destruction to infrastructure, industry, and housing stock in many countries across Europe and the world. Some cities and urban agglomerations that became epicenters of fighting were almost completely destroyed. For instance, Berlin, Warsaw, Hiroshima, and Seoul lay in ruins after the war, necessitating comprehensive reconstruction efforts to ensure rapid recovery while preserving the authenticity of each city and incorporating modern architectural solutions. The consequences of using advanced weapons, such as the atomic bombs in Japan that annihilated Hiroshima and Nagasaki, or the massive bombing campaigns on major European cities, were particularly devastating. Notably, during the Second World War, Germany and Japan, despite being the aggressor nations, received substantial international support for their recovery.

Both countries became primary recipients of funds under the Marshall Plan, enabling the rapid restoration of industry and modernization of infrastructure. Similarly, international aid organized by the United States and the United Nations had a transformative impact on South Korea. In the cases of Bosnia and Kosovo, international organizations not only provided financial assistance but also took an active role in managing and supervising the reconstruction of these territories. A key focus of post-war reconstruction in countries like Poland, Japan, and South Korea was the restoration and modernization of industry. Large-scale industrialization pro-

grams were implemented, aimed at establishing new industrial enterprises, developing heavy industry, and improving transport infrastructure. Additionally, land reforms in Japan and South Korea played a critical role in the effective redistribution of resources, creating a solid foundation for future economic growth.

The restoration of critical infrastructure, namely transport networks and energy facilities, has become a priority in the support of many countries of the world, in particular in France, Croatia, Bosnia and Serbia. Considerable attention was paid to the restoration of roads, bridges, railways and water supply systems. Such projects not only ensured the restoration of cities and urban agglomerations due to the restoration of destroyed connections, but also created new jobs, which contributed to economic stabilization.

Israel, for example, in addition to the intensive development of industry, agricultural technologies and medicine, focused on the integration of refugees and displaced persons due to the creation of new settlements and ensuring their social support. Such an approach made it possible to avoid social tension and laid the foundation for stable demographic growth. Successful educational and medical reforms implemented in Japan and South Korea significantly improved the quality of life of the population and ensured the training of qualified personnel for further recovery.

Reforms aimed at political stability also played a significant role in post-war recovery. In Croatia and Albania, aspirations to join the European Union spurred the modernization of public administration and the economy. In Bosnia and Kosovo, stabilization was facilitated by establishing new democratic institutions with international community support. Regional development policies, particularly in France, ensured balanced national growth and prevented economic disparities between regions. Additionally, adopting anti-corruption legislation and mitigating corruption risks were crucial steps for many of these countries.

Countries that have invested in large-scale reforms and adopted a systematic approach to recovery, such as Germany, Japan, and South Korea, have achieved significant economic breakthroughs. In contrast, other nations, like Kosovo and Serbia, remain dependent on foreign aid and exhibit slower recovery rates. However, such evaluations must consider the pre-war development levels of these countries. The post-war reconstruction of cities and urban agglomerations necessitates a comprehensive approach that integrates international financial support, social reforms, industrial modernization, and political stability. Investments in infrastructure, education, and healthcare, coupled with effective mana-

Table 1

Cases of European and world countries in post-war recovery
(created by the authors based on [20, 21, 38, 46])

Country / duration of hostilities	Hostilities / destruction	The most destroyed cities	Actions to overcome destruction	Result
Germany <i>World War II</i> (1939–1945), 6 years	After the end of World War II, Germany was in ruins. Infrastructure, industry and the housing stock suffered significant destruction.	Berlin – bombing, battle for Berlin in 1945. Dresden – almost completely destroyed during the bombing in February 1945. Hamburg – large-scale destruction due to air raids (Operation "Gomorrha", 1943). Cologne – 90% destroyed by bombing. Nuremberg – suffered from bombing and fighting at the end of the war.	Germany became a major recipient of Marshall Plan aid and received significant financial resources to rebuild industry and infrastructure. Reforms were implemented in the social security system, which included social benefits, health insurance and support for the unemployed.	In a few years, the German economy not only recovered, but also showed significant growth. This recovery became the basis for the "economic miracle" of the 1950s.
Poland <i>World War II</i> (1939–1945), 6 years old	After the war, Poland suffered significant destruction, especially in infrastructure and industry.	Warsaw – almost completely destroyed during the Warsaw Uprising (1944) and the German occupation; Gdansk was the scene of hostilities at the beginning of the war; Wroclaw – destroyed during the fighting between German and Soviet troops; Krakow – avoided mass destruction, but suffered from the German occupation.	Poland chose the path of industrialization. An industrialization plan was implemented. It included the construction of new factories, the development of heavy industry and the modernization of transport. A land reform was carried out, which provided for the redistribution of land among the peasants and investments in agriculture.	Poland was able to rebuild its industrial base and provide jobs for a significant number of the population. Poland has become one of the leading agricultural countries in the region.
France <i>World War II</i> (1939–1945), 6 years	After World War II, France was in ruins, with its infrastructure and economy badly damaged. The war created an imbalance in the development of different regions of France.	Paris – partially damaged during the war, but avoided large-scale destruction. Verdun is almost completely destroyed. Caen – seriously injured during the Allied landings in Normandy (1944). Le Havre – destroyed by 80% during the bombing in 1944. Saint-Nazaire – bombing and blockade during the Second World War.	"Plan Monet" was launched for France. The Monet Plan was designed to revive the French economy through industrial and infrastructure modernization. New factories were created, the transport system and energy infrastructure were updated. The policy of regional development was implemented. It envisaged investments in backward regions, infrastructure development and creation of new jobs.	France was able to quickly restore the economy and ensure stable economic development in the post-war period. The policy of transition to a polycentric model contributed to the even development of the country and improvement of living conditions in various regions.
Japan <i>World War II</i> (1937–1945), 8 years	Japan suffered large-scale destruction due to intensive bombing of cities. It was here use of atomic bombs. More than 2.5 million soldiers and civilians died.	Hiroshima was almost completely destroyed by an atomic bomb on August 6, 1945. Nagasaki – the city suffered an atomic attack on August 9, 1945. Tokyo – more than 50% of the city was destroyed during massive bombings (in particular, the bombing of March 10, 1945). Osaka – significant destruction of industrial facilities and residential areas. Yokohama – suffered heavily from air attacks due to its port and industrial facilities.	For some time, Japan was under the control of the Allied forces, led by the United States. Subsequently, it transitioned to democracy. A program of economic support was implemented, in particular at the expense of the Marshall Plan. Infrastructure was restored and military spending was reduced. The main resources are aimed at economic development. Land, industrial and educational reform has been implemented, and a major role has been given to modernization and innovation based on the creation of new technologies in cooperation with foreign partners.	The result of recovery is an economic boom. Today, Japan has become the second largest economy in the world. Japan is a stable democratic country with a developed economy, high standard of living and technological innovation made possible by effective post-war reconstruction.

Country / duration of hostilities	Hostilities / destruction	The most destroyed cities	Actions to overcome destruction	Result
Israel <i>The first Arab-Israeli war (1948-1949), 1 year.</i> <i>The hostilities are periodically renewed.</i>	During the fighting, Israel faced numerous attacks that resulted in great destruction. Despite the military victory, the war left the country with a large number of civilian casualties, massive destruction of cities and infrastructure, and a significant influx of refugees.	Jerusalem – one of the most affected cities. Jerusalem was divided into Arab and Jewish parts, which were subjected to intense shelling, especially the old city and important strategic objects. Jaffa (now part of Tel Aviv) – suffered serious destruction during the fighting. After Israel's victory, the city was evacuated by the Arab population, and a large part of it was destroyed. Akko – during the war, the city was destroyed. Tel Aviv – the city was under constant shelling, which created significant difficulties for the civilian population.	After the war, programs were organized in the country to settle new territories and build residential areas for refugees. Foreign aid and investments were actively involved, in particular from the diaspora. The country's government has initiated reforms in agriculture and industry to ensure food security. Programs for refugees provided for their integration into society through the creation of new settlements and providing them with the necessary support. At the same time, the government actively worked to restore industry and infrastructure, including transport, energy networks and water supply.	The country was able to provide social stability by integrating new immigrants and refugees, which led to a significant increase in population. The level of education and health care has improved significantly, which has made it possible to ensure general progress in the social sphere. Israel has become a stable and prosperous state that plays an important role in the region and the world.
South Korea <i>Korean War (1950-1953), 4 years</i>	Large-scale hostilities occurred in the country, including bombings, artillery barrages, tank battles, and air attacks. South Korea experienced massive devastation, with its infrastructure, industry, transport networks, and housing stock almost completely destroyed.	Seoul - the capital, was captured and several times passed under the power of rivals, which led to the almost complete destruction of the city. Incheon - seriously damaged during the landing of Allied troops (Battle of Incheon, 1950). Busan - Although the city remained under South Korean control, it was overwhelmed by refugees and suffered from bombings. Daegu – significant destruction due to its strategic importance as a transport hub.	The United States provided more than \$3 billion in technical and economic support programs, other countries and the UN participated in financing humanitarian projects. Emphasis was placed on the reconstruction of the transport network (roads, bridges, railways) and the reconstruction of the housing stock, hospitals and schools. Land reform and stimulation of industrial development took place. Powerful anti-corruption measures were implemented, the government was reformed.	By the 1980s, the country had become an "Asian economic tiger", known for industrial giants such as Samsung, Hyundai, LG, etc. Mass urbanization took place and the standard of living of the population improved significantly. Currently, South Korea is the world's leading economy, technological leader and democratic state.
Bosnia and Herzegovina <i>Bosnian War (1992-1995), 4 years</i>	After the war of 1992-1995, Bosnia and Herzegovina was left in ruins, with great human losses and destroyed infrastructure.	Sarajevo – a long siege (1992-1995), significant destruction of infrastructure and numerous victims. Mostar – seriously damaged during the fighting, the famous Old Bridge was destroyed. Srebrenica is a place of genocide during the Bosnian war.	In 1995, the Dayton Agreements were signed. They put an end to the war. International organizations were created to monitor and assist in recovery. Economic reforms aimed at privatization, development of small and medium-sized businesses and attraction of foreign investments were implemented.	Attracting significant international resources and financial aid made it possible to restore basic infrastructure and stabilize the political situation. The recovery of the economy contributed to the increase in the standard of living of the population.

Country / duration of hostilities	Hostilities / destruction	The most destroyed cities	Actions to overcome destruction	Result
Kosovo <i>War in Kosovo (1998–1999), 2 years</i>	After the 1998-1999 war, Kosovo faced serious security and reconstruction challenges.	Pristina – destruction during the war (1998–1999), significant losses of infrastructure. Pec was seriously affected by ethnic cleansing and armed clashes. Djakovica – significant destruction during the war in Kosovo.	UN Resolution 1244 established the UN Interim Administration in Kosovo (UNMIK). It exercised control over the region and provided international aid. A new legal framework was created, local authorities were restored, and democratic elections were held.	Basic infrastructure was restored, including electricity, water and roads. Kosovo has begun the transition to democratic development.
Croatia <i>Croatian War of Independence (1991–1995), 5 years</i>	After the 1991-1995 war, Croatia needed significant efforts to restore and stabilize the political and economic situation.	Vukovar is almost completely destroyed during the siege (1991), a symbol of the Croatian War of Independence. Dubrovnik – shelling and destruction of the historic center during the war. Zagreb – suffered from rocket attacks.	The Croatian government has focused on reforms necessary for integration into the European Union. This included reforms in the sphere of rule of law, economy and public administration. Much attention was paid to the restoration and development of the tourism industry, which was one of the key factors for the country's economy.	In 2013, Croatia became a member of the EU, which contributed to economic growth, political stability and improved infrastructure, and Croatia regained its tourist attractiveness.
Serbia <i>Yugoslav wars (1991–1999), 9 years</i>	After the conflicts of the 1990s, Serbia faced an economic crisis and a destroyed infrastructure.	Belgrade was repeatedly bombed. Niš – suffered from bombings Novi Sad – destroyed bridges and infrastructure facilities.	International aid was involved, in particular from the EU, to restore infrastructure, modernize transport and energy.	The main infrastructure facilities were gradually restored and the economic situation stabilized.
Albania <i>Kosovo conflict (1998–1999), 2 years</i>	Albania faced internal instability and economic crisis after the end of the communist regime and the events of the 1990s.	Tirana – was not physically affected, but was overwhelmed by the humanitarian crisis, with more than 400,000 Kosovar Albanians seeking refuge in Albania. Kukes became a point for refugees, military operations on the border and artillery shelling by the Serbian army affected the outskirts of the city. Tropoja – military actions on the border and artillery shelling by the Serbian army affected the outskirts of the city.	A number of economic and political reforms aimed at stabilizing the country, developing democracy and a market economy were carried out. Much attention was paid to the development of transport infrastructure, the energy sector and telecommunications.	Albania has made significant progress in democratic development and economic growth, which has contributed to NATO integration and the start of EU accession negotiations.

gement of reconstruction processes, are essential for sustainable development and long-term economic growth. The successful experiences of countries that have rebuilt «better than before» should serve as a valuable model for Ukraine's post-war recovery efforts.

Therefore, the post-war recovery of Ukraine, its cities, urban agglomerations and regions requires a comprehensive approach. It should include reconstruction of infrastructure, social integration, restoration of human potential and, modernization of the economy and regional development. Many cities and urban agglomerations have to change and expand the performed functions, taking into account the loss of traditional (such as industrial, in particular) and the acquisition of new ones: innovative, creative, etc. Based on the analysis of historical examples, several key recovery models can be proposed, which can be adapted for modern conditions and combined with each other:

- *programmatic reconstruction of infrastructure and economy* – the model was developed based on the cases of Germany, Japan and France after the Second World War. Their success is based on large-scale investments in the restoration of transport, energy and housing infrastructure. Governments coordinated international aid (including the Marshall Plan) and introduced reforms to stimulate economic growth. This approach made it possible not only to restore the destroyed territories, but also to lay the foundation for the future economic "miracle".
- *industrialization and modernization* – a model formed on the basis of the experience of Poland and South Korea, whose effective recovery is based on the development of industry and the introduction of modern technologies. Poland focused on industrialization, developing heavy industry and modernizing transport. South Korea, in turn, has become one of the "Asian economic tigers" thanks to the support of innovation and the formation of industrial giants such as Samsung and Hyundai.
- *decentralization and regional development* – France after the war introduced a policy of regional development, investing in less developed regions. This contributed to the steady economic growth of the country and the improvement of the quality of life of the population. Such an approach can be useful for reducing the socio-economic disparity between cities and urban agglomerations of different regions.
- *attraction of international aid and integration into international organizations*. In particular, Bosnia and Herzegovina, Kosovo and Serbia have successfully used international programs to restore infrastructure. International organiza-

tions provided financial support, contributed to the reconstruction of transport networks, electricity supply and other key sectors of the economy. This approach makes it possible to compensate for the lack of own resources. After the military conflicts, Croatia and Albania carried out deep reforms with the aim of joining the European Union and NATO. This gave them access to international funds, stabilized the political situation and accelerated economic development. Integration into international organizations creates investor confidence and opens up new opportunities for post-war recovery, growth and development.

The restoration of Ukraine's cities, urban agglomerations, and regions should incorporate the three pillars of sustainable development: economic, social, and environmental. Research on the sustainable brownfields' redevelopment includes integrated approaches to environmental, spatial and urban planning in the configuration of relevant policies and strategies [28]. The economic, environmental and social aspects of the problem of brownfields involve working with the different interests of various stakeholders [33]. As sustainable development remains a fundamental objective of the EU, specific sustainable development policies should be incorporated into development practices that preserve and protect, minimizing the negative impact of brownfields areas within urban communities [28]. Realization of the regeneration potential for the sustainable development of the city, has a clear and understandable methodology and parameters, including a whole sustainable development for pollution management and reuse rationale and content; management of existing buildings and infrastructure; land use and urban planning in built-up areas; processes and methods of planning citizen participation; management of brownfield projects [33]. Implementation of the principles of sustainable development for the restoration of cities and agglomerations involves: balancing and integration of social, economic and ecological components of the community; meeting the needs of existing and future generations; respect for the needs of other communities in the region and at the international level [32]. For the effective implementation of measures for the restoration and development of cities and urban agglomerations, based on the concept of sustainable development, the consistency between its three components: ecological, social and ecological, their parity and harmonious combination is extremely important. It is necessary to determine the needs and challenges of recovery and development of cities and urban agglomerations of Ukraine in accordance with the 17 goals of sustainable development (table 2).

Table 2

Needs and challenges of restoration and development of cities and urban agglomerations of Ukraine in accordance with the 17 goals of sustainable development (created by the authors based on the data [40])

Sustainable Development Goals	Relevance for Ukraine	Actions required	Implementation for Ukraine	Result
1. No Poverty	The war led to a large-scale loss of income for millions of Ukrainians, especially in the most affected regions.	To provide targeted assistance to the victims, in particular to displaced persons and vulnerable sections of the population. Implement programs for employment and small business support.	The creation of state programs for the retraining of the population, especially for forced migrants, the introduction of social aid packages for vulnerable groups, financed from the state budget and at the expense of international aid. Special attention should be paid to settlements that have been destroyed and local residents have lost their jobs.	Reduction of the poverty level, stabilization of population incomes, integration of internally displaced persons into host communities.
2. Zero hunger	Agricultural infrastructure is destroyed, large areas of agricultural land are contaminated with mines, which threatens food security.	Invest in the agricultural sector, restore agricultural production in the affected areas. Provide humanitarian aid and food security.	De-occupation of territories and demining of agricultural lands. Restoration of the agro-industrial complex thanks to state support programs and subsidies.	Creation of food hubs to provide the population with food, export of necessary products.
3. Good health and well-being	The medical infrastructure, especially in the frontline areas, needs to be restored.	Reconstruct hospitals, implement psychosocial support and rehabilitation programs for war victims.	Reconstruction of destroyed hospitals and creation of mobile medical teams in hard-to-reach areas. Organization of psychological rehabilitation of military personnel and the injured population. Creation of rehabilitation centers for veterans and civilians.	Improving the population's access to medical services, restoring the psychological health of the affected population.
4. Quality education	Destroyed schools and universities limited the population's access to educational services.	Restore schools and universities, provide digital infrastructure for distance learning. Implement personnel training programs for regional recovery.	Restoration of educational institutions using modern technologies. Expansion of distance learning programs. Programs for children of immigrants from temporarily occupied territories.	Increasing the level of education and training of specialists capable of ensuring the recovery of the country.
5. Gender equality	Women in Ukraine, like men, are actively involved in defense and volunteer initiatives.	To implement social adaptation programs for resettled women and military women. Stimulate the participation of women in local self-government.	Introduction of special grants for women entrepreneurs in affected regions. Develop support programs for female veterans. Support for women who lost breadwinners due to the war.	Equal access to recovery opportunities for women and men.
6. Clean water and sanitation	The hostilities disrupted access to water supply in many regions of Ukraine.	Restore water supply and drainage in destroyed cities, implement water purification projects.	Restoration of centralized water systems. Implementation of programs to clean water bodies from the consequences of hostilities.	Guarantee of access to clean water and sanitation for the entire population of Ukraine.
7. Affordable and clean energy	The energy infrastructure has become the main target for enemy attacks and has	Create renewable energy capacities (solar, wind stations). Replacement of destroyed energy	Installation of distributed solar and wind power plants. Restoration of power systems using attack-resistant technologies, system modularity.	Reduction of dependence on fossil energy sources, energy security.

	actually been destroyed, Ukraine is dependent on energy exports.	facilities with environmentally friendly technologies.		
8. Decent work and economic growth	Millions of Ukrainians lost their jobs, particularly in the most affected industrial regions of the country.	Stimulate the development of small and medium-sized businesses through tax incentives, grants and loans. Invest in industrial parks.	Creation of industrial parks in affected regions. Tax incentives for businesses that create jobs. Restoration of the country's industrial potential.	Job creation, economic revival.
9. Industry, Innovation, Technology and Infrastructure	Ukraine's critical infrastructure is heavily damaged, particularly the transport system.	Restore transport, communication and digital infrastructures. To implement innovative solutions in urban planning.	Integration of Ukraine into the European transport system. Construction of modern highways and railways.	Infrastructure that is resistant to future challenges and integrated into the European transport system.
10. Reduced inequality	The development gap between the country's regions has widened as a result of hostilities.	Ensure access to renewable resources for all regions, especially rural and small towns.	Investments in the development of affected areas. Ensuring equal access of the country's population to resources and services.	Ensuring comprehensive development of regions.
11. Sustainable cities and communities	The reconstruction of cities must take into account the risks of future conflicts, the rebuilt cities must be technological, protected and safe.	Develop a polycentric model of recovery, with an emphasis on the development of regional centers. To implement green technologies in urban regeneration.	Creation of "smart cities" with bomb shelters and modern defense systems. Decentralization policy to strengthen local self-government.	Sustainable cities with a high quality of life of the population and a high level of safety and protection of the population.
12. Responsible consumption and production	Necessity of supporting domestic production, introduction of circular economy in Ukraine.	Implement construction waste processing projects. Promote environmentally friendly production methods.	Processing of construction waste, which was formed as a result of destruction, and its reuse in construction, implementation of environmental initiatives.	Waste minimization, environmental sustainability.
13. Climate action	Identification of prolonged consequences of military operations in Ukraine	Implement adaptive measures to climate change, including emergency warning systems.	Decarbonization of the energy sector, development of an ecological transport system, expansion of green zones.	Protection of ecosystems, reduction of the carbon footprint.
14. Life below water	As a result of hostilities, the waters of the Azov and Black seas are polluted by mines, oil products, etc.	Cleaning of sea water areas, preservation of marine flora and fauna	Cleaning the water areas of the Black and Azov seas from mines and other waste.	Restoration of marine ecosystems, rehabilitation of marine flora and fauna
15. Life on land	A large number of Ukrainian ecosystems were destroyed as a result of ecocide.	Restoration of forests, reclamation of lands damaged by hostilities.	Reclamation of damaged lands, protection of forests,	Preservation of biodiversity, restoration of ecosystems.
16. Peace, justice and strong institutions	The need for enhanced protection and provision of security conditions for the population of Ukraine.	Develop local self-government, ensure the rule of law, promote transparency in recovery processes.	Creation of platforms for public participation in the planning and implementation of reconstruction projects, support for internally displaced persons and creation of equal conditions for all citizens in access to resources and development opportunities.	Stability and efficiency of state administration, ensuring equal access of citizens to resources and benefits.

17. Partnerships for the goals	Ukraine should attract international partners to speed up recovery.	Create partnerships with international organizations, the diaspora and business to implement recovery projects.	Agreements with the EU, USA, European countries and other countries of the world for the implementation of large infrastructure projects. Creation of a platform for sharing experiences of post-war reconstruction and development and attracting funding.	Coordinated efforts of the global community and sustainable recovery.

In order to ensure the sustainable economic development of affected cities and urban agglomerations, it is crucial to restore infrastructure. This includes the reconstruction of transport networks and their components, such as roads, bridges, and logistics points, as well as the restoration of destroyed energy facilities and utility systems. Such measures will lay the foundation for further economic development and improve population mobility and the transportation of goods. Another important direction is the diversification of the economy. To achieve this, it is necessary to support small and medium-sized businesses, which form the backbone of economic stability, develop high-tech sectors such as IT and the creative cluster, and stimulate the creation and implementation of start-ups. These efforts will help create new jobs and attract innovation for recovery and growth. An essential step is establishing industrial parks, which should serve as platforms for attracting international investments. The operation of these parks can enable the creation of modern enterprises in affected regions, facilitate the introduction of new technologies, and increase employment levels. Further integration with the European economy is also vital. This requires reconstructing and modernizing logistics hubs, such as ports, airports, and railway stations, to support the export of Ukrainian products and ensure integration into European supply chains. Providing tax benefits to enterprises operating in affected regions, along with grants to support local production, can also be effective incentives. These measures will boost economic activity and contribute to the development of local communities.

Integration of forced migrants into host communities, providing housing, and granting access to social services, as well as creating retraining and employment programs, are important tasks in the context of implementing the *social component* of sustainable development. This will allow displaced people to feel stable and engage in the economic recovery process. It is also essential to focus on the reconstruction of social infrastructure, including the restoration of schools, kindergartens, hospitals, and cultural institutions. Special attention should be given to the accessibility of these facilities for people with disabilities, which will help ensure equal opportunities for all segments of the population.

Another key aspect is psychosocial rehabilitation. For this, it is necessary to establish a network of psychological support and rehabilitation centers to assist veterans, individuals affected by the war, and their families in restoring mental balance and adapting to peaceful life. An important task in post-war reconstruction, as practice shows, is to strengthen local self-government by granting communities greater powers and resources to participate in reconstruction processes. This will foster decentralization, ensure effective resource management, and encourage active citizen involvement in decision-making. The restoration and preservation of cultural heritage must be guaranteed through the reconstruction of historical monuments and the implementation of programs aimed at restoring national identity. This will not only preserve the country's unique history but also promote social cohesion and enhance the cultural development of the population.

The transition to *ecologically sustainable development* of cities involves minimizing the impact on the environment and creating a comfortable environment for living. One of the main directions of its implementation is the implementation of "green" technologies in the urban space [13]. This includes the use of renewable energy sources such as solar and wind farms, especially when renovating energy systems to reduce dependence on fossil fuels. It is also necessary to organize the effective disposal and processing of construction waste generated as a result of the destruction, to open modern waste processing plants that would reduce the negative impact of waste on the environment and promote the reuse of resources [23]. Special attention should be paid to the development and expansion of green areas in the restoration process. The reconstruction of parks and the creation of new green spaces will help to reduce the consequences of urbicide, improve the microclimate of cities and provide citizens with places for recreation and health. It is necessary to systematically monitor the state of the environment based on the implementation of the environmental monitoring system. This will make it possible to monitor the state of air, water and soil, as well as to respond quickly to environmental challenges, in particular those that arise as a result of military operations and have a prolonged impact.

The post-war reconstruction of cities and ag-

glomerations of Ukraine on the basis of sustainable development can be represented through a combination of key components: cooperation between various stakeholders, including local communities, state bodies and private investors; availability of financial resources, international support and funding from governmental and non-governmental organizations, rational allocation of resources and strategic planning; application of the adaptive reuse approach. This will contribute to the restoration of territories, economic growth and development of communities, preservation of the history of the nation and the memory of the feat and heroism of Ukrainians in the struggle for the independence and sovereignty of the state [32]. In our opinion, given the subsidized nature of Ukraine's economy and significant dependence on international support, it is necessary to use all the mentioned models in a combined version, in accordance with available opportunities, taking into account the scale of destruction, available resources and strategic priorities. Based on the analysis, it is necessary for the cities and regions of Ukraine to:

- develop a detailed reconstruction plan with an emphasis on environmental friendliness and sustainable development;
- to attract international aid and investments for the implementation of projects of various scales and deadlines. To turn for help to sister cities of Europe and the world, which at one time also experienced destruction and recovery;
- to develop the production of goods and the sphere of services, to attract innovative technologies and world practices in order to obtain a competitive product;
- integrate displaced people through the creation of new jobs, the construction of residential complexes and the implementation of educational initiatives;
- carry out an assessment of the level of destruction, and invest in the restoration of potential "poles of growth" based on the Concept of sustainable development.

Conclusions and prospects for further research. The war in Ukraine has been ongoing for over ten years and represents the largest military conflict in Europe since World War II. It is characterized by acts of genocide, urbicide, and ecocide. Cities, villages, and regions – particularly urban agglomerations, which serve as centers of social, economic, and cultural life, as well as 'growth points' and centers of innovation driving Ukraine's

development – have been severely impacted by the destructive influence of military operations. An analysis of post-war reconstruction experiences in other countries demonstrates that successful restoration of damaged territories ("post-war brownfields") is achievable through a comprehensive approach. This approach must integrate the restoration of physical infrastructure, economic modernization, social reintegration, and environmental considerations. Holistic recovery of affected areas is only possible with the alignment of all components of sustainable development – social, economic, and environmental. Urban agglomerations remain the main drivers of development and should be prioritized in the recovery process, as they are "poles of growth" and centers of innovation. Their polarizing power can significantly accelerate and improve the rehabilitation of Ukraine's entire territory. Attracting international aid, including investments and grants, is crucial for the successful implementation of reconstruction programs. Equally important is social integration, which requires active participation from the public and local communities. Such involvement will enhance the effectiveness of recovery efforts and ensure sustainable results.

This work contributes to the scientific discourse on Ukraine's recovery in accordance with the Concept of Sustainable Development under conditions of uncertainty, particularly focusing on the rapid and effective restoration of cities and urban agglomerations. The authors' further research aims to test an adaptive model of urban agglomeration restoration that addresses modern challenges, including the processes of urbicide and ecocide, using the Kharkiv urban agglomeration as a case study, which suffered significant destruction during the war. In-depth research is also required to examine changes in the sex-age structure of the population and migration processes caused by the war to enable effective planning for future recovery. Additionally, assessing the economic impact of international recovery programs on regional development and the evolution of urban agglomerations is a key task for future studies. The greatest challenge in conducting scientific research in this area is the state of uncertainty, as the war continues and the scale of its destructive influence keeps increasing. Nevertheless, efforts to develop and adapt recovery programs and prospective development models remain crucial for Ukraine's future post-war recovery.

Reference

1. Abdulla, Z. R., & Hussein, S. H. (2022). *Experts' perspective towards smart management in the post-war reconstruction of the city of Mosul*. *Acta Scientiarum Polonorum. Administratio Locorum*, 21(3), 285–294. DOI: 10.31648/aspal.7520

2. Aiginger, K., & Moskalenko, O. (2022). Reconstructing Ukraine: How to design a Marshall Plan. *Research in Economics and Management*, 7(4), 26. https://www.wu.ac.at/fileadmin/wu/d/economics/Department_of_Economics/XX_NEWS/PDFs/Aiginger_Reconstructing_Ukraine.pdf
3. Al-Mosawy, S. K., Al-Jaberi, A. A., Alrobaee, T. R., & Al-Khafaji, A. S. (2021). Urban planning and reconstruction of cities post-wars by the approach of events and response images. *Civil Engineering Journal*, 7(11), 1836-1852 DOI:10.28991/cej-2021-03091763
4. Altrock, U. (2023). "Reconstructionism": A strategy to improve outdated attempts of modernist post-war planning? *Urban Planning*, 8(1), 211–225. <https://doi.org/10.17645/up.v8i1.6169>
5. Alvanides, S., & Ludwig, C. (2023). Bombed cities: Legacies of post-war planning on the contemporary urban and social fabric. *Urban Planning*, 8(1), 165–168. <https://doi.org/10.17645/up.v8i1.6828>
6. Alvanides, S., Ludwig, C. (2024). The Legacy of Second World War Bomb Damage on the Social Fabric of Essen. *Post-war Cities: Planning Recovery and Reconstruction*. TRIALOG 148-149. A Journal for Planning and Building in a Global Context, 9-18 https://www.researchgate.net/publication/379999951_Post-war_Cities_Planning_Recovery_and_Reconstruction#fullTextFileContent
7. Bugalski, Ł., & Lorens, P. (2023). Post-Second World War reconstruction of Polish cities: The interplay between politics and paradigms. *Urban Planning*, 8(1), 182–195. <https://doi.org/10.17645/up.v8i1.6116>
8. Cifuentes-Faura, J. (2023). Ukraine's post-war reconstruction: Building smart cities and governments through a sustainability-based reconstruction plan. *Journal of Cleaner Production*, 419, 138323. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138323>
9. Duka, A. P., & Starchenko, H. V. (2022). World Experience of Post-War Economic Recovery: Lessons for Ukraine. *Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management* (6) <https://doi.org/10.54929/2786-5738-2022-6-03-06>
10. Dulko, I. (2023). Rebuilding Narratives: The Role of Urban Planning in Post-War Ukraine. https://www.researchgate.net/publication/371952476_Rebuilding_Narratives_The_Role_of_Urban_Planning_in_Post-war_Ukraine
11. Far M. S., Carlos M. D. (2014). Geopolitical Brownfields: introducing a new terminology for brownfields within conflict zones. In 21st Annual European Real Estate Society Conference. ERES: Conference. Bucharest, Romania, 2014. <https://eres.architexturez.net/doc/oai-eres-id-eres2014-158>
12. Faraponov, V. (2023). Lessons from the Marshall Plan for Ukraine's post-war recovery. *Scientific works of the Inter-regional Academy of Personnel Management. Political science and public administration*, 5(71), 15. [https://doi.org/10.32689/2523-4625-2023-5\(71\)-15](https://doi.org/10.32689/2523-4625-2023-5(71)-15)
13. Gorokhova, T., Firstenko, O., Chopyk, Y., Voitsitska, K., & Petrukha, N. (2024). Strategies for Ukraine's Post-War Economic Recovery within the Framework of Sustainable Development Goals. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, 5(1), e03350. <https://doi.org/10.47172/2965-730X.SDGsReview.v5.n01.pe03350>
14. Hercik J., Simacek P., Szczyrba Z., Smolová I. (2014). Military brownfields in the Czech Republic and the potential for their revitalisation, focused on their residential function. *Quaestiones Geographicae* 33(2):127-138. <https://doi.org/10.2478/quageo-2014-0021>
15. Cabinet of Ministers of Ukraine. State Strategy for Regional Development for 2021-2027 (as amended by Resolution No. 940 of August 13, 2024) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#n11>
16. Kindzerskyi, Y. (2022). Postwar recovery of Ukraine's industry: challenges and features of policy. *Economic analysis*, 32(2), 101–117. <https://doi.org/10.35774/econa2022.02.101>
17. Kostrikov, S., Niemets, L., Robinson, D., Mezentssev, K., Kravchenko, K., & Serohin D. (2024). Delineation of the Hostilities' Impact on Urban Environment by LiDAR Data Processing (a Case Study of Kharkiv). *Achieving sustainability in Ukraine through military brownfields redevelopment*, Springer, 265-278. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_22
18. Kravchenko K. (2024). Theoretical and methodological aspects of socio-geographical research of urban agglomerations. *Economic and Social Geography*, 92. 77–92 <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2024.92.77-92>.
19. Kravchenko K., Perepelitsa V. (2024) Experience of European countries for the post-war restoration of Ukraine <http://soc-econom-region.univer.kharkov.ua/en/conference-proceeding-region-human-geographical-aspects/>
20. Kravchenko, O., Sergiienko, L., Niameshchuk, H., Mamatova, T., & Chykarenko, I. (2023). Post-war recovery practices for Ukraine, based on the experience of other countries that have undergone similar processes. *Economic Affairs*, 68(4), 2277–2288. <https://doi.org/10.46852/0424-2513.4.2023.35>
21. Larkham, P. J., & Adams, D. (2023). Revisioning and rebuilding Britain's war-damaged cities. *Urban Planning*, 8(1), 169–181. <https://doi.org/10.17645/up.v8i1.6102>
22. Ludwig, C., Alvanides, S., Laue, F. (eds) (2024). *Post-war Cities: Planning Recovery and Reconstruction*. TRIALOG 148-149. A Journal for Planning and Building in a Global Context https://www.researchgate.net/publication/379999951_Post-war_Cities_Planning_Recovery_and_Reconstruction#fullTextFileContent
23. Martynovych, N., Yemchenko, I., & Kulinich, T. (2023). From the territory of recovery to sustainable development: A methodological concept of effective socio-economic development of Ukraine after the war development. *Problems of Sustainable Development*, 18(2), 13-25. doi:10.35784/preko.3923
24. Mezentssev, K., & Mezentssev, O. (2022). War and the city: Lessons from urbicide in Ukraine. *Czasopismo Geograficzne*, 93(3), 495–521. <https://doi.org/10.12657/czageo-93-20>.

25. Mezentssev, K., Niemets, L., & Sehida, K. (2024). Transforming Brownfields: Urban Renewal in Ukrainian Cities. Achieving sustainability in Ukraine through military brownfields redevelopment, Springer, 289-299. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_24
26. Modrzyńska, J., Szpak, A., & Willa, R. (2024). The concept of 'building back better' and the reconstruction of Ukraine and its cities. *European Planning Studies*, 32(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/09654313.2024.2405960>
27. Morar, C., Berman, L., Erdal, S., & Niemets, L. (eds) (2024). Achieving Sustainability in Ukraine through Military Brownfields Redevelopment. NATOARW 2023. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. Dordrecht: Springer. 470 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-024-2278-8>
28. Morar, C., Berman, L., Unkart, S., Erdal, S. (2021). Sustainable Brownfields Redevelopment in the European Union: An Overview of Policy and Funding Frameworks. *J Environ Health*. 84(4):24–31. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8959022/>
29. National Recovery Council (2024). Recovery Plan for Ukraine at: <https://recovery.gov.ua/>
30. Niemets, K. A., Sehida, K. Yu., Niemets, L. M., Kravchenko, K. O., Telebeneva, Ye. Yu., Klyuchko, L. V., & Redin, V. I. (2019). Research of urban agglomerations in the aspect of implementing administrative-territorial reform in Ukraine (on the example of Kharkiv region). *Journal of Social and Economic Geography*, 27, 28–39. <https://periodicals.karazin.ua/socecongeo/article/view/15411>
31. Niemets, K., Kravchenko, K., Kandyba, Y., Kobylin, & P. Morar, C. (2021). World Cities in Terms of the Sustainable Development Concept. *Geography and Sustainability*. 2(4), 304-311. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266668392100078X>
32. Niemets, L., Sehida, K., Babichev, A., Vila Subiros, J., Morar, C., Grama, V., Kravchenko, K., & Telebienieva, I. (2024). Issues of the military brownfields in Ukraine: A sustainable development perspective. Achieving sustainability in Ukraine through military brownfields redevelopment, Springer, 83–95. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2278-8_9
33. Pahlen, G., Glöckner, S (2004). Sustainable regeneration of European brownfield sites. *Brownfield sites II: assessment, rehabilitation and development*, 221-232 <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-12244251032&partnerID=40&md5=ad1a653fe039a17a03e83168e62a515d>
34. Pidorycheva, I. (2022). Post-war recovery of Europe: Experience and lessons for Ukraine. *Journal of European Economics*, 21(2), 195-207. <https://doi.org/10.35774/jee2022.02.170>
35. Post-war reconstruction of cities / *Pragmatica* <https://pragmatika.media/en/category/specproiekti/povoyenna-vidbudova-mist/>
36. Post-War Recovery of Ukrainian Cities: Green Reconstruction and Green Transformation (2022). Konrad-Adenauer-Stiftung Office in Ukraine at: https://www.kas.de/documents/270026/18262243/2022+RACSE+Policy+Paper_Summary+Post-war+Recovery+of+Ukraine%E2%80%99s+Cities+Green+Reconstruction+and+Green+Transformation.pdf/cb30259a-3a31-5b8c-4f62-a2ade2d31802?version=1.0&t=1671021690909
37. Shaaban, M. H. I. (2016). Sustainable urban regeneration of brownfields, Cairo University, 122 at: http://eulc.edu.eg/eulc_v5/Libraries/Thesis/BrowseThesisPages.aspx?fn=PublicDrawThesis&BibID=12869025
38. Shaev, B., & Hackett, S. (2021). Cities, migration and the historiography of post-war Europe. *Journal of Migration History*, 7, 191–219. https://www.researchgate.net/publication/356335957_Cities_Migration_and_the_Historiography_of_Post-war_Europe
39. Sinaj, Z., Vela, F., & Shaip, G. (2024). National policy instruments for restoring the post-war economy and factors of sustainability of the Ukrainian economy. *Development*, 23(2), 49–55. <https://doi.org/10.57111/devt/2.2024.49>
40. Sustainable Development Goals, 2021. United Nations Conference on Sustainable Development, Rio+20. <https://sustainabledevelopment.un.org/rio20>
41. The World Bank. (2015). Ukraine: Urbanization review. International Bank for Reconstruction and Development. <https://www.worldbank.org>
42. United Nations Economic Commission for Europe. UN4Kharkiv: Integrated Rehabilitation of Settlements (Territories) in Ukraine at: <https://unece.org/housing/un4kharkiv-rehabilitation>
43. Urban development and post war recovery for Ukrainian cities / Summary of the European Urban Resilience Forum 2022 in Athens, Greece <https://www.undp.org/ukraine/blog/urban-development-and-post-war-recovery-ukrainian-cities>
44. Vialard, A. (2023). Intelligibility of post-war reconstruction in French bombed cities. *Urban Planning*, 8(1), 226–238. <https://doi.org/10.17645/up.v8i1.6026>
45. W. van Vliet (2016). The future of relics from a military past. A study to the history, contemporary role and future development of 20th century military heritage at the waterfront of Tallinn, Estonia https://www.rug.nl/research/kenniscentrum-landschap/voor-studenten/masterscripts/ma_scr_wvanvliet_2016.pdf
46. World Wide Fund For Nature (WWF). <https://wwf.org/our-offices/ukraine/statement-on-sustainable-and-transformative-post-war-reconstruction-in-ukraine>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Наслідки війни та перспективи поствоєнного відновлення (на прикладі міських агломерацій України)

Катерина Кравченко¹

к. геогр. н., доцент,
доцент кафедри соціально-економічної географії
і регіонознавства імені Костянтина Немця,

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Людмила Немець¹

д. геогр. н., професор,
зав. кафедри соціально-економічної географії
і регіонознавства імені Костянтина Немця;

Катерина Сегіда¹

д. геогр. н., професор,
професор кафедри соціально-економічної географії
і регіонознавства імені Костянтина Немця,

За роки тривалої війни росії проти України міста та передмістя стали головними осередками військової агресії. Нагальним питанням постає відновлення та ревіталізація територій, зокрема – міст та міських агломерацій, адже саме вони виступають концентраторами та каталізаторами розвитку. Багато країн світу має досвід відновлення після масштабних бойових дій, успішні практики відновлення яких мають бути вивчені та можуть бути імплементовані для ефективного відновлення та повоєнного розвитку міст та міських агломерацій України. У дослідженні втілено спробу визначення ключових характеристик наслідків війни, проблем та перспектив поствоєнного відновлення для міських агломерацій України з огляду на успішні світові практики та з урахуванням цілей стійкого розвитку. Дослідження спрямоване на розробку гнучкої моделі відновлення, яка враховує економічні, соціальні та екологічні аспекти, адаптовані до сучасних викликів України. У дослідженні висвітлено багатомірний вплив війни на українські міста, зокрема фізичне руйнування інфраструктури, соціально-економічну дезінтеграцію та екологічні виклики. На основі аналізу міжнародного досвіду повоєнного відновлення Німеччини, Японії, Південної Кореї та ін., виділено ефективні кейси, які включають модернізацію інфраструктури, індустріальне відновлення, соціальну інтеграцію внутрішньо переміщених осіб, відновлення земель та територій, проаналізовано міські агломерації світу, які зазнавали потужних руйнувань (Варшава, Берлін, Токіо, тощо) та особливості їх реконструкції. В роботі акцентовано увагу на важливості відновлення України відповідно до засад та цілей Концепції стійкого розвитку відповідно до вимоги «відновити краще, ніж було», зокрема відносно повторного використання «post-war brownfields», залучення інноваційних технологій та участі місцевих громад у процесах відновлення. Відповідно до 17 цілей стійкого розвитку в роботі представлено можливості відновлення міських агломерацій України, наведено комплекс заходів та практичні рекомендації щодо відновлення міст, міських агломерацій та постраждалих регіонів України.

Ключові слова: міські агломерації, поствоєнне відновлення, стійкий розвиток, поствоєнні покинуті території, урбіцид.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 15 жовтня 2024 р.

Прийнята 21 листопада 2024 р.

The role of hydrological factors in the die-back of the European spruce in the territory of the Southeast Carpathians

Ruslan Kravchynskyi¹

PhD (Geography), Leading Researcher, Laboratory of analytical control and monitoring,

¹ Carpathian National Natural Park, Yaremche, Ukraine,

e-mail: kravchinski@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-3769-3106>;

Valentyn Khilchevskyi²

DSc (Geography), Professor of the Department of Hydrology and Hydroecology,

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,

e-mail: khilchevskiy@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0001-7643-0304>;

Marta Korchemlyuk¹

PhD (Technical), Head, Laboratory of analytical control and monitoring,

e-mail: martakor@yahoo.com,  <https://orcid.org/0000-0003-3417-2962>;

Myroslava Zabokrytska³

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography,

³ Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine,

e-mail: mirazabor@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-6045-2936>;

Olga Stefurak¹

Engineer, Laboratory of analytical control and monitoring,

e-mail: stefurak@ukr.net,  <https://orcid.org/0009-0006-4531-6107>;

Ivan Belmega⁴

PhD student, Department of Ecology and Environmental Protection Technologies,

⁴ Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine,

e-mail: belmegaivan@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0007-2524-6217>

ABSTRACT

Formulation of the problem. The article is dedicated to studying the processes of European spruce stand dieback, a phenomenon that is currently relevant not only in Ukraine but also in most European countries, including the Czech Republic, Slovakia, Germany, Austria, and Poland. The focus is on an in-depth investigation of the relationships between one of the abiotic components – the hydrological factor – and the locations where European spruce dieback occurs on the southeastern slopes of the Carpathians. Geographically, the research area is outlined by the boundaries of the first and one of the largest nature parks in Ukraine, the Carpathian National Nature Park (NNP).

Purpose. The aim of the study is to identify the relationships between the processes of European spruce dieback and dynamic and quasi-static (relatively constant) hydrological descriptors in the southeastern Carpathians.

Methods. The informational basis for the study includes the results of forest pathology research conducted by specialists of the Carpathian NNP in 2022, along with long-term hydrometeorological observation data from the Carpathian Flood Monitoring Station Network (Ukrainian Hydrometeorological Center of the State Emergency Service of Ukraine). The study also utilized various remote sensing, field, dendrochronological, laboratory, analytical, comparative, cartographic, mathematical, and instrumental methods.

Research results. The research established that zones of spruce stand dieback are linked to stream source systems, associated with "meanders" in river channels, and are localized near water springs, particularly those with unique chemical water composition. These features may serve as indirect indicators of connections with regional and local tectonic disturbances. The study found a significant relationship between the annual growth of European spruce trunks and the average annual water discharge of the Prut River ($r = 0.6$) and the annual precipitation in the area ($r = 0.68$). In areas where spruce dieback is active, a distinctive evaporation mist formation regime and soil moisture patterns were observed. Temporally, the timing of spruce dieback appears to be connected to abrupt changes in annual water discharge and precipitation levels, likely indicating the impact of "water stress" on the biotic resilience of *Picea abies* [L.] Karst.

Conclusions. The results of this research can contribute to local, regional, or global models for spatiotemporal forecasting of spruce stand dieback processes, not only in the Carpathian region but also in other areas where this issue is relevant. The conclusions and recommendations presented in the article are important for the development of the local tourism and recreation sector, for planning forestry management activities, and for scientific and educational purposes (including conducting scientific excursions and field practices for students in natural sciences, among others).

Keywords: European spruce (*Picea abies* [L.] Karst), dead trees, southeastern Carpathians, hydrography, springs, climate change, evaporation, water balance, annual average streamflow.

In cites: Kravchynskyi Ruslan, Khilchevskyi Valentyn, Korchemlyuk Marta, Zabokrytska Myroslava, Stefurak Olga, Belmega Ivan. (2024). The role of hydrological factors in the die-back of the European spruce in the territory of the Southeast Carpathians. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 212-222. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-17>

Formulation of the problem. European spruce, Norway spruce, or common spruce (*Picea abies* [L.] Karst), is one of the most well-known and economically and ecologically significant tree species in the forest ecosystems of Eurasia. Its natural range extends from Siberia to Fennoscandia, through the Baltic countries to the mountain ranges of Central Europe. Within and on the periphery of its natural range, there are approximately 5.7-7.3 million hectares of pure spruce forests [13]. In the Ukrainian Carpathians, spruce (locally known as "smereka") stands cover an area of about 450-600 thousand hectares, according to various estimates, and grow mainly at altitudes from 700 to 1300 meters above sea level [1]. Until recently, the species *Picea abies* [L.] Karst was considered biotically stable and long-lived here [2]. However, since the 1990s, the decline of spruce forests has been observed in nearly all types of forest growth conditions, on slopes of all exposures, and in stands of various ages [2].

Some researchers predict that due to increased mortality risks, the species *Picea abies* [L.] Karst may become unhealthy and unprofitable, and as a result, its area in Central European forests may significantly decrease [11]. The issue raised in this article is important not only from an economic perspective but also for the proper functioning of protected areas, where forest degradation threatens the existence of valuable ecosystems. For instance, according to [3], within a single year (1961), large areas of spruce virgin forests in the upper reaches of the Prut River (about 900,000 m³ of stands) turned into deadwood. Today, this area is part of Ukraine's first and one of the largest natural parks, the Carpathian National Nature Park (NNP), which covers a significant part of the southeastern Carpathians and is the spatial boundary (territory) of our research.

As of 2016, the area of spruce forest dieback in the Carpathian region exceeded 36,000 hectares [9]. In the 21st century, large-scale spruce dieback has been documented in northern Austria, parts of Germany, Poland, Slovakia, the Czech Republic [11], Slovenia [14], Switzerland [10], and other countries. Thus, across Europe, there is a growing shift in the range and composition of tree species in forests.

The effective development and implementation of strategies to prevent or slow down the dieback of European spruce, as well as to mitigate its negative consequences, require a deep, comprehensive, and thorough study of this issue. This is the subject of research across a number of scientific fields, particularly the natural sciences.

Analysis of publications by research topic.

As early as the 1990s, numerous hypotheses and theories were formulated to explain the causes of spruce forest dieback. In their research, American

scientists R. Peet and N. Christensen noted that difficulties in interpreting tree mortality in forests result from the complexity of natural mortality processes, which can be allogenic – caused by exogenous abiotic or biotic factors – or autogenic, due to tree aging and competitive dynamics [20].

Today, the primary factors contributing to the death of spruce trees are considered to be the mass cultivation of the species *Picea abies* [L.] Karst outside its natural range; the cultivation of pure spruce stands; a reduction in stand density due to forest management practices; the cultivation of spruce ecotypes with low biological resilience; and climate change. As noted by Yu. M. Debrynuik, tree damage from phytodiseases and pests is not the root cause of tree mortality – they merely infest weakened stands, acting as secondary factors [2].

Currently, the climate theory is the most popular. Its proponents come from various scientific schools in different countries. The theoretical foundations and practical results of studying the role of climate as a regulating factor for forest stand resilience are highlighted in a number of works: joint research by scientists from the Warsaw University of Life Sciences and the Swiss Federal Institute for Forest, Snow, and Landscape Research by B. Brzezicki, F. Kienast, and O. Wildi [10]; research from the University of Copenhagen (Denmark) and Centurion University of Technology and Management (India) by A. James and A. Manohar; and studies by staff from the Slovenian Forestry Institute – J. Kermavnar, L. Kutnar, A. Pintar, and some others.

The close relationship between meteorology and climatology with hydrology (studying the water cycle, formation, precipitation, and distribution of atmospheric moisture on Earth's surface, as well as the evaporation of water from bodies of water, soil, and plants) allows many scientists to identify hydrological factors as key in studying the degradation processes of European spruce.

According to some researchers, spruce growth, unlike certain other species, is more closely tied to water availability [21]. In studies by J. Honkaniemi et al., conducted at the Finnish Natural Resources Institute, the role of water as a key factor in the biotic resilience of trees to climate change was emphasized [13]. Meanwhile, Canadian scientists R. Hember et al. argue that so-called "water stress" is the cause of mortality in certain tree species [12]. According to M.P. Kozlovskyi and V.O. Kramarets, for spruce, water stress may result from contrasting moisture levels in the upper (30-40 cm) soil layer, where its root system is concentrated [5].

Some scientists highlight the soil-hydrological factor (particularly excessive moisture) as one of the aspects contributing to tree weakening. An example of the connection between moisture and the condi-

tion of spruce in the territory of the Carpathian National Nature Park (NNP) is the Rudyak basin bog in the Vorokhta Nature Conservation Research Department on the left bank of the Prut River. It is covered with stunted spruce sparse forest, 1-4 meters tall, of site class V, with a crown closure of 0.1 or less [6]. Spruces that found themselves within the dammed lake, formed on the Meresny stream after a 2020 landslide, also died off.

Detailed research by scientists from the University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (Austria), led by S. Netherer, provides empirical evidence that under conditions of limited water resources, the resistance of spruce stands to bark beetle infestation decreases [19].

Experts from the National University of Texas, including K. Kukowski, found that an important component of the hydrological niche in the study of tree degradation processes is the separation of water sources, particularly in landscapes characterized by shallow soil over fractured bedrock, where root growth is significantly restricted [18]. This fact suggests a possible connection between spruce dieback and hydrological descriptors linked to geological structures – such as river networks and natural water sources.

In Ukraine, the study of the weakening biotic resistance of spruce stands is closely associated with specialists from the National Forestry University of Ukraine (P.Y. Slobodyan, 1999, 2003; V.O. Kramarets, G.T. Krynytskyi, 2009; Yu.M. Debryniuk, 2011; V.V. Lavnyi, 2019, et al.), the Ukrainian Research Institute of Mountain Forestry named after P.S. Pasternak (O.I. Golubchak, V.I. Parpan, et al., 2018, 2011), Vasyl Stefanyk Precarpathian National University (Yu.S. Shparyk, et al., 2014, 2016, 2020, 2021), and the Institute of Ecology of the Carpathians of the National Academy of Sciences of Ukraine (M.A. Holubets, 2005; M.P. Kozlovskyi, 2009, 2016), among others.

Specialists from the scientific department of the Carpathian NNP and its structural subdivisions – nature conservation research departments (NCRDs) – are conducting detailed studies on the problem of spruce forest dieback in the southeastern Carpathians.

Despite the significant volume of research conducted, the processes causing the death of certain tree species require further study.

Selection of previously unresolved parts of the general problem. Despite the significant amount of information and the results of various studies, the issue addressed in this article remains a matter of debate among many natural scientists. Currently, there is no unified perspective on the comprehensive causes of European spruce dieback, particularly regarding the role of abiotic factors. Hydrological factors, in particular, are often consid-

ered fragmentarily, indirectly and not fully. Therefore, the authors of this publication have identified the "water-tree" interaction system as a distinct block of influence on the biotic stability of *Picea abies* [L.] Karst and devoted it to detailed study and analysis.

The purpose of the study is to identify the relationships between the dieback processes of common spruce and dynamic as well as quasi-static (conditionally constant) hydrological descriptors in the southeastern Carpathians.

Materials and methods of research. An interdisciplinary approach was employed in this research, utilizing a range of methods from geology, geomorphology, hydrology, climatology, geobotany, and universal tools. The initial data for the study were derived from forest pathology research conducted by specialists of the Carpathian National Nature Park in 2022. The analysis of the distribution of Norway spruce dieback (SD) centers and their relationship with the hydrographic features of the area was performed using satellite images from Google Earth, as well as cartographic schemes from the nature conservation and research departments of the Carpathian NNP.

During comprehensive field research in the Carpathian NNP from 2018 to 2022 (monitoring surface waters, inventorying natural water springs, studying hazardous exogenous processes, etc.), several local dry areas within and outside the park were identified; this data was also utilized in the publication.

Additionally, a detailed study of soil and climatic conditions in the area of mass dieback of *Picea abies* [L.] Karst was conducted in the Yamniansky district (Mykulychyn village, left bank of the Prut River). The condition of trees (forest health) was classified into three categories: Type 1 – healthy, Type 2 – showing signs of dieback, and Type 3 – deadwood. The equipment used included a portable device for measuring soil pH and moisture levels; a specialized wooden rod for snow depth measurement; and GPS coordinates of the points were recorded using a Garmin GPSmap 60Cx navigator.

To establish links between the activation of Norway spruce dieback and dynamic hydrometeorological indicators, long-term observational data from the Ukrainian Hydrometeorological Center's network (particularly in the section of the Prut River – Yaremche city) were used, and hydrological and phenological methods were applied.

The database and visualization of the research results were developed using Geographic Information Systems (GIS) and the Excel spreadsheet processor.

Thus, a variety of remote sensing, field, dendrochronological, laboratory, analytical, compara-

tive, cartographic, mathematical, and instrumental research methods were employed in this study.

The main results of the study. The Carpathian National Nature Park is the first and one of the largest national parks in Ukraine, occupying a significant part of the southeastern Carpathians. Its area covers 504.95 km², stretching 55 km from north to south and 20 km from west to east. Hydrologically,

it encompasses the headwaters of the Prut River basin, where the density of the river network ranges from 0.65 to 0.93 km/km².

In the course of the preliminary analysis of the spatial distribution of contemporary spruce dieback (SD) processes, particular attention was drawn to their correlation with specific local hydrographic conditions. (Fig. 1).

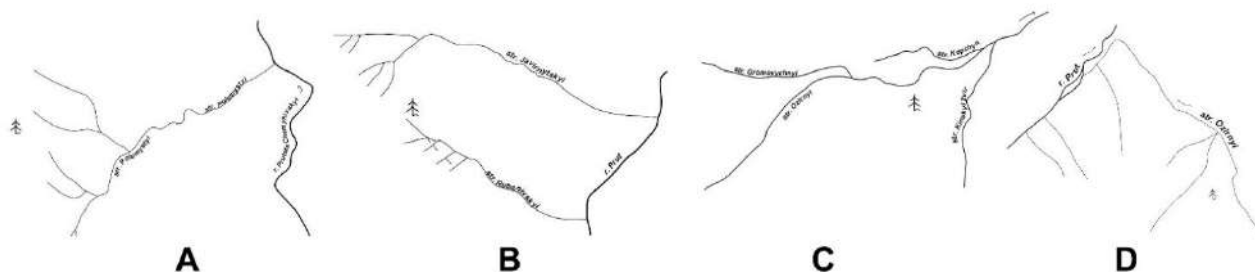


Fig. 1. The primary types of relationships between spruce dieback (SD) areas and the hydrographic network in the Carpathian National Nature Park are as follows:

A) linear; B) linear-zonal; C) outer curvature; D) inner curvature

Thus, two main types of relationships were preliminarily identified: the first reflects the association of spruce dieback with the sources of watercourses, while the second pertains to changes in the configuration of river channels.

In the first case, spruce dieback is linked to the linear extension of specific points where groundwater emerges at the surface (Fig. 1.A) and within the zone of a broad linear structure formed by a system of streams, which are confined at the upper part from the points of emergence to the confluence with the main watercourse (Fig. 1.B).

Mathematically, the line to which spruce dieback (SD) is oriented can be described by the classical formula:

$$SD_{(x,y)} = \sqrt{q_{x2} - q_{x1})^2 + (q_{y2} - q_{y1})^2} \quad (1)$$

where q_{x1} , q_{x2} , q_{y1} , q_{y2} – represent the geographic coordinates of the corresponding extreme points – locations where groundwater emerges at the surface.

The conditionally predicted area of spruce dieback (SD) can be expressed as the area of an ellipse described around the line, where the semi-minor axis is defined as half of the semi-major axis (1/4 $SD_{(x,y)}$):

$$S_{(SD)} = SD_{(x,y)} \cdot \pi \cdot \frac{\sqrt{(q_{x2} - q_{x1})^2 + (q_{y2} - q_{y1})^2}}{8} \quad (2)$$

In the second case, the areas of spruce dieback (SFD) are associated with the inner or outer bends of the river channel (Fig. 1.C, 1.D). Therefore, when creating a descriptive mathematical model, the river meandering coefficient (K_m) should be applied.

The systems of river sources and streams, to

which spruce dieback is linked (see Fig. 1.A), are, by their nature, natural water sources. As early as 2009, some researchers asserted that dieback primarily occurs in stands located in micro-depressions with high groundwater levels [5], i.e., in areas where springs are potentially likely to emerge.

During local surveys conducted in 2021, it was discovered that near the village of Yablunytsia (Polianytsia territorial community, Nadvirna district, Ivano-Frankivsk region), a site of spruce dieback was identified on the right bank of the Pastievaty stream (a tributary of the Yablunytsia River, Prut River basin) (Fig. 2).

During a detailed survey of the areas above and below the spruce dieback site, the emergence of natural water sources was observed, with a chemical composition that somewhat differs from that of the stream water. Notably, the mineralization of the water at the spring is 1.4 times higher (Table 1).

It is worth noting that in the aforementioned case, near the dieback site of *Picea abies* [L.] Karst, a local change in the configuration of the river channel can also be observed, which can be detected through careful field inspection.

This is not an isolated instance. For example, near the "Babyna Yama" locality (Hoverla Research Natural Area), a significant number of springs are located close to areas of widespread spruce dieback [7, 15-17]. Some of these springs have a characteristic smell of hydrogen sulfide, indicating the presence of H₂S in the water of these springs.

A similar situation is observed near the village of Mykulychyn: in a rocky outcrop on the left bank of the Prut River, two springs were identified in winter 2023, which were not observed during the

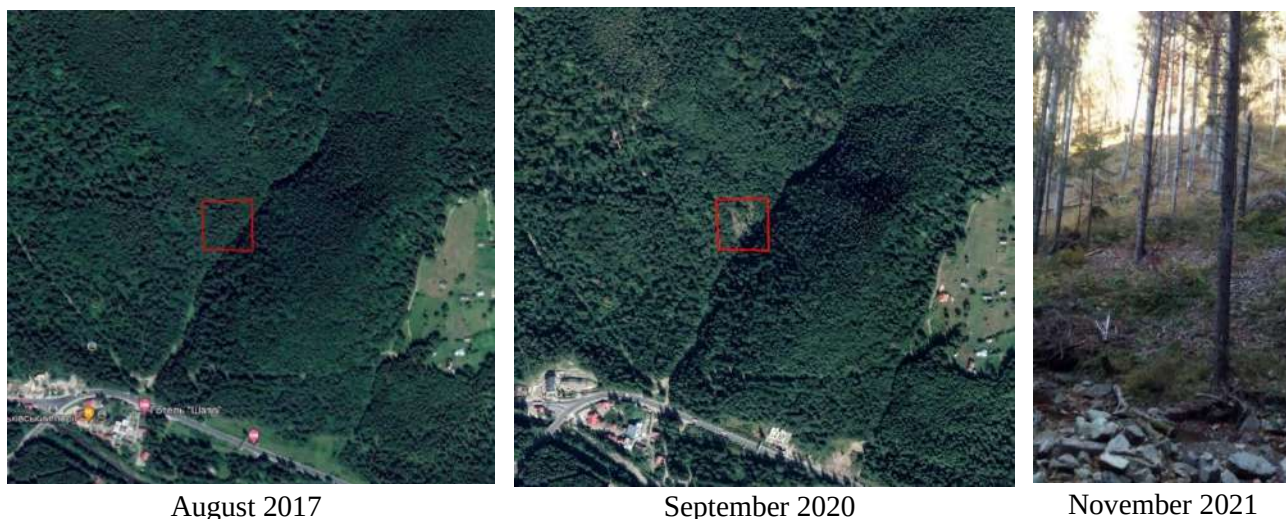


Fig. 2. The dynamics of forest cover in the territory of the Yablunytsia NCRD of the Carpathian NNP, based on satellite imagery from Google Earth (2017, 2020, 2021)

Table 1

Characteristics of the Pastievaty Stream and spring at the site of spruce dieback within the territory of the Carpathian National Nature Park (October 29, 2021)

Indicator \ Sampling site	Water discharge (Q, ml/s)	Water temperature (t, °C)	pH	Water mineralization (M, mg/dm ³)
Pasteivatyi Stream	400	3,8	7,9	77
Spring	5	7,1	8,0	106

summer period. Several springs with water, whose chemical composition differs from that of the river water, are noted on the left bank of the Meresnyi Stream (a right tributary of the Prut River), near a recent landslide (2020), where a deadwood area is also located.

The main elements of the water balance in the Carpathian region (temperature, precipitation, evaporation, runoff) are distributed extremely unevenly and can sometimes vary at the micro-level. There are numerous reasons for this, including both natural factors (forest cover, the type and characteristics of vegetation, hydrological, hydrogeological, and geomorphological conditions, including slope exposure, etc.) and human activities [8]. In this context, areas of *Picea abies* [L.] Karst dieback can be identified as distinct microstructures with properties and functions that differ from adjacent "healthy" forest areas.

Field research results indicate that the soil surface in spruce dieback areas heats up more compared to forested areas. The correlation coefficient between tree condition (I) and soil temperature (t_s) was found to be 0.96, indicating a very strong relationship (Table 2).

Thus, the soil surface in dieback areas receives more heat than under biotically stable units:

$SR_1 > SR_2$, and consequently, the overall evaporation from the soil surface is higher here ($ES_1 > ES_2$). At the same time, a healthy spruce tree can retain up to several tons of water during rainfall (P_2), which is significantly more than on a dead tree (P_1): $P_2 > P_1$, and the interception (I – the capture or retention of atmospheric precipitation) is higher here ($I_2 > I_1$). According to the snow measurement conducted on February 10, 2023, it was found that the snow height (h_1) under dead spruces was 42% greater than that under living ones (h_2) and 10% less than on open ground. Therefore, the evaporation from the leaves of trees will be higher than in the areas with dieback ($ET_1 < ET_2$).

The aforementioned differences can be visually observed in the process of fog formation due to evaporation above dieback zones (Fig. 3). In one case, water vapor outlines the location of dieback (Fig. 3A), while in another, it forms directly above the manifestations of degradation processes (Fig. 3B).

Hydrometeorological conditions are dynamic indicators, and studying their relationship or impact on spruce dieback can serve as a basis for forecasting the activation of degradation processes over time.

There is insufficient data on the exact dates of the activation of dieback in the southeastern Carpathians. The first official mentions date back to the

Table 2

Correlation matrix of relationships among individual soil-climatic indicators in the zone of mass dieback of *Picea abies* [L.] Karst (village of Mykulychyn, Ivano-Frankivsk region, left bank of the Prut River, July 2018)

Indicators	Indicator of tree condition (I)	Soil temperature (t_s), °C	Soil pH (hydrogen indicator)	Soil moisture (M), %	Soil illumination (L), con. units
Indicator of tree condition (I)*	1,00				
Soil temperature (t_s), °C	0,96	1,00			
Soil pH (hydrogen indicator)	-0,64	-0,54	1,00		
Soil moisture (M), %	0,54	0,41	-0,81	1,00	
Soil illumination (L), con. units	0,54	0,48	-0,27	0,24	1,00

Note (correlation relationship assessment): $r < 0$ – inverse relationship; $0 \leq r < 0.1$ – no relationship; $0.1 \leq r < 0.3$ – weak relationship; $0.3 \leq r < 0.5$ – moderate relationship; $0.5 \leq r < 0.7$ – noticeable relationship; $0.7 \leq r < 0.9$ – strong relationship; $0.9 \leq r < 0.99$ – very strong relationship; $0.99 < r \leq 1$ – perfect relationship.

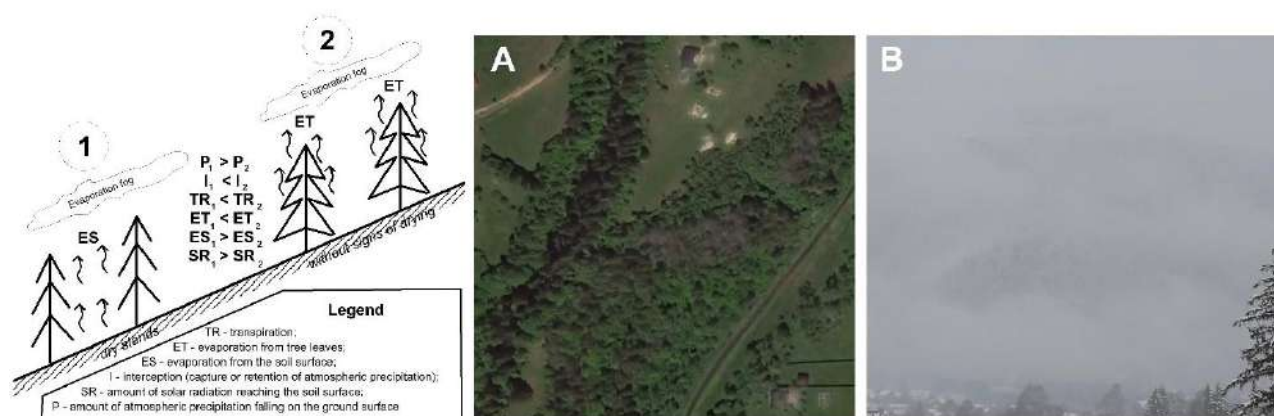


Fig. 3. The formation of discrete evaporation fogs above the dieback area of European spruce (village of Mykulychyn, Ivano-Frankivsk region, left bank of the Prut River)

mid- to late 20th century (1961). Some information regarding the onset of widespread deterioration of coniferous forests relates to the early 1980s and 1990s [4]. In recent decades, this indicator has been under closer scrutiny.

Therefore, for a retrospective analysis and the identification of patterns in the dieback of spruce forests over time, we conducted a series of analytical studies, which included a combination of dendrochronological and hydrometeorological approaches.

Wood samples for growth ring analysis were collected as a result of sanitary logging in the Vorokhtiansky Nature Conservation Research Department (left bank of the Prut River) in 2018. In the first stage, we examined the characteristics of the relationship between atmospheric precipitation (P) and river runoff (Q) with the annual growth of European spruce trunk radius (i).

It is interesting to note that the relationships between the annual trunk growth of the tree were more closely associated not with local hydrometeorological conditions (observational data from the settlement of Vorokhta) but with those in the control section in the city of Yaremche.

The analysis of the relationships between the annual growth of European spruce and the average annual water consumption of the Prut River, as well as the annual precipitation, allows for the preliminary identification of certain cyclic patterns: 1998-2000 showed a slight increase in annual rings; 2001-2006 marked a period of intensive growth; 2007-2011 experienced a decline in growth intensity; and 2012-2017 reflected a minor increase in annual rings (Fig. 4).

Thus, it can be hypothesized that the occurrence of spruce dieback (SDB) is linked to the cyclicity of hydrometeorological indicators. In the ini-

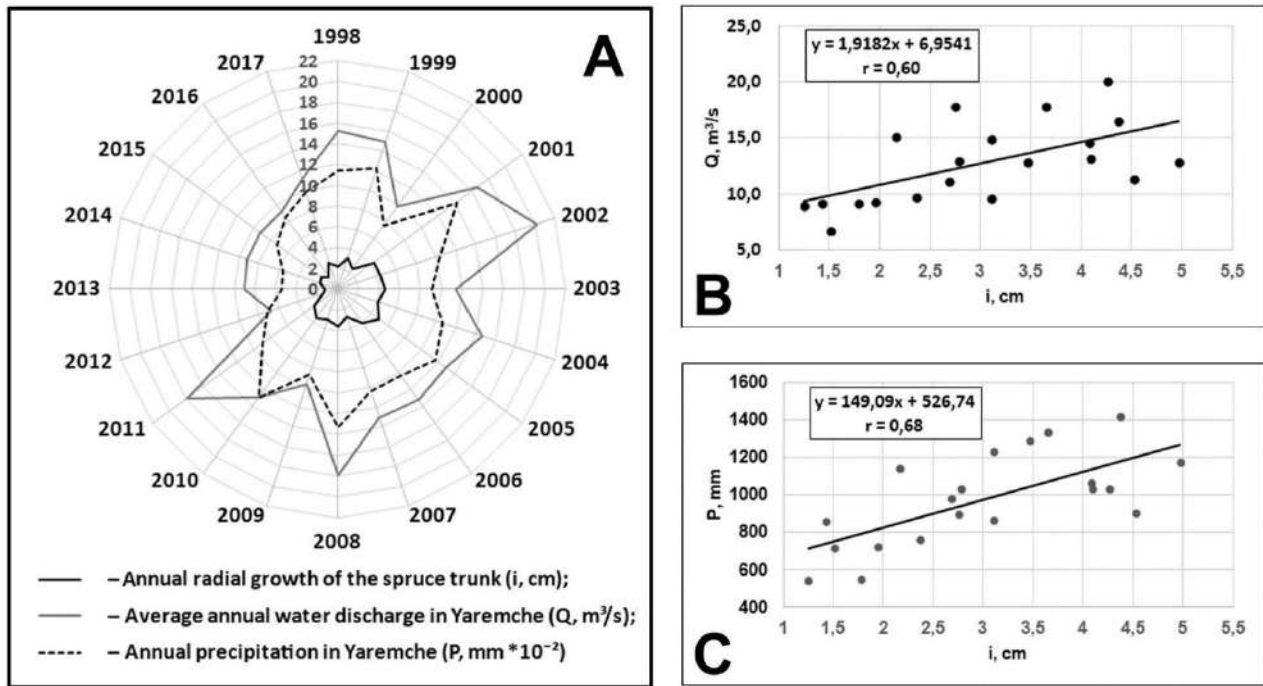


Fig. 4. The relationship between the annual trunk growth of *Picea abies* [L.] Karst with the average annual water consumption of the Prut River (A) and the annual precipitation (B) in the city of Yaremche

tial stages of analysis, this was fully confirmed.

For instance, the spruce dieback observed in 1961 occurred during a period of low water flow when the average annual discharge of the Prut River in Yaremche was 5.62 m³/s (≈ 98% probability).

However, upon further analysis, these patterns were disrupted, necessitating the search for alternative approaches to address this issue. To this end, we applied the method of incremental data addition

(in our case, average annual water discharge), which has proven highly effective in hydrological research and is expressed by the following formula:

$$\sum_i^n Q = f(T) \tag{3}$$

where T – represents the years, $\sum_i^n Q$ – denotes the cumulative sums of average annual river discharge values, measured in m³/s.

Theoretically, provided that the average annual

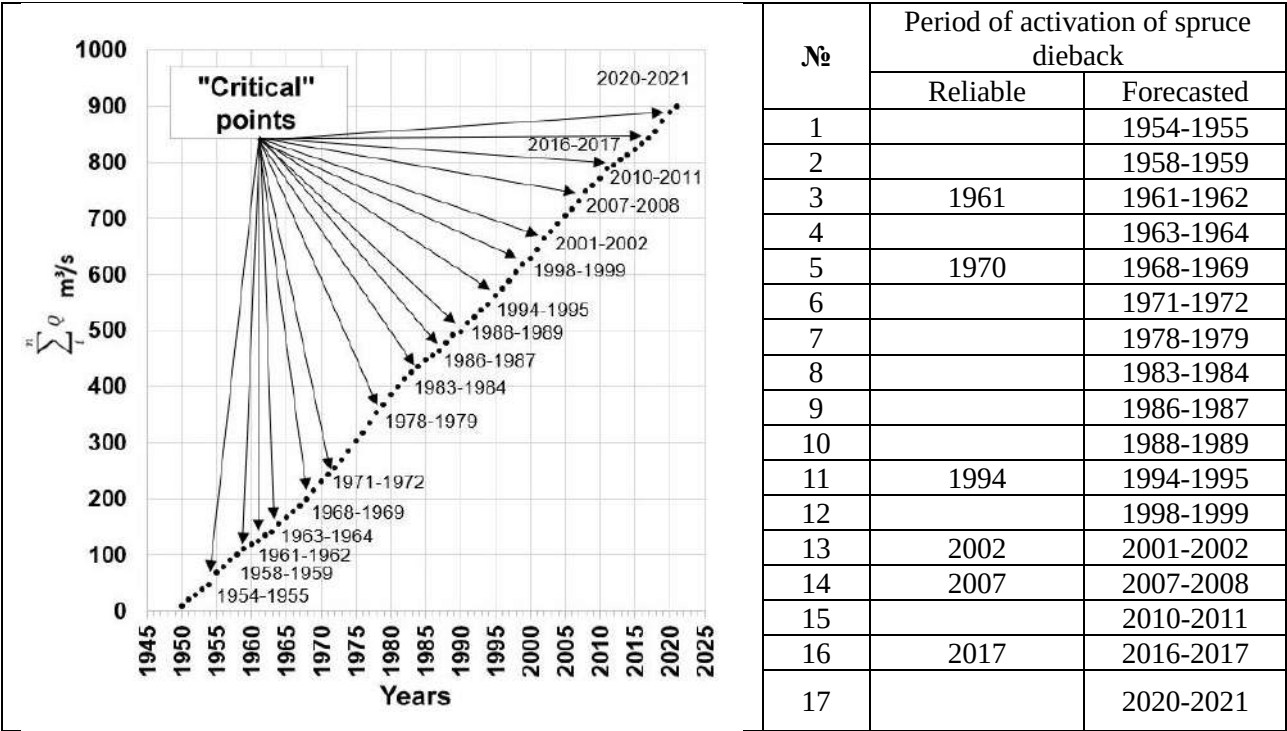


Fig. 5. The graph of cumulative annual water flow of the Prut River at Yaremche for the period from 1950 to 2021

climate and hydrometeorological indicators in each subsequent year were not markedly anomalous (i.e., there were no significant floods, hydrological or meteorological droughts, etc.), the series created by the cumulative addition of these indicators would resemble a straight line.

The graph constructed in this manner, as shown in Fig. 5, exhibits a "wavy" pattern.

The sharp deviation of values from the theoretical graph and the formation of "critical" points (or "breakpoints") likely characterize what is referred to as "water stress", which may influence the activation of tree dieback processes

Conclusions. The results of the comprehensive studies have established a correlation between the zones of dieback of *Picea abies* [L.] Karst and the system of stream sources, as well as the broader linear system formed by several watercourses, which is bounded at the upper part by the locations of groundwater discharge to the surface before merging into the main flow.

Often, areas of tree dieback are associated with

the "bends" of the river channel, both on the outer and inner parts. The proximity to natural water springs, particularly those with unique chemical compositions, along with the aforementioned characteristics, may be indirect indicators of the geological features of the area.

In the locations of dead trees, a distinctive regime of evaporation and soil moisture has been noted. Over time, a connection has been found between the timing of tree dieback manifestations and sharp changes in average annual hydrometeorological indicators (particularly water discharge and precipitation), which likely reflects the influence of "water stress" on the biotic stability of spruce stands.

The identified relationships between the processes of European spruce dieback and relatively stable hydrological descriptors over many years, alongside dynamic indicators, suggest that effective forecasting of the dieback phenomena in *Picea abies* [L.] Karst should be conducted comprehensively, taking into account the factors of place and time.

Bibliography

1. Голубчак О.І. Екологічні проблеми лісів Івано-Франківщини / О.І. Голубчак, І.Ф. Калущий // Науковий вісник Українського державного лісотехнічного університету. – 2004. – Вип. 14.3. – С. 247-252.
2. Дебринюк Ю.М. Всихання смерекових лісів: причини та наслідки / Ю.М. Дебринюк // Науковий вісник Українського державного лісотехнічного університету. – 2011. – Вип. 21.16. – С. 32–38.
3. Дячук Т.В. До історії Говерляньського заповідного лісництва / Т.В. Дячук // Матеріали науково-практичної конференції «Національні парки, їх багатофункціональне значення і проблеми охорони природи». – Яремче, 26-30 вересня 1990. – С. 36-37.
4. Кияк В. Збереження біорізноманіття у гірських і рівнинних регіонах України в умовах кліматичних змін: монографія / В. Кияк, І. Данилик, І. Шпаківська та ін. – Львів; Простір-М. - 2022. - 189 с.
5. Козловський М.П. Основні причини всихання смереки у похідних лісах Українських Карпат / М.П. Козловський, В.О. Крамарець // Матеріали II Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю. - Вінниця, 23-26 вересня 2009 р. – С. 224-227.
6. Корчемлюк М.В. Вивчення зв'язку деградації ялинових деревостанів із вологістю ґрунту на території Карпатського НПП / М.В. Корчемлюк, Р.Л. Кравчинський, М.В. Мотрук, Б.Б. Савчук // Альманах науки. - 2017. № 6. - С.19-22.
7. Кравчинський Р.Л. Моніторинг природних водних джерел Карпатського національного природного парку: монографія / Р.Л. Кравчинський, В.К. Хільчевський, М.В. Корчемлюк, О.М. Стефурак / За ред. В.К. Хільчевського. - Івано-Франківськ: Фоліант. - 2019. - 124 с.
8. Олійник В.С. Перерозподіл атмосферних опадів наметом гірських лісів Карпат / В.С. Олійник // Науковий вісник Українського державного лісотехнічного університету. - 2008. - Вип. 18.6. - С. 12-18.
9. Ткачук О.М. Динаміка всихання ялиників регіону Українських Карпат / О.М. Ткачук // Матеріали I міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні виклики і актуальні проблеми лісівничої освіти, науки та виробництва присвяченої 100-річчю від часу заснування агробіотехнологічного (агрономічного) факультету Білоцерківського НАУ». – Біла Церква, 15 квітня 2021 р. - С. 150-152.
10. Brzeziecki B., Kienast F., Wildi O. Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland / B.Brzeziecki, F. Kienast, O. Wildi // Journal of Vegetation Science. 1995. № 6. P. 257-258. DOI: <https://doi.org/10.2307/3236221>.
11. Čermák P., Mikita T., Kadavý J., Trnka M. Evaluating Recent and Future Climatic Suitability for the Cultivation of Norway Spruce in the Czech Republic in Comparison with Observed Tree Cover Loss between 2001 and 2020. / P. Čermák, T. Mikita, J. Kadavý, M. Trnka // Forests. 2021. № 12(12), 1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121687>.
12. Hember R.A., Kurz W.A., Coops N.C. Relationships between individual-tree mortality and water-balance variables indicate positive trends in water stress-induced tree mortality across North America / R.A. Hember, W.A. Kurz, N.C. Coops // Global Change Biology, 2016. № 23 (4). P. 1691-1710. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13428>.
13. Honkaniemi J., Rammer W., Seidl R. Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience / J. Honkaniemi, W. Rammer, R. Seidl // Landscape Ecology. 2020. № 35. P. 591-606. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00964-y>.

14. Kermavnar J., Kutnar L., Pintar A.M. Ecological factors affecting the recent *Picea abies* decline in Slovenia: the importance of bedrock type and forest naturalness / J. Kermavnar, L. Kutnar, A.M. Pintar // *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2023. № 16(2), P. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.3832/ijfor4168-016>.
15. Kravchynskiy R. L. Integrated monitoring of the springs of the north-eastern part of the Carpathians / R. L. Kravchynskiy, V. K. Khilchevskiy, M. V. Korchemlyuk, M. R. Zabokrytska // *Proceedings 14th International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. November 10-13, 2020, Kyiv. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056006>.
16. Kravchynskiy R. L. Springs as indicator of geotectonic disturbances / R. L. Kravchynskiy, V. K. Khilchevskiy, M. V. Korchemlyuk, M. R. Zabokrytska, L. V. Plichko // *Proceedings 19th International Scientific Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, European Association of Geoscientists & Engineers, 11-14 May 2020, Kiev. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo107>.
17. Kravchynskiy R. L. Monitoring of the Dying-Off Processes of European Spruce Stands in the Context of the Geological Features of the Southeast Carpathians / R. L. Kravchynskiy, V. K. Khilchevskiy, M. V. Korchemlyuk, O. M. Stefurak, M. R. Zabokrytska // *Proceedings 17th International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. November 7-10, 2023, Kiev. P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520003>.
18. Kukowski K. R. Hydraulic responses to extreme drought conditions in three co-dominant tree species in shallow soil over bedrock / K. R. Kukowski, S. Schwinning, B. F. Schwartz // *Oecologia*, 2013. №171(4), P. 819-830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2466-x>.
19. Netherer S. Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? / Netherer, S., Matthews, B., Katzensteiner, K., Blackwell, E., Henschke, P., Hietz, P., Pennerstorfer, J., Rosner, S., Kikuta, S., Schume, H. & Schopf, A. // *New Phytologist*, 2015, № 205, P. 1128-1141. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13166>.
20. Peet R. K. Competition and Tree Death. / R. K. Peet, N. L. Christensen // *BioScience*, 1987. № 37(8), P. 586-595. DOI: <https://doi.org/10.2307/1310669>.
21. Zhang Y. P. Higher plasticity of water uptake in spruce than larch in an alpine habitat of North-Central China / Y. P. Zhang, J. L. Xu, Y. Jiang, T. Mandra, T. Rademacher, F. Xue, M. Dong // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021. № 311 108696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108696>.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Golubchak, O. I. & Kalutsky, I. F. (2004). Ecological problems of mountain forests in Ivano-Frankivsk region. *Scientific Bulletin of the Ukrainian State Forestry University*, (14.3), 247-252. [in Ukrainian]
2. Debrynuk, Yu.M. (2011). Die-bak of the fir forests: causes and consequences. *Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, (21.16), 32-38. [in Ukrainian]
3. Dyachuk, T.V. (1990). On the History of the Hoverla Protected Forestry. *National Parks, Their Multifunctional Importance and Nature Conservation Issues: Proceedings of the Scientific and Practical Conference* (pp. 36-37), September 26-30, Yaremche, Ukraine: Oblpolihrafvydav. [in Ukrainian]
4. Kyiak, V., Danylyk, I., Shpakivska, I., Kagalo, O., Lobachevskaya, O., Kanarsky, Y., Maryshevych, O., Andriyeyeva, O., Kobiv, Y., Mykitchak, T., Kyiak, N., & Rabyk, I. (2022). Conservation of biodiversity in mountainous and plain regions of Ukraine under climate change conditions. Lviv: Prostor-M. ISBN 978-617-8055-63-9. [in Ukrainian]
5. Kozlovskiy, M. P., Kramarets, V. O. (2009). The main causes of spruce dieback in derivative forests of the Ukrainian Carpathians. *Materials of the II All-Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation* (pp. 224-227), September 23-26, Vinnytsia, Ukraine: IE Danyliuk. [in Ukrainian]
6. Korchemlyuk, M. V., Kravchynskiy, R. L., Motruk, M. V., & Savchuk, B. B. (2017). Study of the relationship between spruce stand degradation and soil moisture in the territory of the Carpathian NNP. *Science Almanac*, (6), 19-22. [in Ukrainian]
7. Kravchynskiy, R. L., Khilchevskiy, V. K., Korchemlyuk, M. V., & Stefurak, O. M. (2019). Monitoring of natural water sources of the Carpathian National Nature Park. Ivano-Frankivsk: Foliant. ISBN 978-617-7496-79-2. [in Ukrainian]
8. Oliynyk, V. S. (2008). Redistribution of atmospheric fallouts by tent of crowns of the mountain forests of Carpathians. *Scientific Bulletin of the Ukrainian State Forestry University*, (18.6), 12-18. [in Ukrainian]
9. Tkachuk, O. M. (2021). Dynamics of spruce dieback in the region of the Ukrainian Carpathians. *Modern challenges and pressing issues in forestry education, science, and production dedicated to the 100th anniversary of the founding of the agrobiotechnology (agronomy) faculty of Bila Tserkva NAU: Materials of the I International Scientific and Practical Internet Conference* (pp. 150-152), April 15, Bila Tserkva, Ukraine: BNAU. [in Ukrainian]
10. Brzeziecki, B., Kienast, F. & Wildi, O. (1995). Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *Journal of Vegetation Science*. 6, 257-258. DOI: <https://doi.org/10.2307/3236221>.

11. Čermák, P., Mikita, T., Kadavý, J. & Trnka, M. (2021). Evaluating Recent and Future Climatic Suitability for the Cultivation of Norway Spruce in the Czech Republic in Comparison with Observed Tree Cover Loss between 2001 and 2020. *Forests*, 12(12), 1687. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12121687>
12. Hember, R. A., Kurz, W. A. & Coops N. C. (2016). Relationships between individual-tree mortality and water-balance variables indicate positive trends in water stress-induced tree mortality across North America. *Global Change Biology*, 23 (4), 1691-1710. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13428>.
13. Honkaniemi, J., Rammer, W. & Seidl, R. (2020). Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience. *Landscape Ecology*, (35), 591-606. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00964-y>
14. Kermavnar, J., Kutnar, L. & Pintar, A. M. (2023). Ecological factors affecting the recent *Picea abies* decline in Slovenia: the importance of bedrock type and forest naturalness. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 16(2), 105-115. DOI: <https://doi.org/10.3832/for4168-016>.
15. Kravchynskiy, R. L., Khilchevskiy, V. K., Korchemlyuk, M. V. & Zabokrytska M. R. (2020). Integrated monitoring of the springs of the north-eastern part of the Carpathians. *Proceedings 14th International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. (pp. 1-5). November 10-13, Kyiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056006>.
16. Kravchynskiy, R. L., Khilchevskiy, V. K., Korchemlyuk, M. V. & Zabokrytska M. R., Plichko, L. V. (2020). Springs as indicator of geotectonic disturbances. *Proceedings 19 th International Scientific Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, European Association of Geoscientists & Engineers*, (pp. 1-5). 11-14 May, Kiev, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo107>
17. Kravchynskiy, R. L., Khilchevskiy, V. K., Korchemlyuk, M. V., Stefurak O. M., & Zabokrytska, M. R. (2023). Monitoring of the Dying-Off Processes of European Spruce Stands in the Context of the Geological Features of the Southeast Carpathians. *Proceedings 17th International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, (pp. 1-5). November 7-10, Kiev, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520003>.
18. Kukowski, K. R., Schwinning, S., Schwartz, B. F. (2013). Hydraulic responses to extreme drought conditions in three co-dominant tree species in shallow soil over bedrock. *Oecologia*, (171(4)), 819-830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2466-x>.
19. Netherer, S., Matthews, B., Katzensteiner, K., Blackwell, E., Henschke, P., Hietz, P., Pennerstorfer, J., Rosner, S., Kikuta, S., t Schume, H. & Schopf, A. (2015). Do water-limiting conditions predispose Norway spruce to bark beetle attack? *New Phytologist*, (205), 1128-1141. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13166>.
20. Peet, R. K. & Christensen, N. L. (1987) Competition and Tree Death. *BioScience*, (37(8)), 586-595. DOI: <https://doi.org/10.2307/1310669>.
21. Zhang, Y. P., Xu, J. L., Jiang, Y., Mandra, T., Rademacher, T., Xue, F. & Dong, M. (2021). Higher plasticity of water uptake in spruce than larch in an alpine habitat of North-Central China. *Agricultural and Forest Meteorology*, (311), 108696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108696>

Роль гідрологічних чинників у всиханні ялини європейської на території південно-східних Карпат

Руслан Кравчинський¹

к. геогр. н., пров. наук. співробітник,
лабораторія аналітичного контролю та моніторингу,

¹ Карпатський національний природний парк, Яремче, Україна;

Валентин Хільчевський²

д. геогр. н., професор, кафедра гідрології та гідроекології,

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна;

Марта Корчемлюк¹

к. техн. н., зав. лабораторії аналітичного контролю та моніторингу;

Мирослава Забокрицька³

к. геогр. н., доцент, кафедра фізичної географії,

³ Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна;

Ольга Стефурак¹

інженер, лабораторія аналітичного контролю та моніторингу;

Іван Бельмега⁴

аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій,

⁴ Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна

Стаття присвячена вивченню процесів всихання ялинових деревостанів, що сьогодні є актуальним не лише в Україні, а й більшості країн Європи, зокрема Чехії, Словаччині, Німеччині, Австрії та Польщі. Основний аспект зроблено на поглибленому вивченні взаємозв'язків гідрологічного чинника з місцями проявів всихання

ялини європейської на південно-східних схилах Карпат. У просторовому відношенні територія досліджень оконтурена межами першого і одного із найбільших природних парків України – Карпатського національного природного парку (НПП). Інформаційною основою для роботи були результати лісопатологічних досліджень, проведені фахівцями Карпатського НПП у 2022 р. та багаторічні дані гідрометеорологічних спостережень на мережі Карпатської селестокової станції (Українського гідрометеорологічного центру ДСНС України). У роботі також було використано низку дистанційних, польових, дендрохронологічних, лабораторних, аналітичних, порівняльних, картографічних, математичних та інструментальних методів. За результатами комплексу проведених досліджень встановлено приуроченість зон всихання ялинових деревостанів до системи витоків струмків, зв'язок із «вигинами» річкового русла та приуроченість до місць виходу водних джерел, зокрема з водою своєрідного хімічного складу. Це може бути непрямыми ознаками зв'язку з регіональними і локальними тектонічними порушеннями. Під час проведення досліджень виявлено помітний зв'язок річного приросту стовбура ялини європейської із середньорічною витратою води р. Прут ($r = 0.6$) та річною кількістю опадів у даній місцевості ($r = 0.68$). У місцях активізації всихання ялинових деревостанів відзначено особливий режим формування туманів випаровування та вологості ґрунту. У часовому аспекті виявлено зв'язок строків прояву ВЯД із різкими змінами середньорічних витрат води та атмосферних опадів, що, ймовірно, характеризує реакцію так званого «водного стресу» на біотичну стійкість виду *Picea abies* [L.] Karst. Результати проведених досліджень можуть бути частиною місцевої, регіональної або глобальної моделі для просторово-часового прогнозування процесів всихання ялинових деревостанів, і не лише у Карпатському регіоні, а й скрізь, де ця проблема є актуальною. Отримані висновки та рекомендації у статті є важливими для розвитку місцевого туристично-рекреаційного комплексу, планування лісогосподарських заходів, для наукових та навчальних цілей (зокрема проведення наукових екскурсій, практик для студентів природничих спеціальностей тощо).

Ключові слова: ялина європейська (*Picea abies* [L.] Karst), відмирання дерев, південно-східні Карпати, гідрографія, природні водні джерела, кліматичні зміни, випаровування, водний баланс, середньорічна витрата води.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 21 жовтня 2024 р.

Прийнята 24 листопада 2024 р.

Using Remote Sensing Normalised Difference Vegetation Index to Recognise Irrigated Croplands via Agroland Classifier Application

Pavlo Lykhovyd¹

DSc (Agriculture), Senior Researcher,

Department of Irrigated Agriculture and Decarbonization of Agroecosystems,

¹ Institute of Climate-Smart Agriculture of NAAS, Odesa, Ukraine,

e-mail: pavel.likhovid@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-0314-7644>;

Raisa Vozhehova¹

DSc (Agriculture), Professor, Director,

Academician of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine,

e-mail: vozhehova57@ukr.net,  <http://orcid.org/0000-0002-3895-5633>;

Oleksandr Averchev²

DSc (Agriculture), Professor, Head of the Department of Agriculture,

² Kherson State Agrarian and Economic University, Kherson, Ukraine,

e-mail: averchev1966@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-8333-2419>

ABSTRACT

Formulation of the problem. Recognition between irrigated and non-irrigated croplands is an important task of modern agricultural science in order to ensure efficient management of water resources in agriculture and control the usage of irrigation systems. Remote sensing data could be utilized as a means for the automation of this task through the implementation of machine classification algorithms. The normalised difference vegetation index, calculated based on aerospace images, could be of great usefulness in this regard to determine the patterns of vegetation cover in different humidification conditions and provide a key to distinguish between rainfed and irrigated crops.

The purpose of this study was to assess the accuracy of cropland meliorative status recognition using remote sensing normalised difference vegetation index through different mathematical algorithms within Agroland Classifier application and to find out whether this application could be applied for automated cropland recognition.

Methods. The study was conducted for the Southern Steppe zone of Ukraine, and included 100 randomly selected fields (50 irrigated, and 50 non-irrigated) within the boundaries of Kherson and Mykolaiv regions. The data on the values of the field normalised difference vegetation index were obtained through the calculation of the average monthly index value using free of distortion cloudless aerospace imagery with a resolution of 250 m from OneSoil remote sensing platform, and then fetched to the application Agroland Classifier to get a decision on the meliorative status of the field (irrigated or non-irrigated). Agroland Classifier utilises linear canonical discriminant function and logistic regression algorithms to distinguish between the irrigated and rainfed fields. The accuracy of the application recognition was evaluated through the calculation of general correctness rate, as well as correctness rates for each recognition algorithm separately.

Results. The study revealed that Agroland Classifier provides high general correctness rate (92% for the combined algorithms) for the recognition between the irrigated and non-irrigated croplands. Each algorithm of the application was established to have its unique advantages and disadvantages. The linear canonical discriminant function provides more stable results both for the irrigated (88% of correct assumptions) and non-irrigated lands (84% of correct assumptions). At the same time, logistic regression failed to recognize the irrigated crops (just 78% of correct assumptions), while the accuracy of the non-irrigated lands recognition was significantly higher (96% of correct assumptions).

Scientific novelty and practical significance. The article provides novel insights on the implementation of remote sensing data in the classification between irrigated and non-irrigated crops in the Southern Steppe zone of Ukraine via Agroland Classifier application. The application could be recommended for scientific and practical purposes to improve cropland mapping and monitoring of the use of water resources in agriculture.

Keywords: crop mapping, discriminant function, irrigated agriculture, logistic regression, water resources.

In cites: Lykhovyd Pavlo, Vozhehova Raisa, Averchev Oleksandr. (2024). Using Remote Sensing Normalised Difference Vegetation Index to Recognise Irrigated Croplands via Agroland Classifier Application. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 223-233. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-18>

Introduction. Irrigated agriculture is one of the greatest consumers of available freshwater resources – the uptake of water for the irrigation purposes reaches about 70% of general water consumption by all the economies. And in the context of current climate change and gradual aridization, the demand for water for irrigation is expected to increase, as sustainable crop production on most territory of

Ukraine will be possible only under irrigated conditions [1, 2]. Therefore, it is so important to account for the available water resources and their efficient use. Monitoring of the irrigated areas in agricultural sector and their dynamic mapping is one of the key strategies to ensure effective water management, and remote sensing could be of great use in this regard [1].

Remote sensing applications in the field of irrigated agriculture and water resources management involves different approaches and techniques depending on the purpose. For example, satellite imagery is used to determine the areas of water bodies and the spatial distribution of water resources [3]. The remote sensing application could be applied to the accounting of water balance at different levels, starting with simple recognition and mapping of irrigated croplands and ending with spatial maps of daily evapotranspiration and water deficit [4]. Some research emphasises the importance of using remote sensing and GIS in assessing land salinisation and sodification as an additional instrument to conventional soil surveys [5].

The mapping of irrigation croplands is essential to better understand the balance of water, climate change and its impacts on crops, and the distribution and demands of irrigation water. Therefore, spatial maps of irrigated croplands are among the first-line tools used for rational agricultural planning [6].

There are different approaches to identifying irrigated crops using remote sensing data. For example, some researchers used the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Irrigated Agriculture Dataset (MIrAD-US) to identify irrigated lands in California and the semi-arid Great Plains (USA), which were performed with general precisions of 92% and 75%, respectively [7]. Another study, conducted in the USA, reports on the successful application of the random forest classification algorithm to remote sensing data to create 30 m resolution maps of irrigated grain corn and soybeans [8]. One of the recent studies reports about the use of combined remote sensing data on Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), Soil Moisture Active Passive (SMAP), and Advanced SCAT-terometer (ASCAT) through the K-means algorithm to identify and map irrigated lands with sufficient (78%) correctness rate [9]. Use of the combination of remote sensing vegetation (normalised difference vegetation index and normalised index moisture index) indices together with the land surface temperature index resulted in great accuracy of irrigated lands identification, reaching 89% [10].

Apart from the data set used, the classification accuracy rates depend greatly on the mathematical algorithm applied. Usually, the best results are reported when machine learning approaches are used. However, it is not always the case, as sometimes less complicated and demanding for the calculation power mathematical algorithms can provide the results which are not greatly inferior to those of machine learning [11, 12].

Notwithstanding the fact that NDVI itself was not designed as an indicator for the recognition between irrigated and non-irrigated croplands, it fairly

well characterizes general health of agricultural plants and crop status, which in its turn, is strongly dependent on irrigation water supply in the arid and semi-arid climates, where moisture availability is the main limitation factor of the plant's growth and development. Besides, some previously conducted studies support the idea of using the NDVI as a reliable and ready-to-use indirect marker of drought stress effects on agricultural plants on the land plots of different scale [13, 14]. The main purpose of this study was to determine the accuracy rates of the classification of irrigated and non-irrigated land by the means of the Agroland Classifier application (which uses linear canonical discriminant function and logistic regression algorithms) using time series of the normalised difference vegetation index (NDVI) from the fields of the South of Ukraine.

Materials and methods. The study was carried out for the Southern Steppe zone of Ukraine, which is sufficiently represented with both irrigated and non-irrigated croplands. The studied fields were located in Kherson and Mykolaiv regions, which are characterized with semi-arid climatic conditions with a strong tendency to further drought events aggravation and great demand for irrigation for sustainable crop production [15]. The investigation included 50 non-irrigated and 50 irrigated fields.

The spatial imagery of the fields with 250 m resolution during the active growing season (the period May – October) was retrieved from OneSoil (<https://onesoil.ai/en/about>) online platform. The service is widely used by Ukrainian farmers for remote croplands monitoring. It fetches users pre-processed combined imagery both from Sentinel-2 and Landsat-8 satellites. Image processing on the service is claimed to be performed with strict accordance to internationally validated methodology of the normalised difference vegetation index calculation [16]. The values of the NDVI are provided as a historical trend line for each plot, field, or polygon with some level of time inconsistency. In the inter-course of the study, the NDVI values were recalculated to the monthly average values in common arithmetical procedure. Only cloud-free (the percents of clouds < 10%) and free from gaps and distortion images were involved in the study to minimize misleading results. The index values were summarised monthly to correspond to the data requirements of the Agroland Classifier application. General workflow of the study conduction was close to the conditions of real practical implementation of OneSoil and Agroland Classifier products by stakeholders and farmers (Figure 1).

Agroland Classifier is an HTML-based application, developed to automate the recognition between different cultivated crops, irrigated and non-irrigated lands using the algorithms of linear canonical discri-

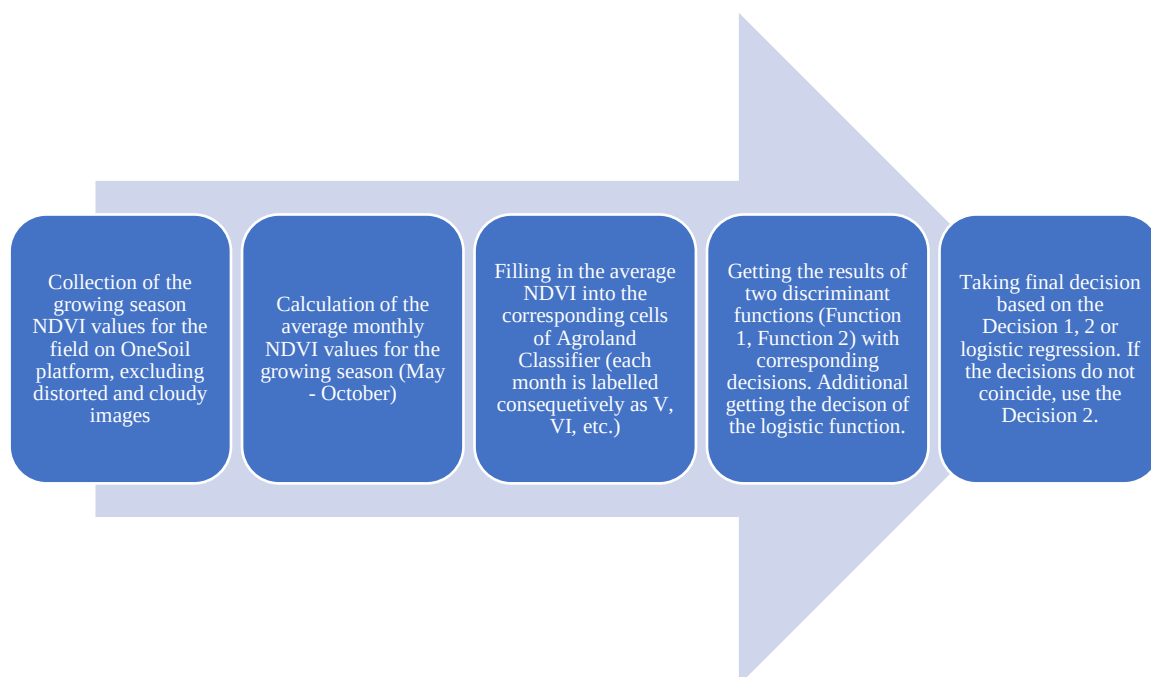


Fig. 1. Methodological workflow of the study

minant analysis and logistic regression. The application was developed at the Institute of Climate-Smart Agriculture of NAAS in the intercourse of the scientific work within the framework of the Program of Scientific Work No. 7 “Agrospace” of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. The methodology and algorithms, laid in the basis of the application, passed robust scientific validation [17]. Agroland Classifier is passing practical external testing at the moment, and it is available free of charge on the reasonable request to the Institute of Climate-Smart Agriculture of NAAS. The application has a user-friendly interface with classification and explanatory sections (Figure 2). The classification of croplands into irrigated and non-irrigated is carried out in the “Irrigated lands classifier” section

of the application. Classification can be performed both by the algorithm of linear canonical discriminant analysis, and by the algorithm of logistic regression. The pre-calculated average monthly values of the normalised difference vegetation index for the growing season (the period from May to October) are entered into the corresponding cells of the application. When performing recognition using the discriminant analysis algorithm, decisions can be made based on two canonical functions. In most times, their answers will match. In the case when the answers do not match, the user must decide according to function 2 (Decision 2). The logistic regression algorithm can also be used as a test or as an independent method.



Fig. 2. User interface of the Agroland Classifier application

The correctness rates of the recognition in the Agroland Classifier application were calculated using the following equations (1–3) for each algorithm:

$$CRI = \frac{\text{Number of correct irrigated lands recognition}}{\text{Total number of irrigated fields}} \times 100\% \quad (1)$$

$$CRNI = \frac{\text{Number of correct non-irrigated lands recognition}}{\text{Total number of non-irrigated fields}} \times 100\% \quad (2)$$

$$GCR = \frac{\text{Number of correct recognition}}{\text{Total number of fields}} \times 100\% \quad (3)$$

where *CRI* – correctness rates for irrigated fields; *CRNI* – correctness rates for non-irrigated fields; *GCR* – general correctness rates.

The correctness rates of 80% and higher could be considered as reliable enough to recommend scientific and practical use of the application.

Results. Based on the remote sensing data and

knowledge on the status of the studied fields, the initial data set for the Agroland Classifier application was created (Table 1). The results of the recognition through the algorithms of linear canonical discriminant function (LDA & CDA) and logistic regression analysis are also represented as correct (+) or incorrect (-).

Table 1

The data set and the results of the recognition of the irrigated and non-irrigated croplands of the Southern Steppe one of Ukraine using the values of normalised difference vegetation index (NDVI)

No.	Crop	Irrigation	Google Maps coordinates of the field	NDVI						Recognition results (LDA & CDA / Log Regression)
				May	June	July	August	September	October	
1	Alfalfa	Yes	46.738890, 33.247821	0.20	0.25	0.60	0.80	0.40	0.25	+ / +
2	Soybean	Yes	46.729566, 33.266876	0.20	0.20	0.45	0.80	0.70	0.20	+ / +
3	Sunflower	Yes	46.846354, 32.961750	0.20	0.10	0.20	0.65	0.65	0.20	+ / +
4	Grain corn	Yes	46.570638, 32.327839	0.20	0.20	0.40	0.75	0.30	0.10	+ / +
5	Grain corn	Yes	46.585495, 32.326714	0.20	0.20	0.50	0.60	0.30	0.20	+ / +
6	Rice	Yes	46.116381, 32.319588	0.20	0.30	0.60	0.65	0.60	0.40	+ / +
7	Rice	Yes	46.140251, 33.095785	0.10	0.10	0.40	0.60	0.60	0.30	+ / +
8	Soybean	Yes	46.351458, 34.261931	0.10	0.20	0.60	0.80	0.70	0.35	+ / +
9	Sunflower	Yes	46.373716, 34.248273	0.10	0.15	0.40	0.60	0.45	0.30	+ / +
10	Alfalfa	Yes	46.366703, 33.708774	0.10	0.20	0.45	0.75	0.50	0.10	+ / +
11	Soybean	No	46.723234, 32.530540	0.10	0.20	0.40	0.40	0.30	0.15	+ / +
12	Grain corn	No	46.750323, 32.479007	0.10	0.10	0.50	0.45	0.30	0.15	+ / +
13	Winter wheat	No	46.760487, 32.234667	0.40	0.60	0.20	0.10	0.10	0.15	+ / +
14	Spring barley	No	46.793297, 32.071016	0.20	0.25	0.40	0.20	0.15	0.10	+ / +
15	Spring wheat	No	46.151307, 32.703008	0.25	0.40	0.30	0.10	0.15	0.20	+ / +
16	Grain corn	No	46.269378, 32.313710	0.10	0.25	0.60	0.60	0.20	0.15	- / -
17	Grain corn	No	46.715366, 35.284792	0.10	0.15	0.40	0.30	0.20	0.10	+ / +
18	Soybean	No	46.775067, 32.791990	0.30	0.25	0.30	0.30	0.35	0.30	+ / +

19	Sunflower	Yes	46.807847, 32.402425	0.10	0.15	0.40	0.60	0.30	0.10	- / -
20	Sunflower	No	46.836204, 32.379765	0.10	0.25	0.50	0.30	0.20	0.10	+ / +
21	Soybean	No	46.763956, 32.332405	0.30	0.50	0.20	0.10	0.10	0.15	+ / +
22	Winter barley	No	46.788003, 32.316890	0.40	0.35	0.15	0.10	0.10	0.15	+ / +
23	Winter rapeseed	Yes	46.714991, 32.222985	0.70	0.75	0.30	0.20	0.20	0.20	+ / +
24	Winter wheat	Yes	46.711492, 32.227272	0.50	0.70	0.30	0.10	0.10	0.10	+ / +
25	Winter rapeseed	No	46.699733, 32.252994	0.50	0.50	0.15	0.10	0.10	0.20	+ / +
26	Winter wheat	Yes	46.669063, 32.241358	0.70	0.70	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
27	Alfalfa	Yes	46.754586, 32.253402	0.20	0.20	0.70	0.40	0.20	0.20	+ / -
28	Spring barley	No	46.751090, 32.183178	0.10	0.25	0.40	0.10	0.10	0.10	+ / +
29	Winter wheat	No	46.775422, 32.240745	0.40	0.60	0.15	0.10	0.10	0.10	+ / +
30	Grain corn	No	46.762838, 32.268100	0.10	0.20	0.50	0.35	0.20	0.20	+ / +
31	Grain corn	Yes	46.787863, 32.429780	0.10	0.20	0.50	0.75	0.40	0.15	+ / +
32	Grain corn	No	46.789541, 32.439783	0.10	0.20	0.50	0.40	0.30	0.10	+ / +
33	Grain corn	Yes	46.801839, 32.426718	0.10	0.10	0.50	0.70	0.60	0.20	+ / +
34	Winter wheat	No	46.764376, 32.433454	0.30	0.50	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
35	Soybean	Yes	46.742382, 32.704859	0.20	0.10	0.35	0.65	0.60	0.20	+ / +
36	Soybean	Yes	46.743969, 32.703190	0.20	0.25	0.30	0.75	0.50	0.15	+ / +
37	Potato	Yes	46.776567, 32.754896	0.10	0.10	0.10	0.25	0.60	0.70	- / -
38	Rice	Yes	46.134200, 33.099698	0.10	0.15	0.40	0.65	0.60	0.30	+ / +
39	Soybean	Yes	46.403136, 33.130148	0.10	0.10	0.40	0.70	0.65	0.25	+ / +
40	Soybean	Yes	46.392744, 33.080406	0.20	0.20	0.35	0.75	0.60	0.15	+ / +
41	Grain corn	Yes	46.385591, 33.053185	0.40	0.20	0.40	0.70	0.60	0.35	+ / +
42	Grain corn	Yes	46.831453, 32.407744	0.10	0.15	0.40	0.60	0.50	0.15	+ / +
43	Grain corn	No	46.746490, 32.706392	0.10	0.10	0.30	0.50	0.40	0.20	+ / +
44	Grain corn	No	46.756269, 32.722264	0.10	0.15	0.25	0.35	0.30	0.20	+ / +
45	Spring barley	No	46.760306, 32.728157	0.10	0.45	0.50	0.10	0.10	0.15	+ / +
46	Spring wheat	No	46.775657, 32.744575	0.10	0.30	0.45	0.10	0.10	0.10	+ / +
47	Soybean	No	46.786573, 32.732687	0.10	0.30	0.45	0.15	0.20	0.10	+ / +
48	Winter barley	No	46.773115, 32.708299	0.40	0.60	0.15	0.10	0.10	0.10	+ / +

49	Winter barley	No	46.741684, 32.706609	0.55	0.45	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
50	Grain corn	No	46.708450, 32.687959	0.20	0.25	0.50	0.40	0.30	0.30	- / +
51	Grain corn	No	46.474467, 32.500164	0.20	0.20	0.45	0.25	0.30	0.25	+ / +
52	Soybean	No	46.509685, 32.527629	0.20	0.25	0.30	0.45	0.40	0.40	- / +
53	Soybean	No	46.517718, 32.537672	0.20	0.25	0.35	0.55	0.50	0.40	- / -
54	Winter rapeseed	No	46.396412, 32.639977	0.60	0.50	0.15	0.15	0.15	0.10	+ / +
55	Winter wheat	No	46.358309, 32.557194	0.40	0.40	0.20	0.10	0.10	0.15	+ / +
56	Winter wheat	No	46.354224, 32.139980	0.40	0.65	0.10	0.10	0.20	0.20	+ / +
57	Soybean	No	46.362539, 32.190505	0.20	0.20	0.40	0.50	0.30	0.20	- / +
58	Winter wheat	No	46.691493, 32.721901	0.45	0.60	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
59	Winter wheat	No	46.722678, 32.706908	0.35	0.55	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
60	Grain corn	No	46.732185, 32.675548	0.10	0.10	0.20	0.55	0.30	0.15	+ / +
61	Rice	Yes	46.520612, 32.496301	0.20	0.60	0.70	0.70	0.65	0.50	+ / +
62	Spring rapeseed	Yes	46.501532, 32.508232	0.20	0.20	0.50	0.70	0.20	0.20	+ / +
63	Winter barley	Yes	46.486642, 32.507803	0.80	0.80	0.25	0.10	0.15	0.15	+ / +
64	Winter wheat	Yes	46.479846, 32.502653	0.60	0.55	0.15	0.10	0.10	0.10	- / -
65	Winter wheat	Yes	46.357201, 32.231212	0.60	0.60	0.10	0.10	0.10	0.10	- / -
66	Spring wheat	Yes	46.357372, 32.137650	0.15	0.20	0.20	0.40	0.75	0.70	+ / +
67	Grain corn	Yes	46.121883, 32.316052	0.20	0.25	0.40	0.65	0.70	0.40	+ / +
68	Soybean	Yes	46.767254, 33.565501	0.20	0.20	0.60	0.75	0.50	0.10	+ / +
69	Grain corn	Yes	46.773594, 33.577702	0.20	0.20	0.50	0.60	0.50	0.10	+ / +
70	Winter wheat	Yes	46.755438, 33.581068	0.45	0.70	0.25	0.10	0.10	0.10	+ / -
71	Grain corn	Yes	47.049545, 32.459099	0.10	0.20	0.40	0.70	0.40	0.15	+ / +
72	Grain corn	Yes	47.051695, 32.473665	0.10	0.20	0.40	0.70	0.35	0.10	+ / +
73	Grain corn	Yes	47.051695, 32.490173	0.10	0.10	0.35	0.75	0.40	0.15	+ / +
74	Potato	Yes	47.004368, 32.361507	0.10	0.10	0.15	0.45	0.70	0.40	- / -
75	Potato	Yes	46.990460, 32.350340	0.10	0.10	0.20	0.70	0.60	0.30	+ / +
76	Sunflower	Yes	46.999070, 32.336017	0.10	0.10	0.20	0.75	0.70	0.35	+ / +
77	Vegetables	Yes	46.994434, 32.325335	0.10	0.10	0.20	0.70	0.65	0.20	+ / +
78	Beans	Yes	47.018604, 32.599661	0.10	0.30	0.75	0.70	0.70	0.20	+ / +

79	Sugar beets	Yes	47.019266, 32.604273	0.10	0.15	0.15	0.40	0.75	0.70	+ / -
80	Sunflower	Yes	46.999733, 32.569072	0.10	0.15	0.25	0.75	0.40	0.15	+ / +
81	Sunflower	Yes	46.977873, 32.544553	0.10	0.10	0.25	0.70	0.40	0.20	- / -
82	Alfalfa	Yes	46.967769, 32.536784	0.60	0.70	0.60	0.55	0.60	0.40	+ / +
83	Sunflower	Yes	46.808482, 32.424160	0.10	0.15	0.40	0.70	0.25	0.10	+ / -
84	Grain corn	Yes	46.788788, 32.428287	0.10	0.20	0.60	0.70	0.40	0.15	+ / +
85	Potato	Yes	46.816291, 32.362862	0.15	0.40	0.60	0.20	0.15	0.10	+ / -
86	Soybean	No	46.739153, 31.979514	0.15	0.20	0.45	0.40	0.20	0.15	+ / +
87	Winter wheat	No	46.798529, 32.704831	0.60	0.60	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
88	Winter barley	No	46.811425, 32.705088	0.40	0.60	0.15	0.10	0.20	0.15	+ / +
89	Soybean	No	46.820710, 32.710939	0.15	0.20	0.40	0.50	0.30	0.15	- / +
90	Winter barley	No	46.822910, 32.701230	0.40	0.60	0.10	0.10	0.10	0.10	+ / +
91	Grain corn	No	46.827353, 32.715119	0.10	0.10	0.40	0.60	0.25	0.15	+ / +
92	Grain corn	No	46.835228, 32.718591	0.15	0.20	0.40	0.55	0.25	0.15	- / +
93	Grain corn	No	46.828541, 32.754535	0.15	0.15	0.40	0.45	0.25	0.15	+ / +
94	Sunflower	No	46.829289, 32.767138	0.15	0.20	0.45	0.30	0.20	0.15	+ / +
95	Winter wheat	No	46.823394, 32.770031	0.35	0.45	0.20	0.10	0.15	0.15	+ / +
96	Grain corn	No	46.825549, 32.761222	0.20	0.25	0.50	0.40	0.20	0.15	- / +
97	Sunflower	No	46.813053, 32.763601	0.15	0.15	0.30	0.50	0.30	0.20	+ / +
98	Grain corn	No	46.809357, 32.767524	0.15	0.20	0.40	0.35	0.25	0.20	+ / +
99	Winter wheat	No	46.804031, 32.766945	0.40	0.35	0.20	0.10	0.10	0.10	+ / +
100	Spring barley	No	46.806276, 32.744375	0.20	0.40	0.40	0.10	0.10	0.10	+ / +

As a result of the computation of the correctness rates, it was established that the GCR of the Agroland Classifier reached 92%. As for the separate algorithms, a great difference has been found between the canonical function and the logistic regression performance. CRI for the canonical function was 88%, while for logistic function it was just 78%. At the same time, CRNI for the canonical function was 84%, while for logistic regression – 96%. Therefore, it is concluded that linear discriminant function performs much better in the recognition of irrigated croplands, while logistic regression is especially accurate when distinguishing non-irrigated land arrays. This specific should be taken into consideration when using Agroland Classifier

in science and practice, and both application algorithms should be used to obtain the greatest reliability of agricultural land classification.

Discussion. Recently, there has been a lot of focus on the issue of utilising remote sensing data to categorise croplands as either irrigated or non-irrigated. Nevertheless, there isn't currently a general fix for this problem. The majority of methodological strategies created by scientists are regionally focused, meaning that in environments other than those used in actual research, they cannot ensure the same level of categorisation accuracy. As a result, the issue of identifying irrigated croplands requires the creation of relevant algorithms as well as their unification and universalisation.

In modern science, agricultural land is classified as either irrigated or non-irrigated using vegetation indices, specifically the normalised difference vegetation index. One of the most practical spatial indices is the normalized difference vegetation index because of its extensive availability across multiple platforms, relative ease of computation, and strong relationship with crop green biomass – virtually the primary factor that allows one to distinguish between rainfed and irrigated crops.

The Ghanaian study verified that agricultural land types could be accurately classified using NDVI readings. The decision tree algorithm served as the systematic foundation for land recognition, guaranteeing 67–93% accuracy in determining irrigated land, depending on the crop [18]. One of the largest scientific investigations worldwide on the composition and geographic location of irrigated land during the years 1999–2012 employed a comparable approach. According to another study [19], the accuracy of the model was 83–92% for irrigated areas and 82–88% for non-irrigated lands, indicating a quite high indication. It should be mentioned that in our study the correctness results for irrigated and non-irrigated croplands were also different.

Studies on potatoes conducted in the UK have revealed that it is practically hard to distinguish between irrigated and non-irrigated potatoes due to the humid environment of the nation. Thus, the authors concluded that only in situations where there is a stark difference between irrigated and non-irrigated conditions, i.e., in an arid climate, can Earth remote sensing data be used as a useful measure for identifying reclaimed land [20]. Due to recent climatic changes in Ukraine, situations have arisen that distinguish irrigated and rainfed agriculture. For this reason, it seems very promising to use aeronautical surveillance to identify reclaimed land [21]. However, our research also supports the notion that it is challenging to identify the irrigated potato.

Decision tree techniques are typically used to identify meliorated croplands based on remote sensing data [22]. While more conventional techniques such as binary and multiple logistic regression, ensemble machine learning, and random forest machine learning are still widely used, they are less frequently used than artificial neural networks with various learning algorithms and architectures [23]. Even though neural networks are nearly the best

machine learning technique for achieving the highest levels of sensitivity and accuracy in recognition, they are computationally demanding and have a complex and ambiguous classification algorithm, which is a drawback if we wish to investigate the relationships and influences between model inputs and create a universal open function that can be integrated into other programs [24]. The Agroland Classifier uses conventional mathematical methods with clear functions used for recognition, and this is another fact in favour of this application as its algorithms are more open and universal.

It should also be noted that the application was originally developed to facilitate the classification of reclaimed croplands under crops such as corn, soybeans, sunflowers, and winter cereals. Notwithstanding the fact, the Agroland Classifier performed well enough even for the classification of crops, which were not used to build the functions, for example, rice and beans. However, potato crops are recognised much worse than the other.

Apart from the advantages mentioned above, it should be noted that there is no alternative for the Agroland Classifier. Notwithstanding the fact that there are numerous studies devoted to the problem of irrigated lands mapping using remotely sensed NDVI, none of the research groups proposed the software instrument, therefore, Agroland Classifier is not only quite accurate, but also unique tool for the semi-automated irrigated and non-irrigated croplands recognition using remote sensing data.

Conclusions. The Agroland Classifier application provides high general correctness rates in the recognition between the irrigated and non-irrigated crops, cultivated in the South of Ukraine. However, the algorithms used in the application have great variation in their accuracy, therefore, it is essential to use both to obtain the best classification correctness. Notwithstanding the fact that the application was originally designed for the limited assortment of crops (namely, sunflower, grain corn, soybeans and cereals), it performed good even for the crops, which were not claimed by the developers, such as rice, alfalfa, beans and vegetables. The application has no analogues both in Ukraine and worldwide. Further investigation of the methodological approach to the classification of the irrigated and non-irrigated lands by the means of remote sensing vegetation indices should be conducted.

Bibliography

1. Ozdogan M., Yang Y., Allez G., Cervantes C. Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote sensing*. 2010. Vol. 2(9). P. 2274–2304. <https://doi.org/10.3390/rs2092274>
2. Lykhovyd P. Remote sensing data for drought stress and croplands productivity assessment in Kherson region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*. 2023. Vol. 59. P. 166–177. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-12>

3. Bastiaanssen W. G., Molden D. J., Makin I. W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*. 2000. Vol. 46(2). P. 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00080-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00080-9)
4. Taghvaeian S., Neale C. M. Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes*. 2011. Vol. 25(26). P. 4132–4141. <https://doi.org/10.1002/hyp.8371>
5. Singh A. Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques. *Ecological Indicators*. 2018. Vol. 89. P. 584–589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.041>
6. Zhu X., Zhu W., Zhang J., Pan Y. Mapping irrigated areas in China from remote sensing and statistical data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7(11). P. 4490–4504. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2296899>
7. Pervez M. S., Brown J. F. Mapping irrigated lands at 250-m scale by merging MODIS data and national agricultural statistics. *Remote Sensing*. 2010. Vol. 2(10). P. 2388–2412. <https://doi.org/10.3390/rs2102388>
8. Xu T., Deines J. M., Kendall A. D., Basso B., Hyndman D. W. Addressing challenges for mapping irrigated fields in subhumid temperate regions by integrating remote sensing and hydroclimatic data. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(3). P. 370. <https://doi.org/10.3390/rs11030370>
9. Dari J., Quintana-Seguí P., Escorihuela M. J., Stefan V., Brocca L., Morbidelli R. Detecting and mapping irrigated areas in a Mediterranean environment by using remote sensing soil moisture and a land surface model. *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 596. P. 126129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126129>
10. Senturk S., Bagis S., Ustundag B. B. Application of remote sensing techniques in locating dry and irrigated farmland parcels. 2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics, Beijing, 11-14 August 2014. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2014.6910630>
11. Xie Y., Lark T. J. Mapping annual irrigation from Landsat imagery and environmental variables across the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 260. P. 112445. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112445>
12. Graf R., Zeldovich M., Friedrich S. Comparing linear discriminant analysis and supervised learning algorithms for binary classification – A method comparison study. *Biometrical Journal*. 2024. Vol. 66(1). P. 2200098. <https://doi.org/10.1002/bimj.202200098>
13. Ding Y., He X., Zhou Z., Hu J., Cai H., Wang X., Li L., Xu J., Shi H. Response of vegetation to drought and yield monitoring based on NDVI and SIF. *Catena*. 2022. Vol. 219. P. 106328. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106328>
14. Kamble M. V., Ghosh K., Rajeevan M., Samui R. P. Drought monitoring over India through normalized difference vegetation index (NDVI). *Mausam*. 2010. Vol. 61(4). P. 537–546. <https://doi.org/10.54302/mausam.v61i4.911>
15. Lykhovyd P., Vozhehova R., Hranovska L., Bidnya I., Shablia O., Kokoiko V., Koblai S., Solomonov R., Kulidzhanov E., Hnylytskyi Ye. Implementation of agroecological zoning index to map the suitability of agricultural lands of the Steppe zone of Ukraine for the cultivation of major crops. *Modern Phytomorphology*. 2024. Vol. 18. P. 41–46. <https://doi.org/10.5281/zenodo.200121>
16. Huang S., Tang L., Hupy J. P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32(1). P. 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
17. Лиховид, П. В., Грановська, Л. М. Класифікація зрошуваних і незрошуваних посівів пшениці озимої, кукурудзи, сої та соняшнику на основі даних аерокосмічного моніторингу. *Таврійський науковий вісник*. 2024. Вип. 136. С. 3–9. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.2.1>
18. Gumma M. K., Thenkabail P. S., Hideto F., Nelson A., Dheeravath V., Busia D., Rala A. Mapping irrigated areas of Ghana using fusion of 30 m and 250 m resolution remote-sensing data. *Remote Sensing*. 2011. Vol. 3(4). P. 816–835. <https://doi.org/10.3390/rs3040816>
19. Meier J., Zabel F., Mauser W. A global approach to estimate irrigated areas—a comparison between different data and statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22(2). P. 1119–1133. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1119-2018>
20. Shamal S. A. M., Weatherhead K. Assessing spectral similarities between rainfed and irrigated croplands in a humid environment for irrigated land mapping. *Outlook on AGRICULTURE*. Vol. 43(2). P. 109–114. <https://doi.org/10.5367/oa.2014.0168>
21. Lykhovyd P. Irrigation needs in Ukraine according to current aridity level. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22(8). P. 11–18. <https://doi.org/10.12911/22998993/140478>
22. Pervez M. S., Budde M., Rowland J. Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 149. P. 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.008>
23. Demarez V., Hellen F., Marais-Sicre C., Baup F. In-season mapping of irrigated crops using Landsat 8 and Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11(2). P. 118. <https://doi.org/10.3390/rs11020118>
24. Chen L., Li S., Bai Q., Yang J., Jiang S., Miao Y. Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13(22). P. 4712. <https://doi.org/10.3390/rs13224712>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., & Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 2(9), 2274–2304. <https://doi.org/10.3390/rs2092274>
2. Lykhovyd, P. (2023). Remote sensing data for drought stress and croplands productivity assessment in Kherson region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 166–177. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-12>
3. Bastiaanssen, W. G., Molden, D. J., & Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46(2), 137–155. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00080-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00080-9)
4. Taghvaeian, S., & Neale, C. M. (2011). Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes*, 25(26), 4132–4141. <https://doi.org/10.1002/hyp.8371>
5. Singh, A. (2018). Managing the salinization and drainage problems of irrigated areas through remote sensing and GIS techniques. *Ecological Indicators*, 89, 584–589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.041>
6. Zhu, X., Zhu, W., Zhang, J., & Pan, Y. (2014). Mapping irrigated areas in China from remote sensing and statistical data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(11), 4490–4504. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2296899>
7. Pervez, M. S., & Brown, J. F. (2010). Mapping irrigated lands at 250-m scale by merging MODIS data and national agricultural statistics. *Remote Sensing*, 2(10), 2388–2412. <https://doi.org/10.3390/rs2102388>
8. Xu, T., Deines, J. M., Kendall, A. D., Basso, B., & Hyndman, D. W. (2019). Addressing challenges for mapping irrigated fields in subhumid temperate regions by integrating remote sensing and hydroclimatic data. *Remote Sensing*, 11(3), 370. <https://doi.org/10.3390/rs11030370>
9. Dari, J., Quintana-Seguí, P., Escorihuela, M. J., Stefan, V., Brocca, L., & Morbidelli, R. (2021). Detecting and mapping irrigated areas in a Mediterranean environment by using remote sensing soil moisture and a land surface model. *Journal of Hydrology*, 596, 126129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126129>
10. Senturk, S., Bagis, S., & Ustundag, B. B. (2014, August). Application of remote sensing techniques in locating dry and irrigated farmland parcels. In 2014 The Third International Conference on Agro-Geoinformatics (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2014.6910630>
11. Xie, Y., & Lark, T. J. (2021). Mapping annual irrigation from Landsat imagery and environmental variables across the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112445. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112445>
12. Graf, R., Zeldovich, M., & Friedrich, S. (2024). Comparing linear discriminant analysis and supervised learning algorithms for binary classification – A method comparison study. *Biometrical Journal*, 66(1), 2200098. <https://doi.org/10.1002/bimj.202200098>
13. Ding, Y., He, X., Zhou, Z., Hu, J., Cai, H., Wang, X., Li, L., Xu, J., & Shi, H. (2022). Response of vegetation to drought and yield monitoring based on NDVI and SIF. *Catena*, 219, 106328. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106328>
14. Kamble, M. V., Ghosh, K., Rajeevan, M., & Samui, R. P. (2010). Drought monitoring over India through normalized difference vegetation index (NDVI). *Mausam*, 61(4), 537–546. <https://doi.org/10.54302/mausam.v61i4.911>
15. Lykhovyd, P., Vozhehova, R., Hranovska, L., Bidnyna, I., Shablia, O., Kokoiko, V., Koblai, S., Solomonov, R., Kuli-dzhanov, E., & Hnylytskyi, Ye. (2024). Implementation of agroecological zoning index to map the suitability of agricultural lands of the Steppe zone of Ukraine for the cultivation of major crops. *Modern Phytomorphology*, 18, 41–46. <https://doi.org/10.5281/zenodo.200121>
16. Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
17. Lykhovyd, P. V., & Hranovska, L. M. (2024). Klasyfikatsiya zroshuvanykh i nezroshuvanykh posiviv pshenytsi ozymoi, kukurudzy, soi ta soniashnyku na osnovi danykh aerokosmichnoho monitorynhu [Classification of the irrigated and non-irrigated crops of winter wheat, corn, soybeans and sunflower by the means of aerospace monitoring]. *Tavrian Scientific Herald*, 136, 3–9. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.2.1> [in Ukrainian]
18. Gumma, M. K., Thenkabail, P. S., Hideto, F., Nelson, A., Dheeravath, V., Busia, D., & Rala, A. (2011). Mapping irrigated areas of Ghana using fusion of 30 m and 250 m resolution remote-sensing data. *Remote Sensing*, 3(4), 816–835. <https://doi.org/10.3390/rs3040816>
19. Meier, J., Zabel, F., & Mauser, W. (2018). A global approach to estimate irrigated areas—a comparison between different data and statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1119–1133. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1119-2018>
20. Shamal, S. A. M., & Weatherhead, K. (2014). Assessing spectral similarities between rainfed and irrigated croplands in a humid environment for irrigated land mapping. *Outlook on AGRICULTURE*, 43(2), 109–114. <https://doi.org/10.5367/oa.2014.0168>
21. Lykhovyd, P. (2021). Irrigation needs in Ukraine according to current aridity level. *Journal of Ecological Engineering*, 22(8), 11–18. <https://doi.org/10.12911/22998993/140478>
22. Pervez, M. S., Budde, M., & Rowland, J. (2014). Mapping irrigated areas in Afghanistan over the past decade using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 149, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.008>

23. Demarez, V., Helen, F., Marais-Sicre, C., & Baup, F. (2019). In-season mapping of irrigated crops using Landsat 8 and Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 11(2), 118. <https://doi.org/10.3390/rs11020118>
24. Chen, L., Li, S., Bai, Q., Yang, J., Jiang, S., & Miao, Y. (2021). Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(22), 4712. <https://doi.org/10.3390/rs13224712>

Використання супутникового нормалізованого диференційного вегетаційного індексу для розпізнавання зрошуваних земель у додатку Agroland Classifier

Павло Лиховид¹

д. с.-г. н., ст. наук. співробітник,

відділ зрошувального землеробства та декарбонізації агроєкосистем,

¹ Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН, Одеса, Україна;

Райса Вожегова¹

д. с.-г. н., професор, академік Національної академії аграрних наук України, директор;

Олександр Аверчев²

д. с.-г. н., професор, зав. кафедри землеробства,

² Херсонський державний аграрно-економічний університет, Херсон, Україна

Розрізнення зрошуваних і незрошуваних земель є важливим завданням сучасної аграрної науки для забезпечення ефективного управління водними ресурсами та контролю використання зрошувальних систем. Дані дистанційного зондування (зокрема, нормалізований диференційний вегетаційний індекс) можуть бути використані як засіб виконання цього завдання в парі з алгоритмами машинної класифікації. Метою дослідження було оцінити точність розпізнавання сільськогосподарських земель за даними нормалізованого диференційного вегетаційного індексу за допомогою алгоритмів додатку Agroland Classifier. Дослідження виконували для зони Південного Степу України на 100 випадково відібраних полях (50 зрошуваних і 50 незрошуваних), розташованих у межах Херсонської та Миколаївської областей. Дані щодо величини польового нормалізованого диференційного вегетаційного індексу було отримано шляхом розрахунку усередненого значення за вільними від спотворень безхмарними супутниковими знімками з роздільною здатністю 250 м, одержаними на платформі дистанційного моніторингу OneSoil, і введено в додаток Agroland Classifier для отримання рішення щодо меліоративного статусу поля (зрошуване або незрошуване). Точність розпізнавання оцінювали шляхом розрахунку коефіцієнтів коректності. Встановлено, що Agroland Classifier забезпечує високий загальний рівень коректності (92%) для розпізнавання між зрошуваними та незрошуваними землями. Кожен алгоритм додатку має свої унікальні переваги та недоліки. Лінійна канонічна дискримінантна функція забезпечує більш стабільні результати як для зрошуваних (88% коректності), так і для незрошуваних земель (84% коректності), тоді як логістична регресія гірше розпізнає зрошувані поля (78% коректності), і набагато краще – незрошувані (96% коректності). Таким чином, Agroland Classifier може бути рекомендовано для наукових і практичних цілей для напівавтоматичного розпізнавання зрошуваних і незрошуваних угідь та моніторингу використання водних ресурсів у сільському господарстві.

Ключові слова: картування посівів, дискримінантна функція, зрошуване землеробство, логістична регресія, водні ресурси.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 22 липня 2024 р.

Прийнята 23 вересня 2024 р.

Possible determination of temperature and space-time probable distribution of air temperature in the territory of the Republic of Armenia

Varduhi Margaryan¹

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Hydrometeorology,

¹ Yerevan State University, Yerevan, Armenia,

e-mail: vmargaryan@ysu.am,  <https://orcid.org/0000-0003-3498-0564>;

Armen Sedrakyan²

PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Physics,

² National Polytechnic University of Armenia (NPUA), Yerevan, Armenia,

e-mail: asedrakyan@seua.am,  <https://orcid.org/0000-0003-2166-3754>;

Svitlana Reshetchenko³

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Physical Geography and Cartography,

³ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: s.reshetchenko@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-0744-4272>

ABSTRACT

Formulation of the problem. Climate studies cover a wide range of issues, from causes to consequences and adaptations to climate change, aimed at collectively addressing environmental protection, conservation, and sustainable use of natural resources within the framework of sustainable development goals (SDGs). Considering that air and soil, like any other terrestrial or astrophysical objects, are characterized by an important scalar physical quantity-temperature, which constantly changes in the Cartesian coordinate system, it is crucial to understand the features of its distribution. It has been established that temperature is considered a physical quantity that characterizes the degree of heat of an object. Given that modern physical studies describe temperature both from a thermodynamic perspective and statistically, according to the molecular-kinetic theory, which characterizes the average kinetic energy of the thermal motion of molecules and is measured on the Kelvin scale. In meteorology in many countries around the world, the temperature of air, soil, and water is typically measured in SI units, specifically in degrees Celsius (°C).

The aim of the work. Analysis and assessment of regularities and features of the spatio-temporal distribution of air temperature for the period 1931-2021.

Methods. The following methods were used in the work: mathematical-statistical, analysis, correlation methods, fundamental laws of modern physics were used in the work.

Results. Actual data of temperature observations of meteorological stations of "Hydrometeorology and Monitoring Center" of RA Ministry of Environment, climate bulletins and chronicles were used as initial data sources. The temperature-heat (energy) difference becomes known in the sense that a system can have high energy but low temperature. Energy depends on the geometry (dimensions) of the system, but temperature does not. In the territory of the Republic of Armenia, a trend of increasing air temperature is observed, which is also a result of the entropy change of the system. It can be changed very quickly, depending on the process of disruption of excessive permissible norms of environmental factors in the given area, which currently needs separate serious research. The tendency to increase temperature indicators can be considered as the result of a change in the entropy of the system. This trend can change rapidly depending on the influence of excessive environmental factors in a certain area, which requires a separate and thorough study.

Keywords: temperature, temperature scale-bar, air temperature, thermodynamics, entropy, warming, space-time distribution, the Sustainable Development Goals (SDGs), Armenia.

In cites: Margaryan Varduhi, Sedrakyan Armen, Reshetchenko Svitlana. (2024). Possible determination of temperature and space-time probable distribution of air temperature in the territory of the Republic of Armenia. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 234-241. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-19>

Problem description. Climate studies today attract the attention of researchers, government officials, and civil society organizations. They cover a wide range of issues from the causes to the consequences of climate change, aimed at joint solutions to environmental protection, conservation, and sustainable use of natural resources within the framework of achieving sustainable development goals (SDGs) [6].

Human activity is identified as the main factor in climate change and its negative consequences.

Understanding this is key to the necessity of environmental protection, conservation, and the sustainable use of resources.

Air and soil, as well as any other terrestrial and astrophysical body, is characterized by an important scalar physical quantity - temperature, which is constantly changing in the Cartesian coordinate system of calculation. Thus, the air temperature near the Earth's surface varies from 58.1 °C (tropical deserts) to -88.3 °C (Antarctica), and depending on the height, it usually decreases to 10-17 km, then in-

creases to Heights of 50-55 km and then decreases again and so on [2, 7-9].

As a rule, temperature is the kinetic energy of moving atoms or molecules. Therefore, the increase in energy of the atoms during heating is easy to detect by touching the other end of the iron rod. Under normal conditions ($P=1$ atmosphere, $t=0$ °C) the number of gas molecules in 1cm³ volume (N_L , which is called Loschmid's number) is determined by the following equation [1, 3-4].

$$N_L = \frac{N_A}{V_m} = 2,68 \times 10^{19}, \quad (1)$$

where N_A – is Avogadro's constant ($N_A = 6,02214129 \times 10^{19}$), V_m – volume of 1 mol material.

The role and importance of temperature as an indicator of climate change is extremely important in evaporation, flow formation, melting and elimination of ice phenomena, thermal and moisture circulation, occurrence of frosts and droughts, desertification and many other processes [7-8, 13, 22-24]. On the other hand, the patterns of the possible spatiotemporal distribution of temperature in the context of modern climate changes, which are associated with periodic and non-periodic fluctuations in the density of heat flows reaching the environment, should be taken into account in the efficient use and conservation of water resources, including the problems of water consumption of agricultural crops, crop and yield formation within the solution.

Temperature is a physical quantity that characterizes the amount of heating of bodies, which entered science with the subjective feeling of a person with the concepts of hot and cold [4]. Because of this, the feeling of temperature was subjective and could be misleading. So, for example, a metal object in a room appears colder than a wooden object, even though they are in the same conditions of thermodynamic thermal equilibrium. And it is better not to try to determine the temperature of molten metal and liquid nitrogen by touch. That is why the modern problem of a clear definition of temperature as a physical quantity is very important.

Taking into account the above, the aim of the work is to give the most modern and reasonable definition of temperature, as well as to evaluate the patterns of possible spatiotemporal distribution of air temperature in the territory of Armenia.

Material and methods. In order to solve the presented problems, the relevant scientific studies served as a theoretical and informative basis [1, 17-18]. Actual data of temperature observations of meteorological stations of "Hydrometeorology and Monitoring Center" of RA Ministry of Environment, climate bulletins and chronicles were used as initial data sources [5].

Mathematical-statistical, analysis, correlation methods, fundamental laws of modern physics were used in the work.

Results and discussion. First, let's try to answer the question, what is temperature? Modern physics can answer this question in two ways: statistical (from the point of view of molecular kinetic theory) and thermodynamic.

a) Definition of temperature from the point of view of molecular kinetic theory. The basic equation of molecular theory for the pressure of an ideal gas can be expressed in the following form $P = \frac{2}{3} n \frac{\overline{mv^2}}{2}$ [4,5]. If $\frac{2}{3} n \frac{\overline{mv^2}}{2}$ relation express by θ , then the pressure of an ideal gas can be expressed as $P = n\theta$, where θ is the ideal gas temperature in Joules. Therefore, in order to express the temperature in degrees, a correction factor must be added to θ , which will replace the unit of energy with the unit of temperature. On the other hand, according to the molecular kinetic theory is $\frac{\overline{mv^2}}{2} = \frac{3}{2} KT$, where K is Boltzmann's constant, $\overline{v^2}$ is the root-mean-square velocity and T is the absolute temperature. Since kinetic energy is only positive, temperature measured on the Kelvin scale is also positive ($T > 0$) and is called absolute temperature. Therefore, it turns out that temperature and pressure are determined by the average kinetic energy of thermal motion of molecules, since they are statistical quantities. For example, expressions for temperature or pressure of one or more molecules are meaningless. It follows from this that it would be more correct to present the temperature in the form of thermodynamic parameters, because it cannot be measured in any way and it makes no sense to talk about the temperature of a single particle.

From the point of view of molecular kinetic theory, it follows from such a definition of temperature that $T=0$ corresponds to the cessation of the thermal movement of molecules, which is impossible from the point of view of quantum physics: when the temperature tends to absolute zero, the average energy of the molecule does not tend to zero, but tends to a certain minimum energy value. Therefore, absolute zero temperature equates to the minimum internal energy of the system.

b) Definition of temperature in terms of distribution of energy levels of molecules (atoms). According to the Boltzmann distribution law [1, 3].

$$\frac{n}{n_0} = \exp(-E/kT) \quad (2)$$

where $\frac{n}{n_0}$ ratio is the fraction of molecules or atoms whose energy is greater from kT by E , k – is Boltzman constant. The logarithm of (2) expression is:

$$\ln \frac{n}{n_0} = -\frac{E}{kT} \text{ or } \ln \frac{n_0}{n} = \frac{E}{kT} \Rightarrow, T = \frac{E}{k \ln \frac{n_0}{n}} \quad (3)$$

It follows from equation (3) that body temperature is determined by the number of excited molecules or atoms per unit volume. Such a definition of temperature, in contrast to the above, is, in our opinion, relatively simple and somewhat complete.

c) Now let's try to give the general modern formulation of temperature. It turns out that the two properties of temperature listed above are simultaneously satisfied by the inverse of the derivative of entropy with respect to internal energy at constant volume (S'): That quantity is called temperature.

$$T = \frac{1}{S'}, \quad (4)$$

where $S' = \left(\frac{\Delta S}{\Delta U}\right)_{V=const}$, therefore

$$T = \left(\frac{\Delta U}{\Delta S}\right)_{V,N=const} : \quad (5)$$

For any body at constant volume, as the internal energy increases, entropy also increases, as a result of which the absolute temperature of all bodies is positive. ($T > 0$):

Let us show that the absolute temperature satisfies the two properties defined above.

To prove definition I, consider a closed system consisting of two bodies- U_1, S_1, T_1 и U_2, S_2, T_2 physical parameters. As a result of heat exchange, the internal energy and entropy of each of the bodies will change, so $\Delta U_1 = -\Delta U_2$ and the entropy of the complete system increases.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 > 0 \quad (6):$$

From the definition of temperature (see formulas [4] and [5]) it follows that

$$\Delta S_1 = \frac{\Delta U_1}{T_1} \text{ and } \Delta S_2 = \frac{\Delta U_2}{T_2} = -\frac{\Delta U_1}{T_2}, \quad (7)$$

and

$$\Delta S = \frac{\Delta U_1}{T_1} - \frac{\Delta U_1}{T_2} = \Delta U_1 \left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right): \quad (8)$$

As $\Delta S > 0$, then $U_1(T_1 - T_2) > 0$: For example, if the first body has a lower temperature than the second ($T_2 > T_1$), then in the process of heat exchange it will receive, and the second body will give that energy and vice versa, if $T_1 > T_2$, then $\Delta U_1 < 0$, and $\Delta U_2 > 0$, which was required to be proved.

To prove definition II, consider again a closed system consisting of two bodies. At thermal equilibrium, the entropy of the system remains constant ($\Delta S = 0$). Putting that value in (8), we get $T_1 = T_2$, which was required to be proved.

Thus, temperature is the **main characteristic of thermal equilibrium**. All other parameters (for

example, pressure and volume) may have different (but constant) values in different parts of the system at thermal equilibrium. At constant volume

$$(\Delta U)_{v=const} = Q \quad (9)$$

therefore from (5) it follows that $Q = T\Delta S$, which is the Clausius formula and is true only for non-closed systems.

The temperature is mainly measured with mercury and alcohol thermometers, whose operation is based on the phenomenon of thermal expansion of liquids. Other properties of bodies that depend on temperature can also be used to measure temperature [2]. Since temperature is the kinetic energy of molecules, it would be more natural to measure it in units of energy (Joules). However, temperature was measured long before the creation of the molecular-kinetic theory. Therefore, in practice, the temperature is expressed in a conventional unit - degree. In meteorology, air, soil, and water temperatures are commonly measured in units of SI (i.e., degrees Celsius ($^{\circ}\text{C}$)) in many countries of the world. As already mentioned, before the invention of the thermometer, people judged heat only by their immediate feelings: whether it is warm or breezy, hot or cold.

To measure the temperature in 1592 Galileo made a thermoscope. It was a glass sphere connected to a tube that was in water. And the first practical thermometer (alcohol in 1709, mercury in 1714) was made by the German physicist and glassmaker Fahrenheit in Amsterdam. He marked three points on the scale: 32°F (the freezing point of hydrochloric acid), 96°F (the temperature of the human body), and 212°F (the boiling point of water). According to that scale, 0°C corresponds to 32°F , 100°C to 212°F , that is, 100°C on the Celsius scale corresponds to 180°F , $1^{\circ}\text{F} = 100/180^{\circ}\text{C} = 5/9^{\circ}\text{C}$, $1^{\circ}\text{C} = 9/5^{\circ}\text{F}$. Until the 70s of the 20th century, this scale was used mainly in English-speaking countries, and in the United States until now.

Celsius scale thermometers are widely used in the world. In 1742 Swedish physicist and astronomer A. Celsius introduced the 100°C temperature scale, where zero degrees (0°C) is the temperature of melting ice, and one hundred degrees (100°C) is the temperature of boiling water. Degree Celsius ($^{\circ}\text{C}$) is accepted as a unit of temperature on the Celsius scale. The relationship between Fahrenheit (t_F) and Celsius (t) temperatures can be expressed by the following equation (table 1):

$$t_F = 32 + \frac{9}{5}t, \text{ or } t = \frac{5}{9}(t_F - 32): \quad (10)$$

In addition to the Celsius scale, the Kelvin scale (absolute or thermodynamic temperature scale) is also widely used. According to this scale, the calculation starts at absolute zero, which corresponds

Table 1

The relationship between temperatures expressed on different scales [2]

Name of scale-bar	The relationship between other and Celsius temperatures	The relationship between Celsius and other scale temperatures
Fahrenheit (°F)	$[^{\circ}\text{F}] = [^{\circ}\text{C}] \times 9/5 + 32$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{F}] - 32) \times 5/9$
Kelvin (K)	$[^{\circ}\text{K}] = [^{\circ}\text{C}] + 273,15$	$[^{\circ}\text{C}] = [^{\circ}\text{K}] - 273,15$
Renkin (°R)	$[^{\circ}\text{R}] = ([^{\circ}\text{C}] + 273,15) \times 9/5$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{R}] - 491,67) \times 5/9$
Delil (°De)	$[^{\circ}\text{De}] = (100 - [^{\circ}\text{C}]) \times 3/2$	$[^{\circ}\text{C}] = 100 - [^{\circ}\text{De}] \times 2/3$
Newton (°N)	$[^{\circ}\text{N}] = [^{\circ}\text{C}] \times 33/100$	$[^{\circ}\text{C}] = [^{\circ}\text{N}] \times 100/33$
Reomur (°Ré)	$[^{\circ}\text{Ré}] = [^{\circ}\text{C}] \times 4/5$	$[^{\circ}\text{C}] = [^{\circ}\text{Ré}] \times 5/4$
Romer (°Rø)	$[^{\circ}\text{Rø}] = [^{\circ}\text{C}] \times 21/40 + 7,5$	$[^{\circ}\text{C}] = ([^{\circ}\text{Rø}] - 7,5) \times 40/21$

to the complete cessation of thermal motion of molecules, that is, it is the lowest possible temperature. On the Celsius scale, it corresponds to $-273,15^{\circ}\text{C}$ (in practice, it is accepted as -273°C). In honor of the English physicist Kelvin, Kelvin (K) is accepted as a temperature unit on that scale: $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$. On the Kelvin scale (absolute) temperature can only be positive (above absolute 0). The relationship between temperatures expressed in Kelvin (T) and Celsius (t) scales can be expressed by the following equation (ref. 1):

$$T = 273,15 + t \text{ or } T = 273,15(1 + \alpha t), \quad (11)$$

where α is the volume expansion coefficient of air: $\alpha = 1/273,15 \approx 0,00366\text{ K}^{-1}$:

In the 18th century, a scale of 150 degrees was used in Russia, which was prepared by O.N. By Delilah. Later, until 1920 it was replaced by the French Reaumur and then the Celsius scales. In 1730, the French scientist Rene Antoine Reomure suggested using a scale of 0 to 80 degrees, which is not currently used. On that scale, the unit of temperature is the degree Rheomure (°Ré): $1^{\circ}\text{Ré} = 1,25^{\circ}\text{C}$.

A highly accurate, efficient and sensitive inductive method of temperature measurement is also proposed to measure temperature.

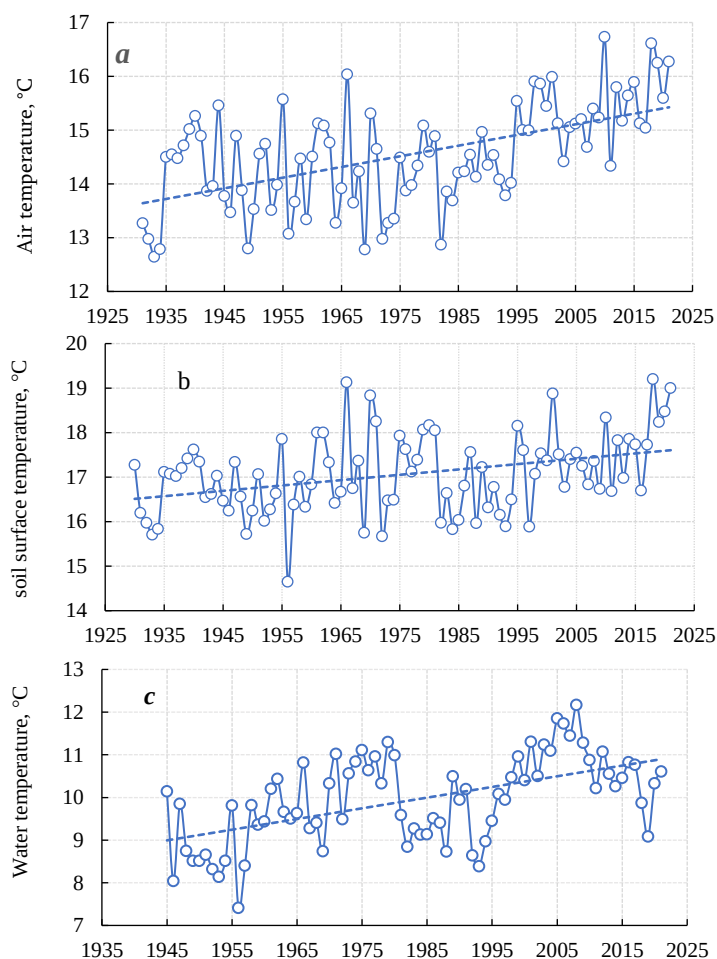


Fig. 1. Dynamics of annual average values of air (a), soil surface (b) and water temperature. Meghri meteorological station, r. Meghriget – p. Meghri

The Celsius and Fahrenheit scales used in everyday life are not absolute. Therefore, they are not suitable for use in certain conditions where the temperature drops below the freezing point of water and it is necessary to express it as a negative number. In that case, absolute temperature scales, Kelvin and Rankine, are used. The start of the count for both is zero. However, if $1\text{ K} = 1^{\circ}\text{C}$, then $1^{\circ}\text{R} = 1^{\circ}\text{F}$.

Statistics show that, not only in our republic [10-12], but also in different regions of the planet Earth [7, 13, 16, 20-22] there is a tendency of the air temperature to increase significantly. Fig. 1 shows as an example the multi-year change of annual average values of air (a) and soil surface (b) temperature with the example of Meghri meteorological station. The absolute maximum temperature of our republic was recorded in Meghri, which was $43,7^{\circ}\text{C}$ and was observed in 2011. on July 31. During the entire period of its operation (1931-2021), annual air temperature increase of about $1,78^{\circ}\text{C}$ was observed in Meghri. An increasing trend is also observed in the water level of the Meghri River (c).

As a result of the change in air temperature, many positive and negative natural and socio-economic consequences are observed, which require complex and detailed studies. The result of the latter will be the quantum development of effective

measures of adaptation to the effects of temperature changes, the key to the solution of which should be complete and regulated by the mathematical predictions of the laws of quantum physics.

Conclusions. Based on the results of the work performed, the following conclusions can be drawn.

Temperature is a quantity characterizing the thermal state and radiation of the terrestrial and celestial bodies and, in general, the environment, which is strongly related to the entropy change of the system. Temperature is the main thermodynamic characteristic of thermal equilibrium, the thermodynamic and microscopic concepts of temperature coincide, the temperature-heat (energy) difference becomes known in the sense that a system can have high energy but low temperature. Energy depends on the geometry (dimensions) of the system, but temperature does not.

In the territory of the Republic of Armenia, a trend of increasing air temperature is observed, which is also a result of the entropy change of the system. It can be changed very quickly, depending on the process of disruption of excessive permissible norms of environmental factors in the given area, which currently needs separate serious research.

Bibliography

1. Bohren, Craig F., Bruce A. Albrecht (2023). *Entropy. Atmospheric Thermodynamics*, 2nd edn. Oxford, online edn, Oxford Academic. 229-284. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198872702.003.0004>
2. Варданян Т.Г., Маргарян В.Г. Метеорологія і кліматологія: навч. посіб. для вишів. Єреван: Вид-во «Астхик Гратун», 2014. 532 с. (вірменською мовою).
3. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Донецьк: ДонНТУ, 2009. 224 с.
4. Заболотний В.Ф., Мисліцька Н.А., Пасічник Ю.А. Фізичні величини. Закони: навч. посіб. Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2007. 56 с.
5. Кліматичний щорічник. Том I. Температура повітря і ґрунту. Єреван, 2011. 150 с. (вірменською мовою).
6. UNDP. Climate action. <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku/climate-action>
7. Cai, Z., You, Q., Wu, F., Chen, H. W., Chen, D., Cohen, J. (2021). Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties. *Journal of Climate*. 34. (12). 4871-4892. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>
8. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability* / H.-O. Pörtner et al., Eds. (Cambridge University Press, 2022).
9. Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective / Herring S. C. et al. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2018. № 99. PP. 1–157.
10. Margaryan V., Tsibulskii G., Raevich K. About the features of the time course of the average annual air temperature in the territory of the Debed river basin (Armenia) // E3S Web of Conferences, Volume 223 (2020), id. 03009. *Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020)*, 2020.
11. Margaryan V.G. Assessment of the features of extreme low temperatures of the surface air layer in the lake Sevan basin (Armenia) // *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 2020, № 3. С. 52–64.
12. Margaryan V., Sedrakyan A., Sayadyan H., Reshetchenko S., Dmitriiev S. Modern changes in climatic characteristics and winter minimum average monthly runoff in the basin of lake Sevan // *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, 2023, № 59. С. 178-189. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-13>
13. Mathieu Van Vyve. Identifying when thresholds from the Paris Agreement are breached: the minmax average, a novel smoothing approach. *Oxford Open Climate Change*. 2024. Vol. 4. Iss. 1. 1-10. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae009>

14. Sedrakyan A., Margaryan V., Reshetchenko S., Dmitriev S. Physical meaning of temperature and evaluation of distribution laws (in the area of the lake Sevan basin) // *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*. 2023. № 58. С. 231-240. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-18>
15. Седракян А.М. Про квантову фізику. Частина I. Єреван: Архітектор, 2021. 167 с. (вірменською мовою).
16. Савчук С. В., Тимофеев В. Є., Ювченко Н. М. Районування України по вплив екстремальних значень максимальної температури повітря у теплий та холодний періоди року // *Український гідрометеорологічний журнал*, 2018. Вип. 22. С. 46-56. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.05>.
17. Фізика. Механіка. Молекулярна фізика й термодинаміка: навч. посіб. / А. Г. Бовтрук, Ю. Т. Герасименко, О. В. Грідякіна [та ін.]. К.: НАУ, 2017. 416 с.
18. *Physics. Module 2. Molecular Physics and Thermodynamics: manual* / A. G. Bovtruk, S. L. Maximov, S. M. Menaylov, A. P. Vyala, A. P. Polischuk. 2nd edition. K.: National Aviation University "NAU-DRUK" Publishing House, 2010. 152 p.
19. Martin Gameli Akakpo, Hayford Alufar Bokpin, Sylvia Hagan. (2024). Pro-environmental behavior: the relationship with information literacy self-efficacy, climate knowledge and climate anxiety among students in Ghana // *Oxford Open Climate Change*. Vol. 4. Is. 1. 1-7. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae015>
20. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., et al. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ*, 2022. 3. 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
21. Ron Baiman, Sev Clarke, Clive Elsworth, Leslie Field, Michael MacCracken, John Macdonald, David Mitchell, Franz Dietrich Oeste, Suzanne Reed, Stephen Salter, Herb Simmens, Ye Tao, Robert Tulip. Addressing the Urgent Need for Direct Climate Cooling: Rationale and Options. *Oxford Open Climate Change*, 2024. 1-77. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae014>
22. Reshetchenko S. Dmitriev S., Cherkashyna N., Goncharova L. Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psol river basin) / S. Reshetchenko, S. Dmitriev, N. Cherkashyna, L. Goncharova // *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 2020. № 53. С. 176-189. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
23. Reshetchenko S., Dmitriev S., Boryskina E., Hrekova E. Climate monitoring as an indicator of the state of natural landscapes/ *Proceedings of the YCU C: Geological and geographical Sciences*, 2023. Vol. 57 (3). С. 264-267. https://journals.ysu.am/index.php/proceedings-geol-geogr/issue/view/vol57_no3_2023
24. Reshetchenko S., Tkachenko T., Dmitriev S., Margaryan V. Peculiarities of changes in moisture conditions on the territory of Ukraine / *Proceedings of the YCU: Geological and Geographical Sciences*. 2023. Vol. 57 (1-2). С. 20-29. <https://doi.org/10.46991/pysu:c/2023.57.1%e2%80%9320>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Bohren, Craig F., Bruce A. Albrecht (2023). *Entropy. Atmospheric Thermodynamics*, 2nd edn. Oxford, online edn, Oxford Academic. 229-284. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198872702.003.0004>,
2. Vardanian, T.G., Margaryan, V.G. *Meteorology and climatology*. (2021). Textbook for High Schools. Yerevan, Publishing house «Astghik Gratun». 532. [in Armenian]
3. Volkov, O.F., Lumpieva, T.P. (2009). *Physics course: In 2 vols. T.1: Physical foundations of mechanics. Molecular physics and thermodynamics. Electrostatics. Direct current. Electromagnetism: Study guide for students of engineering specialties of higher educational institutions*. Donetsk: DonNTU. 224. [in Ukrainian]
4. Zabolotnyi, V.F., Myslitska, N.A., Pasichnyk, Yu.A. (2007). *Physical quantities. Laws: education manual Ternopil: Educational book – Bohdan*. 56. [in Ukrainian]
5. *Climatic handbook*. (2011). Part 1. Air and soil temperature. Yerevan, 150. [in Armenian].
6. UNDP. Climate action. <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku/climate-action>
7. Cai, Z., You, Q., Wu, F., Chen, H. W., Chen, D., Cohen, J. (2021). Arctic warming revealed by multiple CMIP6 models: evaluation of historical simulations and quantification of future projection uncertainties. *Journal of Climate*, 34 (12), 4871-4892. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0791.1>
8. Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. H.-O. Pörtner et al., Eds. Cambridge University Press, 2022.
9. Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective (2018). Herring S. C. et al. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 99, 1–157.
10. Margaryan, V., Tsibulskii, G., Raevich, K. (2020). About the features of the time course of the average annual air temperature in the territory of the Debed river basin (Armenia). *E3S Web of Conferences*, 223, 03009. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020).
11. Margaryan, V.G. (2020). Assessment of the features of extreme low temperatures of the surface air layer in the lake Sevan basin (Armenia). *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 3, 52–64.

12. Margaryan, V., Sedrakyan, A., Sayadyan, H., Reshetchenko, S., Dmitriiev, S. (2023). Modern changes in climatic characteristics and winter minimum average monthly runoff in the basin of lake Sevan. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 178-189. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-13>
13. Mathieu, Van Vyve, (2024). Identifying when thresholds from the Paris Agreement are breached: the minmax average, a novel smoothing approach. *Oxford Open Climate Change*, 4, 1, 1-10. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae009>
14. Sedrakyan, A., Margaryan V., Reshetchenko S., Dmitriiev, S. (2023). Physical meaning of temperature and evaluation of distribution laws (in the area of the lake Sevan basin). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 231-240. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-18>
15. Sedrakyan, A.M. (2021). *Around Quantum Physics, Part I*. Yerevan Engineer, 167. [in Armenian]
16. Savchuk, S.V., Timofeev, V.E. Yuvchenko, N.M. (2018). Zoning of Ukraine according to the influence of extreme values of maximum air temperature in warm and cold periods of the year. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 22, 46-56. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.05> [in Ukrainian]
17. *Physic. Mechanics. Molecular physics and thermodynamics: study guide for students* (2017). A.G. Bovtruk, Yu.T. Gerasimenko, O.V. Hrydyakina [et al.]. K., NAU, 416. [in Ukrainian]
18. *Physics. Module 2. Molecular Physics and Thermodynamics: manual* (2010). A. G. Bovtruk, S. L. Maximov, S. M. Menaylov, A. P. Vyala, A. P. Polischuk. 2nd edition. K., National Aviation University "NAU-DRUK" Publishing House, 152.
19. Akakpo, M.G., Bokpin, H.F., Hagan, S. (2024). Pro-environmental behavior: the relationship with information literacy self-efficacy, climate knowledge and climate anxiety among students in Ghana. // *Oxford Open Climate Change*, 4, 1, 1-7. [kgae015, https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae015](https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae015)
20. Rantanen, M., Karpechko, A.Y., Lipponen, A. et al. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ*, 3, 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
21. Baiman, R., Clarke, S., Elsworth, C., Field, L., MacCracken, M., Macdonald, J., Mitchell, D., Oeste, F., O., Reed, S., Salter, S., Simmens, H., Tao, Y., Tulip, R. (2024). Addressing the Urgent Need for Direct Climate Cooling: Rationale and Options. *Oxford Open Climate Change*, 1-77. <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgae014>
22. Reshetchenko, S., Dmitriiev, S., Cherkashyna, N., Goncharova, L. (2020). Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyl river basin). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (53), 176-189. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
23. Reshetchenko, S., Dmitriiev, S., Boryskina, E., Hrekova, E. (2023). Climate monitoring as an indicator of the state of natural landscapes/ *Proceedings of the YCU: Geological and geographical Sciences*, 57 (3), 264-267. https://journals.ysu.am/index.php/proceedings-geol-geogr/issue/view/vol57_no3_2023
24. Reshetchenko, S., Tkachenko, T., Dmitriiev, S., Margaryan, V. (2023). Peculiarities of changes in moisture conditions on the territory of Ukraine / *Proceedings of the YCU: Geological and Geographical Sciences*, 57 (1-2), 20-29. <https://doi.org/10.46991/pysu:c/2023.57.1%e2%80%9320>

Можливе визначення температури та ймовірного просторово-часового розподілу температури повітря на території Республіки Вірменія

Вардуй Маргарян¹

к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та гідрометеорології,

¹ Єреванський державний університет, Єреван, Вірменія;

Армен Седракян²

к. фіз.-мат. н., доцент кафедри фізики,

² Національний політехнічний університет Вірменії, Єреван, Вірменія;

Світлана Решетченко³

к. геогр. н., доцент кафедри фізичної географії та картографії,

³ Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Враховуючи, що температурні показники відіграють важливу роль як індикатор кліматичних змін, впливають на процеси випаровування, танення льодовиків, формування різних атмосферних явищ, як-то: посух, опустелювання, наводнень тощо. Кліматичні дослідження висвітлюють широкий спектр питань від причин до наслідків та адаптацій до змін клімату, що спрямовані на спільні вирішення проблем захисту довкілля, охорони, раціонального використання природних ресурсів в рамках реалізації цілей сталого розвитку (SDGs). Для ефективного використання та збереження водних ресурсів, при вирішенні питань водоспоживання сільськогосподарськими культурами, формування та підвищення врожаю доцільно враховувати закономірності можливого просторово-часового розподілу температурних показників, пов'язаних як з періодичними, так і неперіодичними коливаннями щільності теплових потоків, що впливають на природне середовище. У роботі розглядається температура як фізична величина, що характеризує ступінь нагрівання тіла. Сучасні фізичні дослідження описують температуру як з термодинамічної точки зору, так і статистичної, відповідно до молекулярно-кінетичної теорії,

що характеризує середню кінетичну енергію теплового руху молекул та вимірюється за шкалою Кельвіна. У метеорології багатьох країн світу температура повітря, ґрунту та води зазвичай вимірюється в одиницях СІ, а саме в градусах Цельсія (°C). Використовуючи дані рядів спостережень за температурою повітря та ґрунту на метеостанції Мегрі «Центру гідрометеорології і моніторингу» ГНКО Міністерства навколишнього середовища Республіки Вірменія, аналізувалися закономірності та особливості просторово-часового розподілу температури повітря за період 1931-2021 рр. Встановлена тенденція до зростання температури повітря на досліджуваній території. Так, на прикладі метеостанції Мегрі визначено абсолютний максимум температури повітря 31 липня 2011 року, що становив 43,7 °C. За весь період спостереження фіксувалося річне підвищення температури повітря приблизно на 1,78 °C. Крім того, відзначається тенденція до зростання рівня води в річці Мегрі. Тенденцію до підвищення температурних показників можна розглядати як результат зміни ентропії системи. Ця тенденція може швидко змінюватися в залежності від впливу надмірних екологічних факторів на певній території, що вимагає окремого та ґрунтовного дослідження. Отже, зміна температурних показників призводить до виникнення численних як позитивних, так і негативних природних, соціально-економічних наслідків, які вимагають всебічного та глибокого дослідження.

Ключові слова: температура, температурна шкала, температура повітря, термодинаміка, ентропія, потепління, просторово-часовий розподіл, цілі сталого розвитку (ЦСР), Республіка Вірменія.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 12 вересня 2024 р.

Прийнята 27 жовтня 2024 р.

Міський розвиток, заснований на знаннях: можливості для Львова як міста знань

Наталія Провотар¹

к. геогр. н., доцент кафедри економічної та соціальної географії,

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

e-mail: provotarnat@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-2211-6509>;

Христина Щурик^{1,2}

магістрантка кафедри економічної та соціальної географії;

гол. спеціаліст управління просторового планування

департаменту архітектури та просторового розвитку,

² Львівська міська рада, Львів, Україна,

e-mail: khrystyna.shchuryk@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-2424-138X>;

Костянтин Мезенцев¹

д. геогр. н., професор, завідувач кафедри економічної та соціальної географії,

e-mail: mezentsev@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0003-1974-7860>

Концепція міського розвитку, заснованого на знаннях, передбачає інтегрований розвиток міста через імплементацію знань в усі сфери його функціонування від економіки і соціального розвитку до захисту довкілля і просторового розвитку, а також формування особливого типу міст – міста знань. Методологія дослідження є багатоаспектною і базується на вивченні просторово-планувальної документації, нормативно-правової бази, аналізі статистичних показників чисельності населення, якості життя мешканців, міського бюджету, а також проведенні експертних інтерв'ю. Сформовано концептуальні засади впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях, у Львові та запропоновано пріоритетні напрями розвитку Львова як міста знань, а саме: розвиток як глобального центру виробництва знань, формування конкурентоспроможної стійкої економіки знань, створення збалансованого якісного середовища знань для приваблення кваліфікованих мешканців та формування суспільства знань. У контексті Львівського ІТ кластера виявлено, що наразі це є кластерна ініціатива, оскільки відсутня просторова локалізація сформованого ІТ-кластера в місті, а його основний вплив на розвиток міста проявляється у сфери сфери, забезпеченні технологій, підтримці ІТ-освіти. Наразі цього впливу недостатньо для того, щоб стати рушієм міського розвитку Львова, заснованого на знаннях. В основу просторового розвитку Львова, заснованого на знаннях, пропонується покласти модель, яка передбачає створення дев'яти зон знань (центральної, освітньої, освітньо-технологічної, технологічної, чотирьох промислових та медичної), що формуються на основі мережі центрів, налагодженні зв'язків між зонами і створенні головної осі міського розвитку, заснованого на знаннях. Впровадження такого підходу сприятиме збалансованому розвитку Львова, посиленню ролі міста на національному та глобальному рівні, формуванню бренду Львова як сучасного інноваційного міста. У перспективі це може створити якісний приклад для інших українських міст, забезпечуватиме впровадження знань та стимулюватиме інноваційний розвиток України.

Ключові слова: місто, міський розвиток заснований на знаннях, інноваційний розвиток, ІТ кластер, місто знань, зона знань, Львів, Україна.

Як цитувати: Провотар Наталія. Міський розвиток, заснований на знаннях: можливості для Львова як міста знань / Наталія Провотар, Христина Щурик, Костянтин Мезенцев // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 242–249. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-20>

In cites: Provotar Nataliia, Shchuryk Khrystyna, Mezentsev Kostyantyn (2024). Knowledge-based urban development: opportunities for Lviv as a knowledge city. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 242–258. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-20> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Дати чітке визначення терміну «місто» не можливо, адже його сутність є настільки багатогранною, що пояснити її декількома словами складно. Загалом же, можна сказати, що місто – це місце найбільшої концентрації влади та культури спільноти [20]. Основою функціонування міста є населення, яке формує та розвиває його. Важливим є те, що не лише мешканці формують міста, а й міста формують громаду [9]. Міста дають нам змогу працювати і відпочивати разом, і тому їхній успіх залежить від попиту на фізичний зв'язок [10]. Можна сказати, що саме здібні й талановиті лю-

ди є ключем до розвитку і процвітання міст та регіонів [6]. Відповідно, головним завданням міського розвитку є створення комфортного середовища для його мешканців.

Університети та ІТ-кластери є самостійними важливими акторами міського розвитку і мають комплексний вплив на просторову, соціальну, економічну, екологічну, інституційну його складові. Наразі роль університетів посилюється та трансформується [23], вони впливають на функціонування міста загалом, на міське управління, публічні простори [3], відносини між університетом і містом стають багатогранними і мають

різні, але взаємопов'язані фізичні, соціальні, економічні та культурні виміри [11]. ІТ-компанії можуть забезпечувати рішення для цифровізації міського розвитку, наукові лабораторії – впроваджувати різні заходи щодо адаптації до змін клімату тощо. Успішні компанії та вдала промоція здатні зробити такі міста популярними туристичними дестинаціями, що сприяє диверсифікації міської економіки. Окрім цього, формується об'єднана спільними інтересами громада з освічених, активних, відповідальних мешканців, що сприяє розвитку міста та формуванню його ідентичності [3].

Отже, для того, щоб залишатися конкурентоспроможними, міста потребують впровадження нових сталих креативних форматів економічного розвитку із наданням пріоритету розвитку інновацій, високих технологій тощо. Саме таким підходом є міський розвиток, заснований на знаннях, в основі якого лежить концептуалізація інноваційного розвитку через надання пріоритету інтелектуальному капіталу. Цей підхід забезпечує комплексний розвиток завдяки сформованій базі знань, економіці знань, що дозволяє містам формувати комфортне середовище, а також суспільство знань. Це одна з найсучасніших концепцій, що передбачає інтегрований розвиток міста через імплементацію знань в усі сфери його функціонування: від економіки до захисту довкілля, соціального розвитку, інтенсивного просторового розвитку, в результаті чого формується особливий тип міст – міста знань. Саме модель міст знань наразі є однією з тих, які найефективніше дозволяють забезпечувати сталий міський розвиток.

Актуальним цей підхід є і для України, де міста вимушені не лише швидко відновлюватись, а якісно розвиватися, щоб показувати свою стійкість. І саме міський розвиток, заснований на знаннях, може стати ефективним шляхом для подолання сучасних викликів українських міст.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зважаючи на складність та розмаїття міст, існують різні підходи до бачення моделей та стратегій міського розвитку. Оскільки міський розвиток є динамічним явищем, вони змінюються відповідно до вимог часу. Так, у 20 ст. на міста чинився сильний тиск з метою їх пристосування до потреб швидко зростаючої виробничої діяльності, що призвело до розповзання міст та низки соціальних і екологічних проблем. Наразі завдяки процесам терціаризації, деіндустріалізації зростає значення нематеріальних форм капіталу, зокрема інтелектуального, що посилює одну з найважливіших історичних ролей міста – бути центром виробництва знань [13]. У міру того, як суспільство стає все більш орієнтованим на

знання, технологічний прогрес починає розглядатися як головний союзник у боротьбі з екологічною та соціально-економічною кризами [29].

З цього контексту впливає нова модель міського розвитку. Michelam та ін. акцентують увагу на тому, що поєднання вимірів розумного та сталого розвитку міст потребує рішень, розроблених на місцевому рівні, впровадження інтегрованого та збалансованого стратегічного міського планування. Стратегічною основою, що може відповісти на ці вимоги, вони вбачають міський розвиток, заснований на знаннях (МРЗЗ) [19]. Зважаючи на те, що теоретичні засади концепції МРЗЗ почали формуватися лише наприкінці 20 – початку 21 ст., єдиного вичерпного визначення немає. Один з найпоширеніших підходів визначає МРЗЗ як імплементацію територіальних об'єднань, що спеціалізуються на виробництві технологій та інновацій і утворюють у міському просторі наукові, технологічні, академічні, культурні та інноваційно-інтенсивні кластери, які діють як двигуни економічної продуктивності. Ними можуть бути технологічні парки, інноваційні райони, науково-технологічні коридори тощо. Прикладами впровадження такого підходу є Кремнієва долина в Каліфорнії, East London Tech City або @22 в Барселоні [5].

Якщо вищезгаданий підхід акцентує увагу на економічному розвитку крізь призму інновацій, то інший поширений підхід базується на концепції креативного класу Р. Флориди. Розвиток міст у постіндустріальний період супроводжується розвитком креативного класу, який здатний продукувати нові творчі ідеї, нові послуги, технології [22]. Відповідно, основною метою МРЗЗ його прихильники вбачають приваблення до міст висококваліфікованих фахівців у галузях менеджменту, підприємництва, мистецтва, біологічних та прикладних соціальних наук, архітектури, інженерії тощо [19]. Як зазначають Yigitcanlar, O'Connor та Westerman, саме талановиті працівники сфери знань забезпечують успішний МРЗЗ, а їх підготовка, приваблення та утримання дозволяє будувати засновану на знаннях основу розвитку міста, стимулювати створення нових бізнесів [31].

Однак, наразі вже є розуміння того, що міський розвиток, заснований на знаннях, є концепцією, яка значно ширше охоплює сфери функціонування міста і передбачає не лише створення технологічних парків чи приваблення кваліфікованих мешканців, а впровадження підходів, заснованих на знаннях, в усіх аспектах міського розвитку. Тобто, як наголошують Michelam та ін., застосування концепції МРЗЗ полягає у впровадженні багатовимірної стратегії трансформації, яка віддає належну увагу всім аспектам

збалансованого міського життя, включаючи екологічні, економічні та соціальні виміри [19]. Sargillo та ін. відмічають, що парадигма МРЗЗ дозволяє подолати очевидне протиріччя між поняттями розумного/штучного/матеріального та сталого/природного/нематеріального, оскільки передбачає процес переходу від міської економічної культури, заснованої на споживанні, накопиченні та промисловому виробництві, до нової культури, що ґрунтується на колективному балансі цінностей [5]. Отже, аналіз останніх досліджень дозволяє стверджувати, що МРЗЗ є стратегічною основою, яка передбачає інтегрований підхід для сталого розвитку міста, а основа для досягнення цього балансу вбачається у використанні знань.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Концептуальні засади МРЗЗ формують загальний каркас стратегічного бачення розвитку міст. Натомість ті самі підходи можуть пояснювати формування одних міст знань і не давати відповіді на питання, чому інші за подібних умов не використовують потенціал знаннєсного розвитку. Тобто важливим є й розуміння локального контексту. Більшість концептуальних положень заснованого на знаннях міського розвитку ґрунтується на вивченні незначної кількості «модельних» міст, переважно розташованих у країнах Глобальної Півночі. Проте й інші міста можуть збагатити урбаністичні теорії та дискусії. У цьому відношенні варто вести мову про доцільність перевірки концепцій на нових кейсах і водночас виявлення нових, специфічних рис МРЗЗ внаслідок адаптації, «одомашнення» відповідних моделей.

Метою написання статті є пошук відповіді на такі дослідницькі питання: якими мають бути концептуальні засади впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях, у Львові; створення яких зон знань визначатиме просторовий розвиток Львова як міста знань?

Методичні основи дослідження. Дослідження міського розвитку Львова, заснованого на знаннях, проводилося у період з червня 2023 року по червень 2024 року. Для визначення концептуальних засад впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях, у Львові було проаналізовано просторово-планувальну документацію, нормативно-правову базу та показники чисельності населення, якості життя мешканців, міського бюджету за період 2011-2024 рр. з використанням порівняльно-географічного, порівняльно-статистичного та графічного методів дослідження. Для оцінки впливу кластерної ініціативи у Львові на розвиток міста, що проявляється у смартизації, забезпеченні технологіями, підтримці ІТ-освіти, а також оцінки здатності ІТ

кластера виконувати трансформаційну роль в імплементації міського розвитку, заснованого на знаннях, було використано метод експертних оцінок. У ролі експертів виступили 12 представників зі сфери міського управління, стратегічного і просторового планування, вищої освіти, молодіжної політики, технологічного кластера. Експертам було запропоновано дати відповіді на 8 запитань щодо оцінки наявної ситуації і перспектив розвитку Львова як міста знань. Для оцінки ситуації були поставлені питання щодо того, наскільки наявний розвиток Львова можна охарактеризувати як міський розвиток, заснований на знаннях; які структури, установи, компанії можуть бути драйверами розвитку Львова, заснованого на знаннях; чи виконує Львівський ІТ кластер роль ключового драйвера міського розвитку, заснованого на знаннях; як саме діяльність ІТ кластера сприяє міському розвитку, заснованому на знаннях, та чого не вистачає ІТ кластеру, щоб виконувати цю роль. Для розуміння перспектив експерти висловились щодо того, чи доцільно для Львова впроваджувати міський розвиток, заснований на знаннях, та які переваги/недоліки це може мати для міста; визначали пріоритетні напрями для імплементації у Львові міського розвитку, заснованого на знаннях; ідентифікували території Львова, які мають найбільші перспективи для міського розвитку, заснованого на знаннях. Була здійснена експертна оцінка значення запропонованого переліку характеристик розвитку Львова у контексті перспектив імплементації міського розвитку, заснованого на знаннях. Оцінка кожної складової із переліку здійснювалась за такими категоріями: сильна/слабка сторона (від -5 до -1 – слабка сторона; від 1 до 5 – сильна сторона); можливість/загроза (від -5 до -1 – загроза; від 1 до 5 – можливість); вплив відсутній (0). Результати експертної оцінки були представлені у форматі SWOT-аналізу, на основі якого визначались можливі сценарії розвитку міста. Узгодженість оцінок експертів щодо сильних/слабких сторін та можливостей/загроз впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях, у Львові визначалась за аналізом інтерквартільних розмахів графіка Box&Whiskers.

Виклад основного матеріалу дослідження. Концептуальні основи МРЗЗ базуються на чотирьох складових розвитку, заснованих на знаннях: економічній, соціальній, просторовій та інституційній [19]. Економічна складова МРЗЗ передбачає побудову економіки знань на міському рівні через розміщення ендегенних активів знань в центрі економічної діяльності, тобто розгляд знань як місцевого ресурсу для забезпечення економічного процвітання. Соціокультурна скла-

дова має на меті створення суспільства знань, яке досягає соціальної справедливості через людський і соціальний капітал, а також через різноманітність і незалежність, що формується завдяки покращенню знань і навичок мешканців задля підвищення індивідуального та суспільного розвитку. Просторова (еколого-урбаністична) складова забезпечує формування сталого середовища знань, яке сприяє збереженню, розвитку та інтеграції природних і культурних ландшафтів, побудові сильних просторових зв'язків між міським розвитком та зонами знань і водночас стимулюванню еко-дружнього, високоякісного, унікального і збалансованого розвитку. Інституційна складова формує засноване на знаннях управ-

ління, яке власне уможливило МРЗЗ. Воно спрямоване на демократизацію та гуманізацію знань, інституціоналізацію міждисциплінарних процесів колективного навчання, а також на об'єднання всіх стейкхолдерів для напрацювання спільного бачення стратегічного планування, організації різних активностей тощо [30].

Відповідно, концепція МРЗЗ передбачає функціонування кожної складової міського розвитку, базуючись саме на знаннях. Зважаючи на це, оцінка успішності міського розвитку, заснованого на знаннях, передбачає також комплексний підхід. Охарактеризувати рівень імплементації МРЗЗ можна за індикаторами (рис. 1).

Отже, успішний МРЗЗ передбачає: наявність



Рис. 1. Індикатори міського розвитку, заснованого на знаннях (розроблено авторами на основі [25]) / Fig. 1. Indicators of Knowledge-Based Urban Development (developed by the authors based on [25])

бази знань, яку забезпечують навчальні та науково-дослідні установи; економіку знань, що проявляється у високій частці сфери знань в структурі господарства; високу якість життя населення, яка забезпечує комфортні умови для приваблення висококваліфікованих працівників; культурне розмаїття, яке стимулюватиме креативний розвиток; високий рівень доступності, яка сприятиме поширенню знань та переміщенню кваліфікованих кадрів, товарів та послуг; інклюзивність і соціальну справедливість для мінімізації соціальної напруги; врахування масштабу міста, адже більші міста, як правило, пропонують більшу кількість і різноманітність знань та можливостей; ефективне управління для забезпечення функціонування всіх цих компонентів [27].

МРЗЗ є комплексним підходом, що передбачає розвиток багатьох сфер. Однак, МРЗЗ не можливий без бази знань, яка має постійно наповнюватися та оновлюватися для успішного функціонування таких міст. Насамперед, цю основу забезпечують університети, які розглядаються як критичні активи, фундаментальні інституції, які діють як центри знань, і є глибоко інтегрованими в системи підготовки, генерування, обміну, циркуляції та комерціалізації інновацій і знань [19]. Університети мають постійний активний потік студентів та дослідників, що створює передумови для генерування нових ідей та інноваційних проєктів [19].

З іншого боку, головним засобом МРЗЗ є економіка знань, виробництво якої забезпечуєть-

ся через стимулювання інноваційних галузей. Такі установи часто концентруються на окресленій території, формуючи зони знань. **Зони знань** визначаються як інтегровані центри генерації знань, навчання, комерціалізації та стилю життя, що створюються на основі партнерства між усіма рівнями влади, науково-освітньою спільнотою, приватним сектором, висококваліфікованими фахівцями та громадськістю [27]. У різних країнах зони знань називаються по-різному: науково-технічний кластер, високотехнологічний кластер, кластер знань, інноваційний кластер [28].

Інноваційні системи, які лежать в основі МРЗЗ, все частіше ґрунтуються на співпраці між державними управлінськими структурами, бізнесом та університетами. Це формалізовано в моделі потрійної спіралі, яка закладає основи економічного розвитку через інноваційну систему, керовану університетами [12].

Головною метою МРЗЗ є формування міст знань. **Місто знань** – це місто, яке розвивається на основі знань через стимулювання процесів управління знаннями, що досягається завдяки постійній взаємодії між мешканцями, компаніями, ІТ-кластерами, науковими парками, університетами в межах міста і поза ними та підтримується культурою поширення знань, відповідним міським плануванням, інфраструктурою та мережами ІТ-технологій [8]. Головною ознакою таких міст є *постійний потік знань*, який з лінійного трансформується в круговий через двосторонню взаємодію між постачальниками знань (освітніми і науково-дослідними установами) та їх споживачами (компаніями) [8]. Місто знань можна розглядати як парасолькову концепцію, яка фокусується на створенні знань та охопленні різних зон знань [28].

Оскільки кожне місто є унікальним, визначені концептуальні засади МРЗЗ формують лише рамковий підхід, тоді як його практична реалізація передбачає впровадження цих принципів у відповідності до умов конкретного міста для забезпечення збалансованого розвитку всіх його сфер.

Дослідження можливостей практичної реалізації концепції МРЗЗ здійснено на прикладі Львова, оскільки це одне з найбільших міст України, чисельність населення територіальної громади якого на 1 січня 2022 р. складала 777 тис. осіб і з початку повномасштабного вторгнення зросла на понад 150 тис. осіб [16]. При цьому Львів, на відміну від свого головного конкурента Києва, не має настільки великої кількості різноманітних функцій, видів економічної діяльності, великої території, що створює ряд викликів для розвитку міста, а в контексті цього дослідження ускладнювало б прогнозування

перспектив його розвитку як міста знань. Водночас, Львів завдяки близькості до кордону з ЄС в умовах війни є відносно безпечнішим, тому рівень невизначеності у місті є дещо нижчим, ніж у багатьох інших українських містах. Це дозволяє вже зараз будувати певні плани та прогнози і вести мову про можливий інноваційний розвиток міста. Окрім цього, важливим фактором обрання для дослідження саме Львова стала наявність найбільшого ІТ-кластера в Україні, який має перспективи бути каталізатором міського розвитку, заснованого на знаннях.

Власне, Львівський ІТ кластер був офіційно зареєстрований у 2011 р., ставши першим таким утворенням в Україні та задавши тренд іншим містам [15]. Передумовою формування ІТ кластера стало напрацювання Стратегії підвищення конкурентоспроможності міста Львова до 2015 року, яку було затверджено у 2010 р. і яка напрацьовувалася у співпраці з бізнесом та університетами. Варто зазначити, що саме ця стратегія вперше містила ідею розвитку Львова на основі формування кластерів. На той час пріоритетними були визначені туристичний та бізнес-кластер, який власне мав базуватися на аутсорсингу, тобто на розвитку ІТ-індустрії. Саме ці галузі за результатами дослідження виявилися найбільш конкурентоспроможними для міста [26].

Формування ІТ-кластера у Львові відбувалося з врахуванням того, що такі утворення зумовлюють кумулятивний ефект завдяки концентрації інноваційних компаній та установ на одній території, який досягається завдяки стимулюванню потоку знань та інновацій між учасниками кластеру, формуванню підприємницької екосистеми, яка сприяє перетворенню цих інновацій у стартапи, створенню комфортного середовища для роботи, яке забезпечує можливості для навчання, комунікації, пошуку інвесторів тощо [2]. Враховувалось і те, що, формування ІТ-кластеру передбачає концентрацію інноваційної активності на обмеженій території, що зумовлює диспропорції в розвитку між різними частинами міста [24], а також ІТ-кластер може впливати на просторовий розвиток міст таким чином, що інноваційні райони розміщуються на околицях через потребу значної території та нижчу вартість землі, а це може зумовлювати розповзання міста [18]. У тих районах міста, де розміщуються ІТ-кластери, на обмеженій території поєднуються різні компанії, виробництва, місця для проживання з соціальною інфраструктурою, освітні заклади тощо, тому такі райони фактично розвиваються за концепцією «міста в місті», тут підвищується зв'язність та доступність [1]. Часто це супроводжується джентрифікацією, хоча в перспективі можливе поширення позитивних транс-

формацій і на сусідні території, однак цей процес є тривалим, натомість на початку вираженою є соціально-просторова сегрегація [4].

Важливим було і розуміння того, що ІТ-кластер формує попит на відповідних фахівців, стимулює відповідну освітню та дослідницьку діяльність, що підвищує рівень інтелектуального капіталу міста, а комунікація різних стейкхолдерів може також зумовлювати синергетичний ефект на розвиток міста і галузі [2]. При цьому ІТ-кластер знижує інклюзивність, через виключення людей, які не мають доступу до технологій [11].

Однією з причин того, що саме ІТ стало пріоритетним напрямом для Львова була наявність близько 50 компаній та 4 тис. спеціалістів, які працювали в цій сфері [15]. На той час ІТ-галузь ще не була такою популярною, однак вже тоді було розуміння, що світова економіка змінюється і саме інноваційний розвиток буде важливим для майбутнього.

Відповідно, ініціатором створення Львівського ІТ кластера стала саме міська влада. Компаніями, які підтримали цю ініціативу та заснували Кластер стали Eleks, N-iX та SoftServe. У подальшому розвитку Львівського ІТ кластера можна виділити три етапи. Перший (2011-2013 рр.) характеризувався тим, що це була невелика організація, яка не розвивалася і перебувала на межі закриття. Другий етап (2014-2019 рр.) став періодом активного зростання: кількість учасників збільшилася до 96, було започатковано низку ключових проєктів, зокрема міжнародну конференцію IT Arena, освітню ініціативу з підготовки фахівців IT Expert, дослідження IT Research, будівництво багатоквартирного будинку IT House, закладання заміського простору IT Village та IT Park. На завершенні цього етапу Кластер досяг своєї першої мети – став ІТ-хабом всеукраїнського рівня. З 2020 р. триває третій етап розвитку «Львівського ІТ кластеру», який наразі стримується умовами кризи, пов'язаної з пандемією Covid-19 та війною. У результаті були призупинені найбільші інфраструктурні проєкти, ускладнилася ситуація на ринку праці та співпраця з міжнародними партнерами. Однак Кластер продовжує масштабуватися. З 2020 р. було започатковано багато нових проєктів, зокрема промоційну платформу Lviv Tech, фонд EduFund, IT Generation, а також низку Victory Projects, пов'язаних з адаптацією до роботи в умовах війни. Наразі Львівський ІТ кластер (Асоціація «Львівський кластер інформаційних технологій та бізнес-послуг») об'єднує понад 300 учасників, серед яких не лише ІТ-компанії, а й Львівська міська рада, ЛНУ імені Івана Франка, Львівська політехніка та Український католицький університет [14]. Він поєднує в собі дві ролі: організа-

ційну (управління кластером, формування спільноти ІТ-компаній) та сервісну (надання послуг компаніям-учасникам).

Одним з головних напрямів діяльності Кластера є, насамперед, формування ІТ-спільноти Львова та розвиток самого ІТ-кластера, що проявляється у реалізації таких проєктів, як конференція IT Arena та регулярні IT Meets, будівництво IT Park, IT Village, IT House та ін. Важливим напрямом є освітня підготовка ІТ-фахівців (проєкти IT Expert, Lviv IT Cluster Academy, HR-платформа IT Studlava тощо). Кластер надає послуги своїм учасникам, наприклад, в межах IT Law Community, клубу інвесторів Lviv Tech Angels, видання ITID Lviv, IT Research. Також спільнота підтримує різні соціально важливі ініціативи, як Центр масової вакцинації, Victory Projects, наприклад Shahedbusters та SKY щодо підтримки роботи ППО, Центр ментального здоров'я, Nezlamni Online щодо покращення системи зв'язку в місті, Armog щодо забезпечення бійців засобами індивідуального захисту та ін.

Отже, наразі Львівський ІТ кластер є організацією, яка формує спільноту, що об'єднує різних стейкхолдерів, дотичних до ІТ-галузі, а саме представників бізнесу, освіти та влади. Однак, по суті ця організація поки не є кластером у традиційному розумінні, оскільки не є просторовим утворенням. Відповідно, розглянувши історію створення та структуру, можна сказати, що на цьому етапі Асоціація «Львівський кластер інформаційних технологій та бізнес-послуг» є кластерною ініціативою, яка в перспективі може стати кластером, зокрема завдяки реалізації проєкту Innovation District IT Park. Однак, оскільки Львівський ІТ кластер уже є сформованим брендом, у цьому дослідженні також використовується це формулювання, але як власна назва.

ІТ-кластери є просторовими об'єднаннями ІТ-компаній та інших стейкхолдерів, дотичних до галузі, зокрема університетів, які є постачальниками знань та інновацій для кластерів. Між університетами та ІТ-кластерами загалом спостерігається пряма взаємна залежність, тобто як університети можуть породжувати ІТ-кластери, так і ІТ-кластери можуть стимулювати розвиток інноваційної вищої освіти. Зважаючи на нематеріальність ІТ-продукції, компанії цієї галузі можуть об'єднуватися не лише в географічних межах, а й у віртуальному просторі, мережуючись задля підсилення діяльності один одного. Однак, попри це, бачимо, що вплив ІТ-технологій не зміг настільки змінити систему організації економічної діяльності, тому кластеризація інноваційної діяльності продовжує відбуватися.

Проаналізувавши діяльність Львівського ІТ кластеру, можемо зробити висновок, що він є

структурою, яка має певний вплив на розвиток міста. Загалом ІТ-кластер переважно позитивно впливає на розвиток міста завдяки стимулюванню інноваційного економічного зростання, розумній регенерації міста, підвищенню інтелектуального капіталу. Однак, це супроводжується і певними проблемами, насамперед, диспропорціями економічного розвитку та посиленням соціально-просторової нерівності. Саме тому важливе правильне управління та забезпечення балансу між вигодами від розвитку ІТ-кластера та його негативними впливами.

Міський розвиток, заснований на знаннях, у Львові експерти оцінили на 7 балів (медіанні значення всіх оцінок експертів) з 10 при інтерквартильному розмаху для даного ряду, що складає 1. Відповідно, можна говорити про те, що Львів вже визнається як місто знань. Про ефективний інноваційний розвиток Львова свідчить також його визнання на міжнародному рівні. Наприклад, у 2024 р. в рейтингу стартап екосистем «StartupBlink» місто піднялося на 94 позиції [7].

Втім, з отриманих результатів можна зробити висновок, що наразі ІТ кластер не виконує роль ключового драйвера міського розвитку Львова, заснованого на знаннях. Так вважають 75% експертів. Водночас більшість експертів поділяють думку, що ІТ кластер все ж відіграє важливу роль у розвитку міста, насамперед, стимулюючи інноваційний економічний розвиток та забезпечуючи цифровізацію. Однак наразі цей вплив не є ключовим, ІТ кластер переживає кризовий період, тому його видимість і впливовість не є достатніми. Підтверджують ці висновки такі думки експертів:

«їхня роль не масштабується на весь міський розвиток і бракує, насамперед, розвитку виробничих компаній і долучення до міського життя» (E5);

«ІТ-кластер поступово посилює свою роль у поєднанні різних стейкхолдерів, зокрема міських управлінців, практиків з ІТ-сектору та наукові інститути, однак він ще немає належної суб'єктності» (E8).

За оцінками експертів, основним драйвером МРЗЗ у Львові є міська рада (27 згадок), зокрема, це такі її структури, як КУ «Інститут міста», КУ «Інститут стратегії культури», департаменти архітектури та просторового розвитку, економічного розвитку, розвитку міської мобільності та вуличної інфраструктури, КП «Інститут просторового розвитку». Також особливу увагу було приділено КУ «Львівський міський молодіжний центр – ТВОРИ!» та молодіжним центрам і просторам, які були нею створені. Ще однією категорією драйверів МРЗЗ у Львові було названо університети, насамперед, НУ «Львівська полі-

техніка», ЛНУ імені Івана Франка та Український католицький університет (13 згадок). Крім того, було названо громадські організації, які підсилюють окремі напрями, зокрема ГО «Зручне місто», ГО «Плато» (8 згадок). Також роль драйвера надавали й ІТ-кластеру та окремим ІТ-компаніям, особливо SoftServe та консалтинговим компаніям. Окрім цього, варто виділити згадані експертами інші економічні кластери, медичний кластер та військово-промисловий комплекс.

Отже, наразі основна роль у впровадженні МРЗЗ у Львові належить міській владі, що є цілком зрозумілим оскільки Львів не має чітко окресленої візії як міста знань, стратегії МРЗЗ тощо, через що відсутнє розуміння ролей бізнесу, університетів, громадського сектору у впровадженні цього підходу а отже і їхня активність є нижчою. До того ж, якщо говорити про вплив Львівського ІТ кластера, важливо розуміти, що наразі це, насамперед, бізнес. Тому його вплив на міський розвиток є проявом мультиплікативного ефекту від його функціонування, а не основною функцією ІТ кластера у тому форматі, у якому він функціонує зараз:

«компанії кластера стимулюють місцеву економіку завдяки створеній доданий вартості, експорту послуг і сплатеним податкам, однак міський розвиток точно не є прерогативою ІТ кластера і не має бути» (E12).

Беручи до уваги той факт, що найрезультативнішою є діяльність ІТ кластерів, заснованих за ініціативи міської влади, а також те, що Львівський ІТ кластер наразі є лише кластерною ініціативою, можна припустити, що дійсно повноцінний ІТ кластер може мати значний вплив та виступати рушієм міського розвитку, заснованого на знаннях, але за умов, що він буде сформований та підтримуватиметься і регулюватиметься саме міською владою. Такий ІТ-кластер повинен мати власну просторову локалізацію в місті, включати не лише ІТ-компанії, які забезпечуватимуть горизонтальну взаємодію, а й міську владу, університети, промислові підприємства тощо для формування вертикальної співпраці, щоб працювати спільно для вироблення повноцінного ІТ-продукту, для прискорення цифровізації міста, покращення іміджу Львова тощо.

Отже, у Львові наразі відсутнє комплексне бачення та впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях. За цим підходом у місті розвиваються лише окремі сфери, але цілісні процеси формування міста знань, зокрема, економіки знань, суспільства знань, середовища знань, управління, заснованого на знаннях, поки не відбуваються. Водночас, за оцінками експертів, впровадження міського розвитку, засновано-

го на знаннях, у Львові є однозначно доцільним, зокрема:

«в контексті практичного впровадження пріоритетів і цілей Інтегрованої концепції розвитку «Львів 2030», попри реалії і виклики в умовах воєнного стану» (E8), оскільки це сприятиме *«ефективнішому розвитку міста в умовах обмежених ресурсів»* (E12), *«спрямованість на розвиток знань може зробити Львів привабливим місцем для талановитих людей»* (E3), і загалом це створить умови для підвищення якості життя в місті та рівня його соціально-економічного розвитку, насамперед, через *«залучення інтелектуального потенціалу львівських університетів до вирішення проблем міста»* (E11) та через *«покращення якості освіти, підвищення конкурентоспроможності та залучення інвестицій»* (E2).

Імплементация МРЗЗ дозволить Львову розвиватися відповідно до глобальних тенденцій, що допомагатиме місту удосконалюватися якісно, адже *«рухатись всупереч глобальним трендам означає свідомо сприяти деградації суспільства»* (E9).

Втім, експертами було виділено низку загроз, які несе впровадження МРЗЗ. Насамперед, це базова нестача ресурсів, особливо людських, для імплементції цього підходу, що може посилити наявні проблеми, пов'язані з розбалансованістю та диспропорціями міського розвитку. Крім того, як було визначено, цей підхід потребує *«наявності експертизи та проведення досліджень»* (E7), тому відбувається *«зростання вартості рішень»* (E6), що загалом ще й може зумовлювати *«зростання вартості життя»* в місті (E1). До того ж *«не всі інноваційні проекти і програми можуть бути успішними, існує ризик того, що інвестиції у розвиток знань можуть не принести очікуваних результатів»* (E3). Тобто, для впровадження повноцінного міського розвитку, заснованого на знаннях, Львову необхідно сформувати чітку візію формування бажаного міста знань, яку доцільно закріпити у відповідній стратегії чи концепції розвитку. Це необхідне для того, щоб максимізувати позитивні ефекти від впровадження цього підходу, але водночас і мінімізувати потенційні ризики, які можуть виникнути без ефективного збалансованого управління цим процесом.

Для узагальнення аналізу наявної ситуації та перспектив впровадження міського розвитку, заснованого на знаннях, у Львові було проведено оцінку сильних та слабких сторін, можливостей і загроз в розрізі імплементції економічної, соціальної, просторової та інституційної складових МРЗЗ:

розвиток ІТ-сфери, креативних індустрій, високотехнологічних галузей промисловості, інвестиційну привабливість, що дозволяють охарактеризувати економічну складову МРЗЗ;

якість життя населення, розвиток інтелектуального капіталу, впливовість університетів, що описують соціальну складову МРЗЗ;

сталість міського розвитку, інклюзивність, стан довкілля, які відповідають за просторовий розвиток МРЗЗ;

відповідність планувальної документації, кваліфікованість працівників сфери управління, демократичність і прозорість управління, як характеристики інституційної складової МРЗЗ.

На рис. 2 представлені медіанні значення отриманих оцінок.

На думку експертів, наразі всі досліджувані складові тією чи іншою мірою є сильними сторонами та можливостями Львова у контексті впровадження МРЗЗ. Відповідно, основною стратегією для імплементції МРЗЗ у Львові має стати стратегія зростання, тобто покращення наявних сильних сторін через реалізацію потенційних можливостей. Найбільш сильними сторонами були названі розвиток ІТ-сфери та інвестиційна привабливість міста. Натомість, як найбільші можливості для впровадження МРЗЗ, були виділені розвиток високотехнологічних галузей промисловості та розвиток інтелектуального капіталу. Це передбачає активний розвиток економіки знань через приваблення та формування талановитих мешканців, розвиток інноваційних виробництв та використання і підсилення вже наявного ІТ-сектору. Водночас найгіршою наразі є ситуація з планувальною документацією. Сучасні стратегії та концепції розвитку Львова по суті вже включають окремі складові МРЗЗ, однак комплексне бачення в них відсутнє. Наразі містобудівна документація взагалі більше виступає загрозою, оскільки деякою мірою суперечить сталому розвитку міста. Покращення потребує і сталість розвитку, безбар'єрність та стан довкілля, які дозволять підвищувати комфортність та привабливість міста. Варто відзначити високо оцінену демократичність та прозорість управління, що є важливим в контексті того, що зараз саме міська влада виконує основну роль рушія МРЗЗ.

Важливо зазначити, що оцінки експертів не є сильно узгодженими, що можна побачити за аналізом інтерквартильних розмахів на рис. 3 та рис. 4, які в середньому складали 2,5-3 бали, а також за аналізом коефіцієнту конкордації, який для цих наборів оцінок дорівнює 0,33 і це значення є статистично значущим за критерієм Пірсона. Відповідно, це дозволяє припустити,

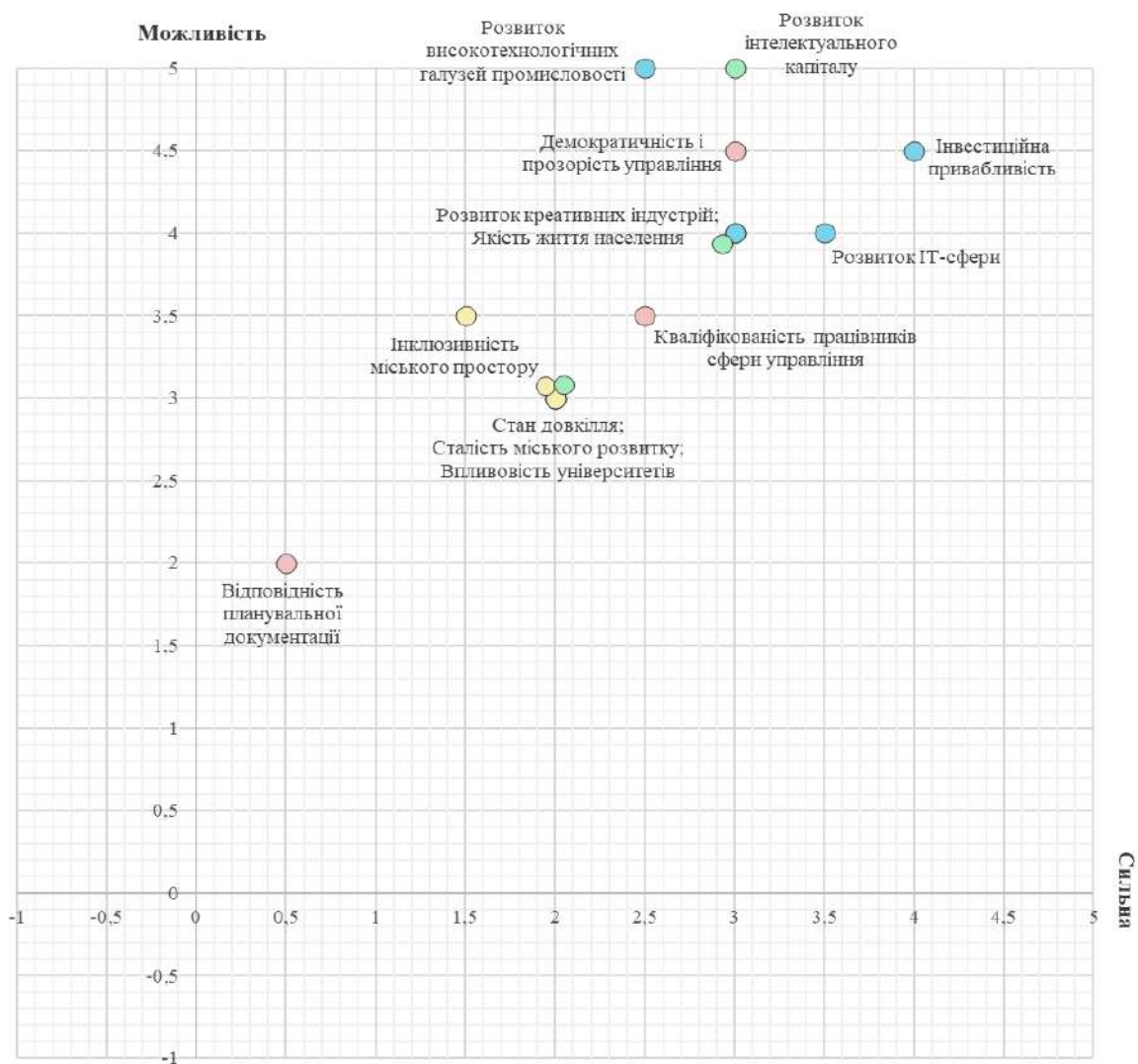


Рис. 2. Експертна оцінка можливостей для впровадження МРЗЗ у Львові /
Fig. 2. Expert assessment of the potential for implementing KBUD in Lviv

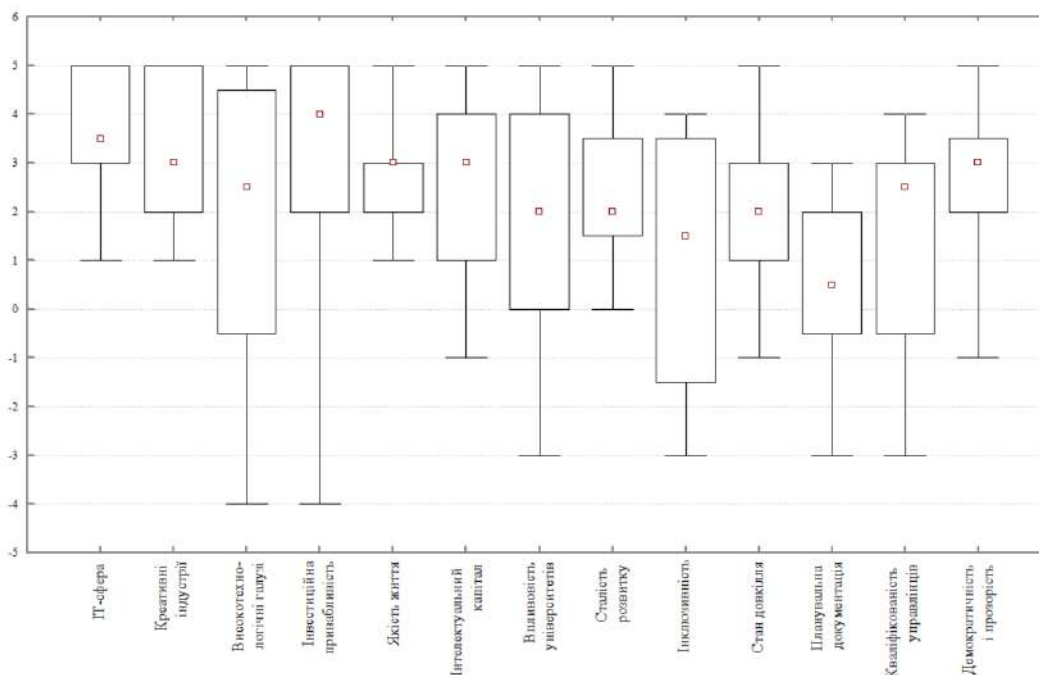


Рис. 3. Узгодженість оцінок експертів щодо сильних сторін впровадження МРЗЗ у Львові /
Fig. 3. Consistency of expert assessments regarding the strengths of implementing KBUD in Lviv

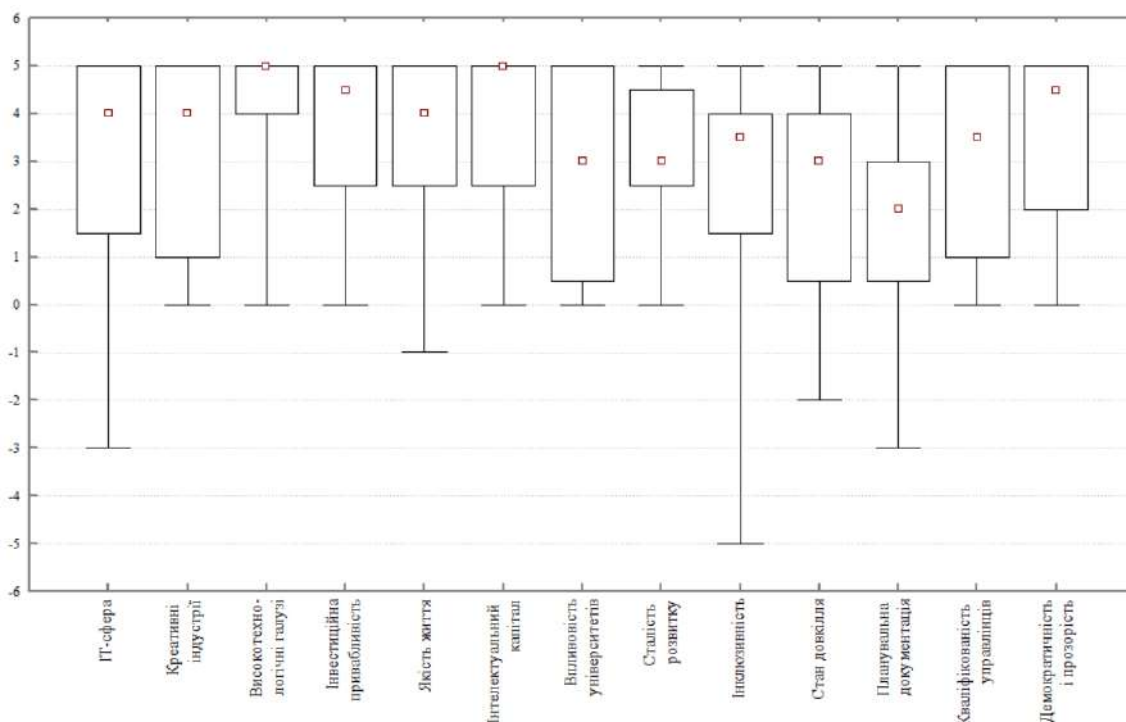


Рис. 4. Узгодженість оцінок експертів щодо можливостей впровадження МРЗЗ у Львові /
Fig. 4. Consistency of expert assessments regarding the opportunities for implementing KBUD in Lviv

що неузгодженість оцінок експертів пов'язана саме з недостатньою кількістю досліджень та відсутністю єдиного бачення МРЗЗ.

Пріоритетними напрямками для імплементації у Львові міського розвитку, заснованого на знаннях, були визначені стимулювання освітньо-наукової діяльності, розвиток смарт-міста та інноваційне високотехнологічне виробництво, тобто формування бази знань, економіки знань, а також створення умов для продукування інновацій (рис. 5). Крім того, важливу роль надано підвищенню кваліфікації населення і, зокрема, управлінців, формуванню креативного класу та залученню громадськості, що дозволить сформувати суспільство знань та ефективне управління знаннями. Менш пріоритетними були названі такі напрями як розвиток медичної галузі, покращення умов життя населення, інтенсивний просторовий розвиток.

Варто зазначити, що експерти приділили значну увагу смартизації міста, для чого потрібне продукування відповідних технологій, що все ж передбачає активне залучення і стимулювання розвитку IT-сектору, який у Львові розвивається у форматі кластеру. Це ще раз підтверджує, що наразі відсутнє розуміння ролі різних акторів у контексті МРЗЗ і для практичного впровадження цього підходу важливе напрацювання загальної концепції. Саме тому в результаті проведеного дослідження для окреслення перспектив міського розвитку Львова, заснованого на знаннях, запропоновано такі концептуальні засади, які

можуть слугувати основою для напрацювання стратегій міста знань, Інтегрованої концепції розвитку Львова та іншої стратегічної і планувальної документації.

Загальною візією розвитку Львова як міста знань може бути формування прогресивного міста з інноваційною економікою, яке приваблює кваліфікованих мешканців високою якістю життя, що забезпечується сталим розвитком завдяки використанню знань, і яке є глобальним центром виробництва знань та інновацій.

Головними акторами впровадження у Львові міського розвитку, заснованого на знаннях, є міська влада, освітні заклади, бізнес, мешканці та громадський сектор. Львів наразі перебуває лише на етапі формування як місто знань, хоч і має певну основу, але вона не є концептуалізованою. Тому наразі Львівська міська рада у цьому процесі повинна відігравати провідну роль лідера, який керуватиме міським розвитком Львова, заснованим на знаннях, забезпечуватиме менеджмент знань, формуватиме привабливе середовище знань та підтримуватиме діяльність центрів і зон знань. Власне центрами знань у Львові мають перспективу стати університети, які здатні постачати знання на національний і навіть глобальний рівень, а саме Український католицький університет, НУ «Львівська політехніка» та ЛНУ імені Івана Франка. Інші заклади вищої та профтехосвіти можуть бути локальними центрами знань. Роль головного споживача знань виконуватиме бізнес, який формуватиме економіку

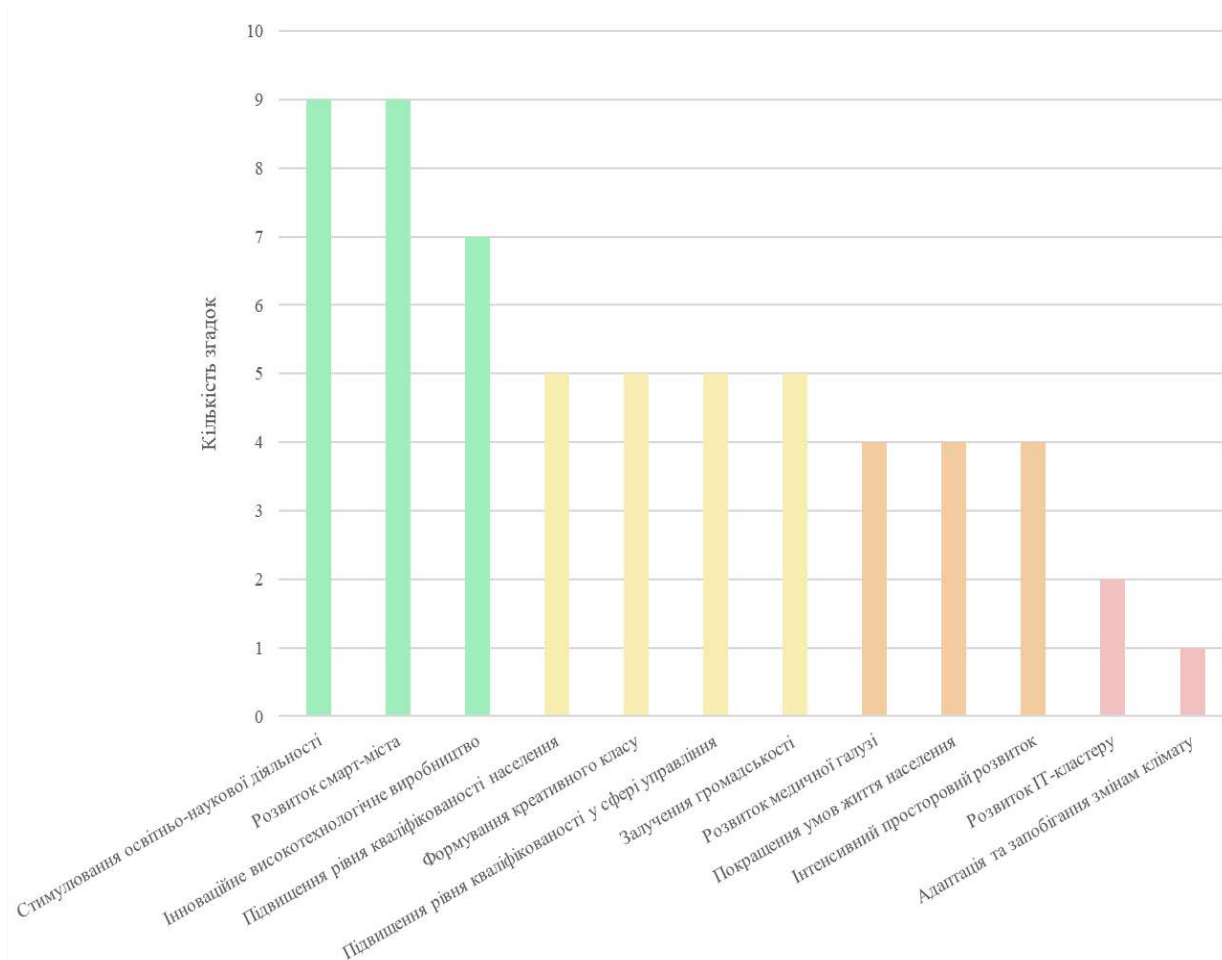


Рис. 5. Пріоритетні напрями для імплементації МРЗЗ у Львові /

Fig. 5. Priority areas for implementing KBUD in Lviv

знань. Насамперед, це підприємства з освітньо-виробничого, технологічного, біотехнологічного, оборонного кластерів, кластерів медичного бізнесу та медичного туризму, а також IT-кластеру, який потенційно може стати головним споживачем за умов повноцінного формування та включення всіх стейкхолдерів. За допомогою отриманих знань бізнес вироблятиме продукцію та послуги, засновані на знаннях, які також доповнюватимуть наявну базу знань, забезпечуючи таким чином циркуляцію знань. Мешканці міста слугуватимуть найчисельнішою групою з агентів знань, яка також буде важливою частиною кругового потоку знань, адже, як кваліфікована робоча сила, вони вироблятимуть знання, формуватимуть суспільство знань і водночас будуть споживачами вироблених знань. Громадський сектор в цьому процесі забезпечуватиме контроль, формуватиме соціальний капітал, сприятиме гуртуванню мешканців, креативному розвитку та підсиленню галузевих напрямів.

Для ефективної взаємодії всіх акторів потрібне чітке регулювання та забезпечення балансу між різними стейкхолдерами. Для цього варто застосовувати модель чотирикратної спіралі, яка

є розширеною версією моделі потрійної спіралі та визначає засади взаємодії університетів, влади, бізнесу та громадського сектору в контексті економіки знань.

Окрім бази, економіки та суспільства знань для МРЗЗ важливим є формування середовища знань, яке сприятиме їхньому продукуванню через забезпечення високої якості життя, слугуватиме магнітом для креативних і талановитих мешканців. Для розуміння перспектив у цьому напрямі було проаналізовано привабливість мікрорайонів Львова (рис. 6) за індексом якості життя, який обраховується КУ «Інститут міста», густотою населення, яка була визначена на основі даних з виборчих дільниць, та розподілом інвестицій через бюджет розвитку за 2017-2021 рр. (дані отримані з Геопорталу міста Львова [17]). Наразі якість життя по всьому місту є середньою, при цьому дещо вища вона в районі вулиць Люблінської, Наукової, Глинянський Тракт. Покращення ситуації потребують центральні райони, які є певною мірою туристифікованими, та райони щільної багатоповерхової забудови, де концентрується значна кількість населення, однак забезпечення інфраструктурою, робочими

місцями є нижчим (Сихів, район вулиць Чорновола, Голоско). Водночас найбільше інвестицій в покращення умов життя вкладається в центральні райони, зокрема території, де концентруються кампуси ЛНУ імені Івана Франка та НУ «Львівська політехніка», район Піскових озер та вулиці

Конювальця, Замарстинів, Підзамче. Загалом для формування середовища, що стимулює виробництво знань, Львову важливо підвищувати якість життя по всій території міста з підтримкою більш розвинених районів та підсиленням менш розвинених.

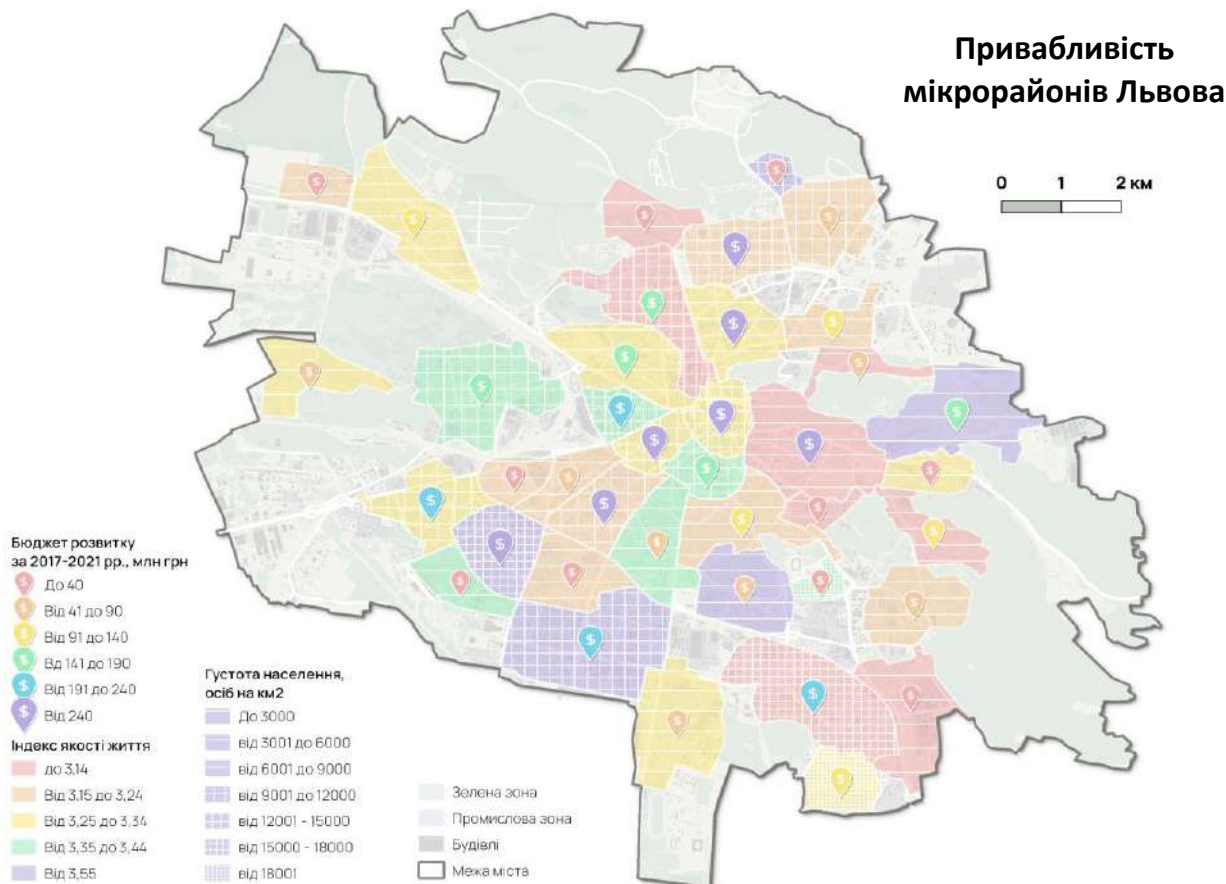


Рис. 6. Привабливість мікрорайонів Львова / Fig. 6. Attractiveness of Lviv's neighborhoods

У результаті ефективної взаємодії визначених акторів у місті можуть сформуватися відповідні зони знань. Концепцію формування таких зон відображено на картосхемі (рис. 7), яку було розроблено за результатами проведеного аналізу розвитку Львова та експертної оцінки.

Наразі у Львові виділяється дев'ять потенційних зон знань. Це зона, яку формує центральна частина міста, де розвинена різноманітна інфраструктура, високий рівень транспортної доступності, а також саме тут концентруються управлінці. Саме тому ця зона виконуватиме функцію зв'язності, забезпечуватиме простори для перетину між іншими зонами, відповідатиме за менеджмент МРЗЗ. Дві освітні зони формуються навколо центрів виробництва знань – кампусів НУ «Львівська політехніка» та ЛНУ імені Івана Франка, які потенційно мають стати головними постачальниками знань для міста, зможуть стимулювати розвиток тут інноваційної діяльності, наукового парку SID City на базі НУ «Львівська

політехніка». Ця зона може мати тісні зв'язки з центральною, постачаючи туди знання та кваліфікованих працівників, співпрацюючи щодо розвитку міста, налагодження міжнародних партнерств. Інша освітня зона знань формується на основі УКУ. Зважаючи на близьке розташування поруч майбутнього ІТ-парку та інноваційного парку LvivTech.City, які втілюють принципи змішаного використання території, та розміщення поруч таких компаній як Eleks і N-iX вона потенційно може розвиватися саме у форматі інноваційного або ж ІТ-кластеру. Також вона зможе налагоджувати тісні зв'язки з іншою освітньою зоною або із сусідньою технологічною зоною, що в перспективі може зумовити їхнє злиття в більш потужну та масштабну зону знань. Інша технологічна зона знань потенційно формується в районі вулиць Героїв УПА та Антоновича на основі наявної концентрації офісів, ІТ-компаній, зокрема SoftServe, яка тут також має власну ІТ-академію.

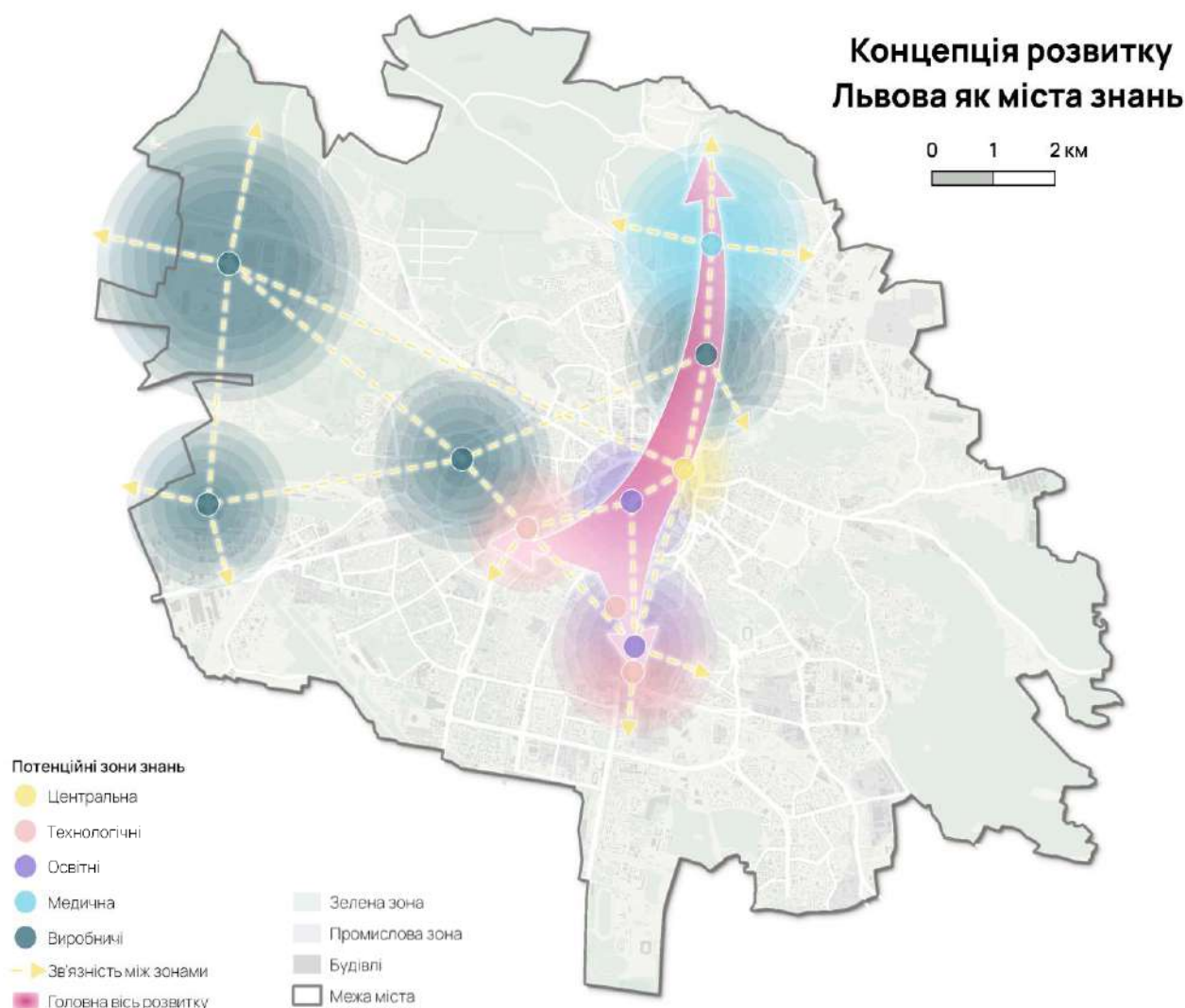


Рис. 7. Модель формування зон знань у розвитку Львова як міста знань /
Fig. 7. Model of knowledge zone formation in the development of Lviv as a knowledge city

Потенційні зони знань базуються на промислових територіях, зокрема на Левандівці, Підзамчому, а також на індустриальних парках Сигнівка та Рясне-2. На основні наявних потужностей, кооперацій із закладами профтехосвіти, ці зони можуть трансформуватися в центри високотехнологічного виробництва, формувати технопарки. Наприклад, в зоні поруч з Сигнівкою заплановане розміщення виробничої частини наукового парку SID City. Зона на Підзамчому має перспективи стати центром креативного розвитку завдяки ревіталізації браунфілдів, оскільки такі процеси тут вже відбуваються, зокрема це !FESTrepublic та Jam Factory Art Center. Ще одна потенційна зона знань у Львові може сформуватися на основі Національного реабілітаційного центру «Незламні», утвореного на базі Першого медоб'єднання Львова. Відкриття UNBROKEN дало поштовх активному розвитку цієї околиці міста, розпочалися процеси формування нового мікрорайону, тому маючи значну інвестиційну

привабливість ця зона може розвиватися у форматі медичного кластеру.

Потенційні зони можуть стати головними драйверами міського розвитку Львова, заснованого на знаннях, однак для повноцінної реалізації цього підходу та перетворення Львова на місто знань важливим є забезпечення зв'язності та інтегрованості цих зон, циркуляції знань між ними, головним менеджером чого має стати міська влада. За таких умов об'єднання цих зон може сформувати потенційну вісь міського розвитку Львова, заснованого на знаннях, яка концентруватиме найвищу активність у сфері знань, слугуватиме основним коридором для кругообігу знань та формуватиме напрями для розширення впливу сформованих зон та створення нових. Зокрема, потенційним є розширення сфери знань на околиці, на райони, що зараз виконують переважно лише житлову функцію, тому потребують диверсифікації розвитку, модернізації, впровадження змішаного використання території для

підвищення якості життя в них. Певні процеси, що можуть стати основою для цього вже відбуваються, зокрема підвищення транспортної доступності цих територій, відкриття молодіжних центрів, як-от Lviv Open Lab на Сихові тощо.

Висновки. Концепція міського розвитку Львова, заснованого на знаннях, передбачає інтегрований розвиток міста через імплементацію знань в усі сфери його функціонування та на перспективу формування міста знань. На основі сформованої концепції заснованого на знаннях міського розвитку Львова, пріоритетними напрямками розвитку міста можуть бути наступні. Насамперед, розвиток Львова як глобального центра виробництва знань, що передбачає стимулювання виробництва знань через формування центрів знань, агентів знань, забезпечення кругового потоку та переливів знань. Це включає стимулювання освітньо-наукової діяльності, розвиток інфраструктури знань, впровадження принципу освіти протягом життя, формування креативності та інтелектуального потенціалу з наймолодшого віку, комерціалізацію наукової діяльності, формування інноваційних, наукових парків, налагодження міжнародних партнерств для промоції міста на глобальному рівні та для переймання досвіду, знань і впровадження кращих практик у Львові.

По-друге, міський розвиток Львова, заснований на знаннях, не можливий без формування конкурентоспроможної та стійкої економіки знань у Львові, що включає стимулювання інноваційного високотехнологічного виробництва наукоємної та вартісної продукції і послуг, залучення великих міжнародних інвесторів для переливу актуальних глобальних знань і технологій в місто, стимулювання локального малого та середнього бізнесу для промоції місцевого продукту, стартапів та інноваційної активності, підтримку і розширення кластерного підходу до місцевого економічного розвитку з трансформацією їх в зони знань. Крім того, МРЗЗ може допомагати місту підвищувати стійкість в умовах війни через більш раціональне використання обмежених ресурсів, диверсифікацію економіки та орієнтацію на новітні галузі виробництва, створення нових робочих місць, які можуть стримати еміграцію, забезпечити зайнятість для ВПО через перекваліфікацію, продукування знань та інновацій для військово-промислового комплексу, медичної галузі тощо. Для формування бренду

Львова як міста знань доцільно організовувати різноманітні масові події, що приваблюватимуть фахівців, молодь, підсилуватимуть функціонування туристичного кластера.

По-третє, важливим є створення сталого середовища, яке приваблюватиме кваліфікованих, креативних мешканців та стимулюватиме виробництво знань. Це передбачає формування комфортних умов для життя у місті, людиноцентричний та природо-орієнтований його розвиток. забезпечення якісних базових умов життєдіяльності мешканців. Важливими є smart-розвиток міста для забезпечення інфраструктури для виробництва знань; створення просторів для продукування знань, обміну ними, тобто якісних публічних просторів, молодіжних центрів, коворкінгів тощо; розвиток сталої міської мобільності для забезпечення доступності знань та можливостей їх поширення. Водночас важливо мінімізувати негативний вплив від таких явищ і процесів, як джентрифікація, посилення технологічного розриву внаслідок діджиталізації тощо. Для уможливлення цього необхідна проактивна роль міської влади, напрацювання відповідних планів і стратегій, що будуть базуватися на сформованих знаннях про розвиток міста та на знаннях, які перейматимуться з міжнародного досвіду тощо.

В основі просторового розвитку Львова, заснованого на знаннях, може бути система, що передбачає створення дев'яти зон знань: центральної, освітньої, освітньо-технологічної, технологічної, чотирьох промислових та медичної, які формуються на основі різних центрів, налагодження зв'язків між зонами і створення головної осі міського розвитку, заснованого на знаннях.

Впровадження підходу міського розвитку, заснованого на знаннях, зможе сприяти збалансованому розвитку Львова, посилювати роль міста на національному та глобальному рівні, формувати бренд Львова як сучасного інноваційного міста. У перспективі це може бути прикладом визначення концептуальних засад та практичних заходів для розвитку інших українських міст на засадах міського розвитку, заснованого на знаннях. Враховуючи сучасний запит на інтеграцію наукових досліджень та необхідні зміни в системі освіти [21], це забезпечуватиме впровадження знань та стимулюватиме інноваційний розвиток міст в Україні відповідно до вимог сталого розвитку та подолання глобальних проблем цивілізації.

Список використаних джерел

1. Afradi K., Nourian F. Understanding ICT's impacts on urban spaces: a qualitative content analysis of literature // *GeoJournal*. 2022. Vol. 87(2). P. 701-731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10277-2>
2. Almaamory A.T., Al Slik G. Science and Technology Park as an Urban Element Towards Society Scientific Innovation Evolution // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1090(1). P. 012119. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1090/1/012119>

3. Borges M. J., Torres S. B. *Company towns: labor, space, and power relations across time and continents*. Palgrave Macmillan, 2012. 276 p.
4. Builes-Vélez A., Escobar L., Villamil-Mejia C. Are Innovation and Creative Districts New Scenarios for Sustainable Urban Planning? Bogota, Medellin, and Barranquilla as Case Studies // *Sustainability*. 2024. Vol. 16(7). P. 3095. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16073095>
5. Carrillo F.J., Yigitcanlar T., García B., Lönnqvist A. *Knowledge and the city: Concepts, applications and trends of knowledge-based urban development*. New York: Routledge, 2014. 356 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315856650>.
6. Cueva R. *Gentrifying i Lund. En Fallstudie av Gentrifieringsprocesser Längs Lokföraregatan*. Lunds universitet, 2014. 54 p.
7. Discover the Winners of the Innovation Economy. Startup Blink: website. URL: <https://www.startupblink.com/#rankings>
8. Ergazakis K., Metaxiotis K., Psarras J. Knowledge cities: The answer to the needs of knowledge-based development // *VINE*. 2006. Vol. 36. P. 67-84. DOI: <https://doi.org/10.1108/03055720610667381>.
9. Gehl J. *Cities for people*. Washington: Island Press, 2010. 285 p.
10. Glaeser E. L. *Triumph of the city: how our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier*. New York: Penguin Press, 2011. 351 p.
11. Goddard J., Vallance P. *The University and the city*. London: Routledge, 2013. 232 p.
12. Johnston A. The roles of universities in knowledge-based urban development: a critical review // *International Journal of Knowledge-Based Development*. 2019. Vol. 10(3). P. 175-192. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2019.103205>.
13. Knight R. V. Knowledge-based Development: Policy and Planning Implications for Cities // *Urban Studies*. 1995. Vol. 32 (2). P. 225-260. DOI: <https://doi.org/10.1080/00420989550013068>
14. Львівський ІТ кластер: вебсайт. URL: <https://itcluster.lviv.ua/membershttps://itcluster.lviv.ua/members/>
15. Львівському ІТ кластеру 10 років. Розповідаємо його історію // *Ain.Business*: вебсайт. URL: <https://ain.business/special/story-of-lviv-it-cluster/>
16. Львівська міська рада: вебсайт. URL: <https://city-adm.lviv.ua/>
17. Геопортал міста Львова: вебсайт. URL: <https://map.city-adm.lviv.ua/>
18. Maeng D., Nedovic-Budic Z. Relationship between ICT and urban form in knowledge-based development: Empirical analysis of Washington, DC metro region // *International Journal of Knowledge-based Development*. 2010. Vol. 1(1/2). DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2010.032588>
19. Michelam L.D., Tucunduva T., Cortese Ph., Yigitcanlar T., Vils L. Knowledge-based urban development as a strategy to promote smart and sustainable cities // *Journal of Environmental Management and Sustainability*. 2020. Vol. 9(1). P. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.18740>
20. Mumford L. *The Culture of Cities*. San Diego, New York: A Harvest/HBJ Book, 1970. 634 p.
21. Niemets L., Sehida K., Kobylin P., Tahsin Şahin M., Bartosh O., Telebienieva I., Kravchenko K., Kliuchko L. Integrative role of human geography in solving global problems of modernity // *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 2023. Issue 58. P. 171-187. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-14>
22. Provotar N., Olishevskaya Y., Mezentsev K., Kravchenko K. Street art in urban space: location and perception in Ukrainian cities // *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 2021. Issue 55. P. 216-231. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16>
23. Provotar N., Shchuryk Kh. City-forming role of universities: impact on the socio-economic and spatial development of cities // *Ekonomichna ta Sotsialna Geografiya*. 2023. Vol. 90. P. 34-46. DOI: <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2023.90.34-46>
24. Quah D. ICT clusters in development: Theory and evidence // *EIB Papers*. 2001. Vol. 6(1). P. 85-100. <https://hdl.handle.net/10419/44806>
25. Sarimin M., Yigitcanlar T. Towards a comprehensive and integrated knowledge-based urban development model: Status quo and directions // *International Journal of Knowledge-Based Development*. 2012. Vol. 3(2). P. 175-192. DOI: <http://doi.org/10.1504/IJKBD.2012.047035>
26. Стратегія підвищення конкурентоспроможності міста Львова до 2015 р. // *Львівська міська рада: вебсайт*. URL: [https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/0/f704804ef3964090c225772800346e8a/\\$FILE/%D0%B4%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%201.doc](https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/0/f704804ef3964090c225772800346e8a/$FILE/%D0%B4%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%201.doc)
27. Yigitcanlar T. Making Space and Place for the Knowledge Economy: Knowledge-based Development of Australian Cities // *European Planning Studies*. 2010. Vol. 18(11). P. 1769-1786. DOI: <https://doi.org/10.1080/09654313.2010.512163>
28. Yigitcanlar T. Moving Towards a Knowledge City?: Brisbane's Experience in Knowledge-Based Urban Development // *International Journal of Knowledge-Based Organizations*. 2011. Vol. 1(3). P. 22-38. DOI: <http://doi.org/10.4018/ijkbo.2011070102>
29. Yigitcanlar T., Kamruzzaman Md., Foth M., Sabatini-Marques J., da Costa E., Ioppolo G. Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature // *Sustainable cities and society*. 2019. Vol. 45, P. 348-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033>
30. Yigitcanlar T., Lönnqvist A. Benchmarking knowledge-based urban development performance: Results from the international comparison of Helsinki // *Cities*. 2013. Vol. 31. P. 357-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.11.005>

31. Yigitcanlar T., O'Connor K., Westerman C. *The making of knowledge cities: Melbourne's knowledge-based urban development experience* // *Cities*. 2008. Vol. 25(2). P. 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.01.001>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Knowledge-based urban development: opportunities for Lviv as a knowledge city

Nataliia Provotar¹

PhD (Geography), Associate Professor of Department of Economic and Social Geography,

¹ Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Khrystyna Shchuryk^{1,2}

MSc student of Department of Economic and Social Geography;

Chief specialist of the Sector of Strategic Planning of the Department of Architecture and Spatial Development,

² Lviv City Council, Lviv, Ukraine;

Kostyantyn Mezentsev¹

DSc (Geography), Head of Department of Economic and Social Geography

ABSTRACT

Purpose. This study aims to examine the potential for knowledge-based urban development (KBUD) in Lviv, focusing on how city authority, educational institutions and IT cluster can serve as primary drivers for this model and which knowledge zones will define the spatial development of Lviv as a knowledge city. Given Lviv's dynamic growth and the challenges posed by Ukraine's current socio-economic climate, KBUD provides a strategic approach to promote sustainable development, enhance the city's role at both the national and global levels, and shape Lviv's brand as an innovative city.

Methodology. The study conducted from June 2023 to June 2024, involved a multifaceted research approach to understand KBUD's applicability in Lviv. Spatial planning documents, legal frameworks, and population and quality of life indicators from 2011-2024 were analyzed through comparative geographical, statistical, and graphical methods. To assess the impact of the Lviv IT Cluster on urban transformation, expert interviews were conducted, involving 12 specialists from urban management, strategic planning, academia, youth policy, and technology sectors. These experts assessed the city's KBUD readiness, the IT cluster's transformative role, and the strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT) of KBUD implementation.

Results. Lviv's KBUD potential is evidenced by its growing population, proximity to the EU, and an established IT cluster – the largest in Ukraine. The Lviv IT Cluster's development has proceeded in three stages: initial formation (2011-2013), rapid expansion (2014-2019), and pandemic- and war-induced constraints since 2020. While the cluster has catalyzed Lviv's economic and intellectual capital growth, challenges include spatial inequality and economic disproportions. The expert assessment positioned Lviv's KBUD at a median score of 7 from 10, with the city authority, universities, NGOs, and the IT Cluster recognized as KBUD drivers, albeit with the city council leading in importance. In the context of the Lviv IT Cluster, it has been found that it is currently a cluster initiative, as there is no clear spatial localization of the formed IT cluster within the city. Its impact remains insufficient to serve as the driving force behind Lviv's knowledge-based urban development. The proposed model for Lviv's knowledge-based spatial development suggests creating nine knowledge zones, including central zone as a connectivity hub, linking other zones and managing KBUD resources, as well as educational (emerging around university campuses as knowledge production hubs) and industrial zones with growth potential. This model aims to establish a network of centers, foster connections between the zones, and create a central axis for KBUD.

Scientific Novelty. This study contributes a comprehensive model for KBUD specific to the Ukrainian context, with Lviv as a case study. It demonstrates the potential of an integrated approach combining intellectual, cultural, economic, and environmental components to enhance urban sustainability. The study's findings emphasize a collaborative ecosystem involving municipal, educational, civic and private sectors in fostering knowledge-driven urban transformation.

Practical Significance. The insights gathered provide a foundational framework for implementing KBUD in Ukrainian cities, addressing both current challenges and long-term strategies. By emphasizing the creation of knowledge zones and local-level planning, this model can guide cities in utilizing their intellectual assets effectively.

Keywords: city, knowledge-based urban development, innovative development, IT cluster, knowledge city, knowledge zone, Lviv, Ukraine.

References

1. Afradi, K., & Nourian, F. (2022). *Understanding ICT's impacts on urban spaces: a qualitative content analysis of literature*. *GeoJournal*, 87(2), 701-731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10277-2>
2. Almaamory, A.T., & Al Slik, G. (2021). *Science and Technology Park as an Urban Element Towards Society Scientific Innovation Evolution*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1090(1), 012119. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1090/1/012119>
3. Borges, M. J., & Torres, S. B. (2012). *Company towns: labor, space, and power relations across time and continents*. Palgrave Macmillan.

4. Builes-Vélez, A., Escobar, L., & Villamil-Mejia, C. (2024). Are Innovation and Creative Districts New Scenarios for Sustainable Urban Planning? Bogota, Medellin, and Barranquilla as Case Studies. *Sustainability*, 16(7), 3095. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16073095>
5. Carrillo, F.J., Yigitcanlar, T., García, B., Lönnqvist, A. (2014). *Knowledge and the city: Concepts, applications and trends of knowledge-based urban development*. New York: Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315856650>.
6. Cueva R. (2014). Gentrifying i Lund. En Fallstudie av Gentrifieringsprocesser Längs Lokföraregatan. Lunds universitet.
7. Discover the Winners of the Innovation Economy. Startup Blink: website. URL: <https://www.startupblink.com/#rankings>
8. Ergazakis, K., Metaxiotis, K., & Psarras, J. (2006). Knowledge cities: The answer to the needs of knowledge-based development. *VINE*, 36, 67-84. DOI: <https://doi.org/10.1108/03055720610667381>.
9. Gehl, J. (2010). *Cities for people*. Washington: Island Press.
10. Glaeser, E. L. (2011). *Triumph of the city: how our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier*. New York: Penguin Press.
11. Goddard, J., & Vallance, P. (2013). *The University and the city*. London: Routledge.
12. Johnston, A. (2019). The roles of universities in knowledge-based urban development: a critical review. *International Journal of Knowledge-Based Development*, 10(3), 175-192. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2019.103205>.
13. Knight, R. V. (1995). Knowledge-based Development: Policy and Planning Implications for Cities. *Urban Studies*, 32(2), 225-260. DOI: <https://doi.org/10.1080/0042098950013068>
14. Lviv IT Cluster: Website. URL: <https://itcluster.lviv.ua/members/> [in Ukrainian]
15. Lviv IT Cluster Turns 10. Here's Its Story. Ain.Business: Website. URL: <https://ain.business/special/story-of-lviv-it-cluster/> [in Ukrainian]
16. Lviv City Council: Website. URL: <https://city-adm.lviv.ua/> [in Ukrainian]
17. Lviv City Geoportal: Website. URL: <https://map.city-adm.lviv.ua/> [in Ukrainian]
18. Maeng, D., & Nedovic-Budic, Z. (2010). Relationship between ICT and urban form in knowledge-based development: Empirical analysis of Washington, DC metro region // *International Journal of Knowledge-based Development*, 1(1/2). DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKBD.2010.032588>.
19. Michelam, L.D., Tucunduva, T., Cortese, Ph., Yigitcanlar, T., & Vils, L. (2020). Knowledge-based urban development as a strategy to promote smart and sustainable cities. *Journal of Environmental Management and Sustainability*, 9(1), 1-19. DOI: <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.18740>.
20. Mumford, L. (1970). *The Culture of Cities*. San Diego, New York: A Harvest/HBJ Book.
21. Niemets, L., Sehida, K., Kobylin, P., Tahsin Şahin, M., Bartosh, O., Telebienieva, I., Kravchenko, K., & Kliuchko, L. (2023). Integrative role of human geography in solving global problems of modernity. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology,"* 58, 171-187. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-14>
22. Provotar, N., Olishevskaya, Y., Mezentsev, K., & Kravchenko, K. (2021). Street art in urban space: location and perception in Ukrainian cities. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology,"* 55, 216-231. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-16>
23. Provotar, N., & Shchuryk, Kh. (2023). City-forming role of Universities: impact on the socio-economic and spatial development of cities. *Ekonomichna ta Sotsialna Geografiya*, 90, 34-46. DOI: <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2023.90.34-46>
24. Quah, D. (2001). ICT clusters in development: Theory and evidence. *EIB Papers*, 6(1), 85-100. <https://hdl.handle.net/10419/44806>
25. Sarimin, M., & Yigitcanlar, T. (2012). Towards a comprehensive and integrated knowledge-based urban development model: Status quo and directions. *International Journal of Knowledge-Based Development*, 3(2), 175-192. DOI: <http://doi.org/10.1504/IJKBD.2012.047035>
26. Strategy for Enhancing the Competitiveness of Lviv City until 2015. Lviv City Council: Website. URL: [https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/0/f704804ef3964090c225772800346e8a/\\$FILE/%D0%B4%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%201.doc](https://www8.city-adm.lviv.ua/inteam/uhvaly.nsf/0/f704804ef3964090c225772800346e8a/$FILE/%D0%B4%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%82%D0%BE%D0%BA%201.doc)
27. Yigitcanlar, T. (2010). Making Space and Place for the Knowledge Economy: Knowledge-based Development of Australian Cities. *European Planning Studies*, 18(11), 1769-1786. DOI: <https://doi.org/10.1080/09654313.2010.512163>
28. Yigitcanlar, T. (2011). Moving Towards a Knowledge City?: Brisbane's Experience in Knowledge-Based Urban Development. *International Journal of Knowledge-Based Organizations*, 1(3), 22-38. DOI: <http://doi.org/10.4018/ijkbo.2011070102>
29. Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, Md., Foth, M., Sabatini-Marques, J., da Costa, E., & Ioppolo, G. (2019). Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature. *Sustainable cities and society*, 45, 348-365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033>
30. Yigitcanlar, T., & Lönnqvist, A. (2013). Benchmarking knowledge-based urban development performance: Results from the international comparison of Helsinki. *Cities*, 31, 357-369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2012.11.005>
31. Yigitcanlar, T., O'Connor, K., & Westerman, C. (2008). The making of knowledge cities: Melbourne's knowledge-based urban development experience. *Cities*, 25(2), 63-72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2008.01.001>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 10 October 2024

Accepted 14 November 2024

Cartographic and analytical assessment of land price formation depending on the physical and geographical conditions of the territory under military aggression in Ukraine

Petro Trofymenko¹

DSc (Agricultural), Associate Professor,

¹ T.H. Shevchenko National University «Chernihiv Colehium»,
Institute of Professional Education and Technologies, Chernihiv, Ukraine,
e-mail: trofimenkopetr@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-7692-5785>;

Anna Minzhyner²

Bachelor student, Institute of Geology,

² Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine,
e-mail: minziner12@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-8112-7997>;

Vitalii Zatserkovnyi²

DSc (Technical), Professor,

e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>;

Iryna Stakhiv²

PhD (Geology), Assistant,

e-mail: stakhivira@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-3090-6988>;

Svitlana Kobylenska³

Director, ³ Ar Consult LLS, Kyiv, Ukraine,

e-mail: lanakob2@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4961-156X>

ABSTRACT

Background. The presented study sheds light on the issue of land price formation in Ukraine as a result of military aggression in conditions of uncertainty. The research involved identifying the peculiarities of the formation of the real price of land plots in the case of concluding a purchase and sale agreement in conditions of uncertainty, depending on a complex of price-forming factors, primarily, taking into account the distance from the line of combat with intensive combat operations, geographical conditions of the territory. It has been shown that the land market under wartime conditions is effectively in a state of stagnation due to numerous risks for both sellers and buyers. The lack of clear legal regulation and the high risk of property loss lead to land purchase and sale transactions being carried out with significant restrictions, which do not meet the criteria for the full functioning of a market mechanism.

Methods. Used research methods: geospatial data analysis (kriging method), mathematical statistics, cartographic-analytical assessment. Among the main types of uncertainty, several determining factors are identified: political and military risks, instability of the legal environment, potential losses, uncertainty of the reliability (sufficient security) of the geographical location of land plots, as well as the uncertainty of the future.

Results. The sale price of land plots for various purposes exhibits dynamic and geospatial differentiation, depending on the manifestation of various determining factors: the state of the military-political and economic situation, as well as their geographical location, which generally corresponds with soil quality. It is characterized by the location of land plots within urban agglomerations of large settlements and/or under the protection of natural obstacles, such as rugged terrain or large bodies of water (lakes, rivers), which can potentially slow down a military offensive.

Conclusions. A significant influence of the remoteness of land plots for the maintenance of a residential building and farm buildings from a localized combat zone (in the period 2014-2022) was revealed, however, the distance of land plots from the combat line at a distance of 50 to 100 km had practically no effect on the formation of the purchase price - the sale of land plots, which is connected with the intensification of hostilities and the transition of the situation to a state of higher degree of uncertainty. The obtained results provide important information for planning the future development of the land market under wartime conditions and post-war recovery. They indicate the need to adapt land valuation methods considering the current military-political realities and are aimed at minimizing risks for participants in land relations. The results of the study indicate the need to make appropriate changes in the methodology of normative monetary valuation of land plots and the methodology of expert monetary valuation of land plots.

Keywords: physical and geographical conditions, price, uncertainty, geospatial models, military aggression, land plots, cartographic and analytical assessment.

In cites: Trofymenko Petro, Minzhyner Anna, Zatserkovnyi Vitalii, Stakhiv Iryna, Kobylenska Svitlana. (2024). Cartographic and analytical assessment of land price formation depending on the physical and geographical conditions of the territory under military aggression in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 259-271. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-21>

Introduction. It is generally known that since February 24, 2022, the armed military aggression of the Russian Federation against Ukraine has been ongoing in Europe, which has lasted for more than two years. Large-scale hostilities covered the entire territory of the state, which is waging existential

© Trofymenko Petro, Minzhyner Anna, Zatserkovnyi Vitalii, Stakhiv Iryna, Kobylenska Svitlana, 2024

resistance to preserve its own statehood. In the difficult conditions of military operations, Ukraine, as part of the European Commonwealth of Nations, makes efforts aimed at preventing the aggressor state from seizing new territories and keeping the economy in working condition. Under such conditions, an important feature of the stability of the economy of any state is its ability to ensure the functioning of the market of land plots for various purposes, including agricultural land. In the difficult conditions that have arisen, this allows us to solve several main tasks: to ensure that citizens and legal entities exercise their right to dispose of part of their assets (I), to contribute to the receipt of larger volumes of state duty (II) to the state budget, and to minimize the risks of property loss (monetary resources) in case of temporary short-term or long-term loss of territory (III).

This problem is especially acute in the territories near the line of contact between the Defense Forces of Ukraine and the occupying forces of the Russian Federation.

Analysis of research. To research this topic were chosen for the study of this topic, in particular, changes in the conditions of the course of hostilities and the aggravation of the political situation as a result of hostilities, which can lead to a decrease in the investment attractiveness of the region. For example, the war in Syria has led to massive destruction and population displacement, which has reduced demand for real estate and affected land prices [3].

In addition, military actions can cause significant damage to infrastructure, which plays an important role in shaping the value of land plots. For example, after the war in Afghanistan, many roads and cities were destroyed, which led to a fall in the value of land in certain areas [10].

Military conflicts lead to an economic downturn that affects the real estate market. Russia's invasion of Crimea and the conflict in eastern Ukraine led to the decline of the economy of these regions, which caused a decrease in land prices [6].

Military actions can lead to political changes that will affect the regulation of the real estate market. For example, after the war in Libya, new land ownership laws were introduced, which changed the conditions for investors and land owners [2].

Military actions, as a rule, lead to a humanitarian crisis, which negatively affects the real estate market. For example, as a result of the war in Yemen, the majority of the population found themselves in conditions of a humanitarian crisis, which caused an increase in prices for residential real estate and land plots [4].

In addition, the land market is influenced by a number of other factors, including psychological factors such as fear and uncertainty associated with

war, which often make people postpone the purchase of real estate, which leads to a decrease in prices. In addition, the growth of emigration from war zones reduces the demand for housing and other real estate. However, war can also lead to increased demand for housing in safe areas, leading to higher property prices in these areas [9].

Repurposing is another important aspect. War can prompt the repurposing of land, for example from agricultural to industrial, which can increase its value if the new purpose turns out to be more profitable [5]. In addition, the destruction or damage of real estate objects can lead to their transition to the category of land plots, which can reduce their value).

Legal aspects of price formation are also of great importance. Changes in legislation regulating the real estate market under the influence of war can significantly affect real prices. Moreover, increased risks associated with real estate investing in war zones may lead to higher mortgage interest rates, which negatively affects demand [11].

International organizations can also influence market dynamics. Financial assistance from such organizations to restore infrastructure and housing stock can stimulate demand for real estate and increase prices. On the other hand, the introduction of sanctions against countries that are waging war can have a negative impact on their economies and, accordingly, lead to a drop in real estate prices [15].

A specific, but no less significant influence on the formation of the value of land plots and real estate objects in the conditions of military aggression is caused by localization within large urban agglomerations, as well as a favorable geographical position in relation to the lines of combat confrontation. It is about the location of territories with existing real estate under the protection of natural obstacles significant for military aggression: mountain systems, large rivers, forested areas, swamps and wetlands, irrigation and drainage systems, deserts and difficult terrain conditions [16].

Finally, long-term consequences must be considered. The effects of war on the real estate market can be felt for years after hostilities end. The restoration of destroyed infrastructure and housing stock can take a long time and require a lot of effort. In addition, changes in the political and economic situation in the country can lead to long-term changes in the real estate market [19].

That is why in this work, considerable attention is paid to the study of the formation of sales prices of land plots of various purposes within the territory of 8 regions of Ukraine, where hostilities continued and the land market functioned.

The purpose of the research is to identify the peculiarities of the formation of the real price of

land plots in the case of a purchase and sale agreement, depending on the complex of price-forming factors, primarily, taking into account the distance from the line of combat with intensive combat operations, geographical conditions of the territory.

The **object** of the research is a cartographic and analytical assessment of the main factors of price formation in the conditions of military aggression, the geospatial distribution of the price of land plots of various purposes in relation to the location of the established line of combat confrontation in the period 2021-2023, taking into account the influence of the geography of the territory and proximity to large population centers.

The subject is a study of the impact of key price-forming factors, such as geographic location, distance from the war zone, the presence of natural obstacles and the location of land plots of various purposes in the area of urban agglomerations on the formation of sales prices using methods of geospatial analysis and cartographic-analytical data evaluation.

Research tasks included:

- carrying out a literary and analytical review on the topic of research;
- development of a GIS database with information on purchase and sale agreements of land plots for various purposes for the period 2021-2023;
- development of land evaluation geospatial models of differentiation of the value of land plots per unit of area of different purpose in 8 oblasts of Ukraine with a display of the line of combat collision;
- cartographic and analytical assessment of the formation of the price of land plots in relation to the line of combat confrontation, taking into account the characteristics of the territory.

Research method. Research method of Geospatial Data Analysis (kriging method), mathematical statistics, cartographic-analytical assessment. Resources: DeepState [18], State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre, GISData [8] (magneticonemt) – as a cartographic basis and formation of a GIS database.

Research results. After the invasion of troops, there was a relative stabilization of the line of combat engagement (LCE) [1]. The specified location of the LCE was used for the cartographic-analytical assessment of the geospatial distribution of the formation of the price of land plots of various purposes, depending on various determining factors.

It is clear that the temporary fixation of the location of the troops creates certain conditions of uncertainty - the expectation of a possible breakthrough of the enemy's troops or, on the contrary, a decrease in the probability of its implementation. For citizens, conditions of uncertainty consist in the

impossibility of disposing of their right to sell a plot of land.

In such a situation, the uncertainty for citizens will be too high, and certain aspects of it can be formalized in the form of the corresponding types of risks, which are listed below.

The risks of an unstable legal environment arise when property rights and legal regulations can be extremely unstable in the context of hostilities that continue at some distance from the location of the properties, creating additional uncertainty for potential sellers.

The risks of potential losses in a military conflict can result in significant losses because the market price can change dramatically due to the potential danger of destruction or destruction of the property.

The risks of the uncertainty of the future after a military conflict can be unpredictable, and people (potential participants in real estate transactions) can be in conditions of uncertainty regarding the future of property, the economic development of the region, and political conditions. As a result, the above creates additional difficulties in the case of making decisions about the sale of land plots.

The risks of uncertainty of the reliability (security) of the geographical position. The location of land plots in the middle or outside the boundaries of urban agglomerations of large settlements or under the protection of natural obstacles in the form of rough terrain, large water bodies (lakes, rivers), which can potentially slow down the military offensive and increase the price of annexing the territory for the enemy, may have a significant influence on the formation of their price, mainly in the short- or medium-term perspective [13].

Taking into account modern military aggression, which is considered by experts to be a hybrid, the location of a plot of land in the zone of potential flooding of water bodies should be considered a negative characteristic, because it potentially increases the danger of deterioration of its condition, which is proved by the fact of undermining the Kakhovskaya Dam by Russian troops.

Therefore, in the conditions of military conflict and occupation, the uncertainty for citizens who intend to sell land plots can be very significant, which will require a more careful consideration of all possible risks and consequences [20].

To solve the research tasks, a GIS database has been developed, which contains: the code of the settlement (KOATUU), the area of the settlement, the name of the settlement, information on regional subordination, belonging to the pre-territorial community, data on the price of land plots of various purposes in the period from 2021-2023 years [12, 14].

The differentiation of the price of land plots of different purposes varied over the years, depending on the development of the military invasion on the territory of Ukraine (Table 1).

The year 2021 was chosen as the base year for

comparative characteristics and cartographic-analytical assessment of land price changes, when the real estate market in Ukraine was in a state of relative stability, despite the negative impact of the pandemic Covid 19.

Table 1

Chronology of Russia's military invasion of Ukraine.

The main stages of the development of military actions that changed the location of the contact line and directly or indirectly influenced the formation of the price of the sale of land plots

Date of the research period	Event	Direction and status of the event
24 Feb - 2 Mar, 2022	The beginning of a full-scale invasion of Russia into Ukraine. The Russian army partially occupied Kyiv, Sumy, Chernihiv, Zaporizhzhia, Kharkiv and Kherson regions	military, negative
2 Apr - 15 Jun, 2022	Liberation by Ukraine of Kyiv, Kharkiv, Sumy, Chernihiv, Zaporizhzhia, Kharkiv, and partially Kherson regions	military, positive
24 Jun - 3 Jul, 2022	The APU left Severodonetsk and Lysychansk	military, negative
6 Sep, 2022	The beginning of the Kharkiv counteroffensive. In the first days, about 6,000 square meters were released. km of the territory of Ukraine and almost the entire Kharkiv region	military, positive
23 Sep - 3 Oct, 2022	In order to formalize the annexation of the territories of Ukraine, the aggressor held illegal pseudo referendums on the accession of the Kherson, Zaporizhzhia, Donetsk and Luhansk regions to Russia	military, negative
11 Nov, 2022	Liberation of Kherson by Ukraine	military, positive
25 Jan, 2023	Russian troops captured Soledar	military, negative
8 Jun, 2023	The beginning of the summer counteroffensive of the Armed Forces of Ukraine and the partial liberation of the territories of the Zaporizhzhia region	military, positive
10 Oct, 2023	The Russian occupiers launched a massive offensive in the Avdiyivka area	military, negative

The change in the price values of the area of land plots of three main types of purpose was studied: 02.01 - for the maintenance of a residential building and farm buildings (homestead), 01.01 - for the conduct of commercial and agricultural production, and 01.03 - for the conduct of a personal peasant farm. The pre-war year 2021 was chosen as the base year of pricing for the formation of its values.

It should be noted that the current methods of monetary valuation of land plots, both normative and expert, do not contain norms that take into account the impact of military actions on the price of a land plot, although military aggression has been ongoing since 2014.

It is no coincidence that the lowest price of land plots for the maintenance of a residential building and farm buildings was recorded in 2021 in the eastern part of Ukraine. On geospatial models, these are parts of the Kharkiv, Luhansk, and Donetsk regions (Fig. 1).

The lowest, too low and low price of land plots in the specified locations is due to the fact that military operations took place near the specified territo-

ries, which actually continued in the east of Ukraine since 2014.

Their price gradually increased in the northern and southern directions along the combat contact line (ATO zone), which was formed after 2014 and reached maximum values in the agglomerations of large cities - Dnipro, Mykolaiv, Odesa, Kherson and Zaporizhzhia (see Fig. 1 "A").

The geospatial differentiation of the sale price of land plots, depending on the distance from the war zone, indicates that its formation took place under the influence of subjective factors, in particular, during the conclusion of the purchase and sale agreement. In the final result, the revealed regularity indicates the need to revise the existing methods of normative and expert monetary valuation of land plots in Ukraine.

After a full-scale invasion in February 2022 of land plots for the construction of a residential building and the maintenance of farm buildings, it actually ceased to function, as evidenced by the absence of agreements on the purchase and sale of plots.

The highest values of the price of land plots for

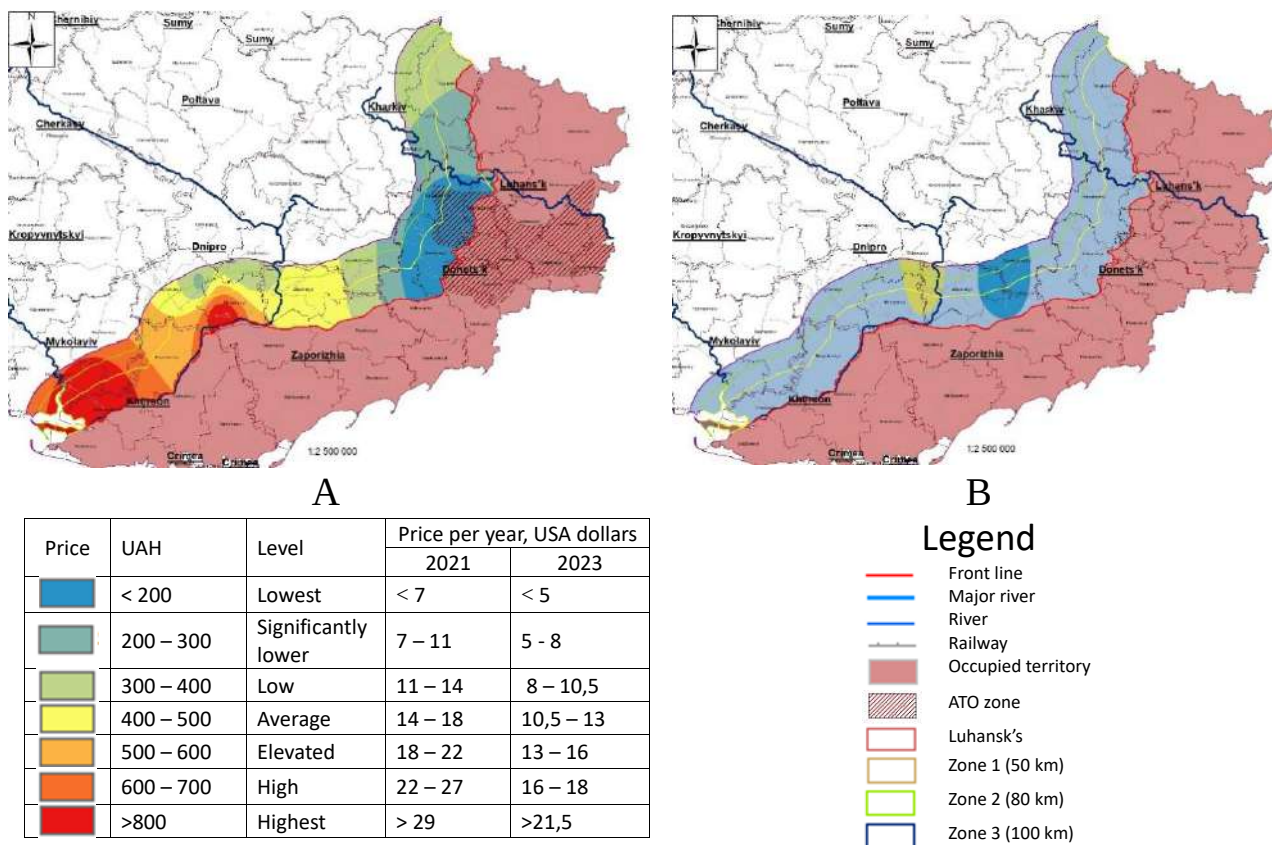


Fig. 1. The cost of 1 hectare of land for the construction of a residential building and maintenance of outbuildings: A - 2021, B - 2023.

the maintenance of a residential house and commercial buildings are observed in the agglomeration of the cities of Odesa, Mykolaiv, and Kherson, which are close to the northern coast of the Sea of Azov. The last feature is related to the possibility of transferring these plots to short-term rentals during the holiday season, which increases their price due to their recreational appeal.

However, compared to the base year of 2021, in 2022 - 2023, the sale price of plots for the construction of a residential building and maintenance of commercial buildings in the dollar equivalent decreased significantly. On average, by 30%, which indicates the depreciation of residential real estate as a result of military aggression.

The value of the price of most plots is close to the normative monetary value (NMV), below which its formation is prohibited by law, which is due to the need to pay state duty on each purchase and sale agreement. The vast majority of agreements were concluded in the circumstances of multi-vector uncertainty, which creates correspondingly complex conditions for the formation of its values.

Under such circumstances, none of the conditions for compliance with the term "market value" were fulfilled, which, as is known, is the value for which the object of assessment can be sold on the market of similar property on the date of assessment

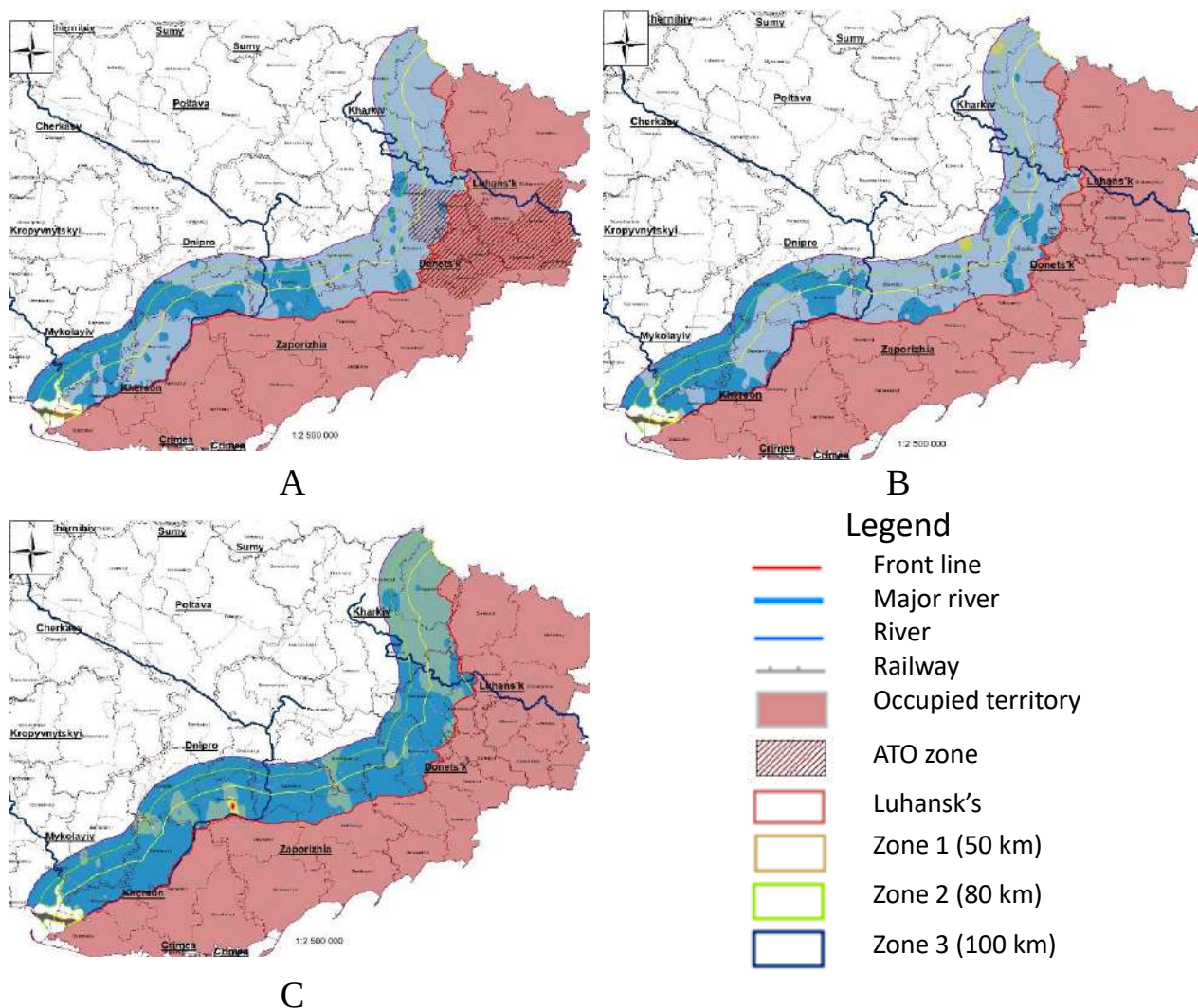
according to the agreement concluded between the buyer and the seller. One of the main factors in the formation of an objective price, as is known, is that each of the parties to the agreement acts with knowledge of the matter, judiciously and without coercion, which is impossible in the conditions of military aggression [16]. And the functioning of the market of land plots and real estate objects in the complex conditions of uncertainty that have developed should be considered conditional.

A radically different picture in price formation is observed for plots with the target purpose of 01.03 - for commercial agricultural production (Fig. 2).

According to the results of the conclusion of agreements for the purchase and sale of land plots for commercial agricultural production, the price of the agreements in 2021 and in 2022 after the restoration of the land market turned out to be little variable (see Fig. 2).

The geospatial differentiation of the decline in land sales prices is generally consistent with a decline in soil fertility in a northeast-southwest direction along the long-term stabilized battle line. The value of prices is relatively stable and remained with little change until the beginning of 2024 (see Figs. 1A and 2A).

The soil map of Ukraine according to the FAO classification is shown in Figure 3.



Price	UAH	Level	Price per year, USA dollars		
			2021	2022	2023
	< 33 000	Lowest	< 1 213	< 890	< 890
	33 000 – 58 000	Significantly lower	1 210 – 2 130	890 – 1 570	890 – 1 560
	58 000 – 83 000	Low	2 130 – 3 050	1 570 – 2 250	1 560 – 2 230
	83 000 – 108 000	Average	3 050 – 3 970	2 250 – 2 920	2 230 – 2 910
	108 000 – 133 000	Elevated	3 970 – 4 880	2 920 – 3 600	2 910 – 3 580
	133 000 – 159 000	High	4 880 – 5 840	3 600 – 4 300	3 580 – 4 280
	> 184 000	Highest	> 6 760	> 4 980	> 4 960

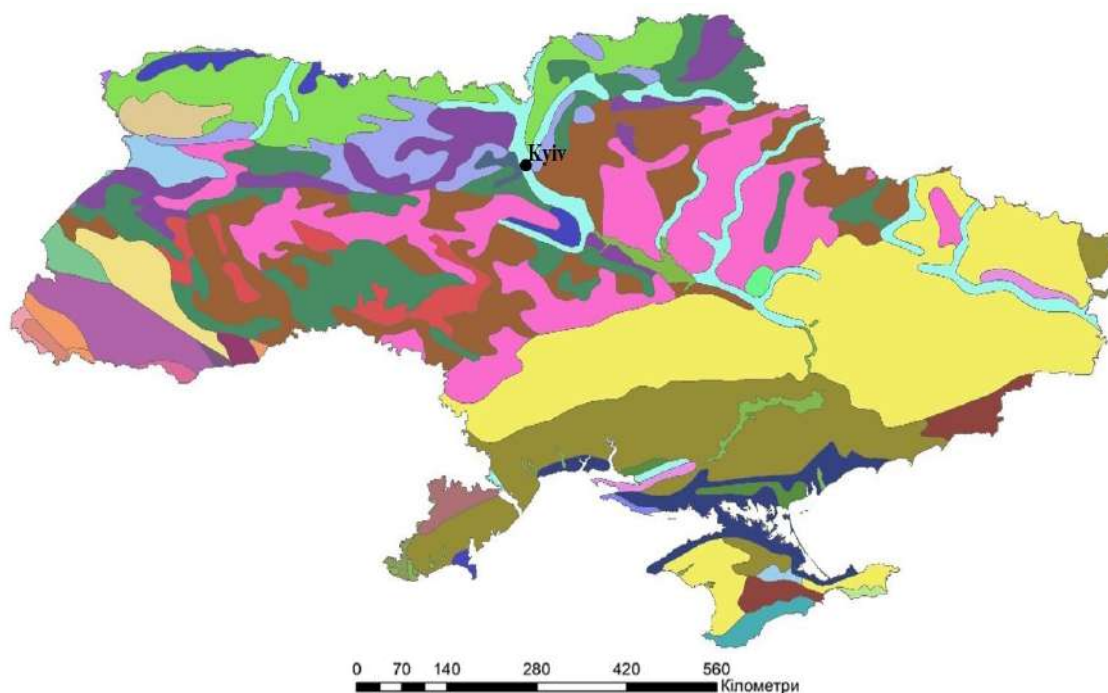
Fig. 2. The cost of 1 hectare of land for commercial agricultural production: A - 2021, B - 2022, C - 2023

The codes and names of soils according to the FAO classification are provided in the table 2.

The predominant soil type along the front line is chernozem—one of the most valuable soils in the world, differentiated by types and manifestations of dominant processes, such as salinization, solonchization, and gleying. The following soils are prevalent along the front line: Ck10-2ab – Calcaric

Cambisols, Cl12-2ab – Chromic Luvisols, Cl13-2a – Chromic Luvisols, D/SS – Dunes and Shifting sands, Ch22-2a – Chernozems, Jc49-1/3a – Gleyic Phaeozems [7].

Overall, the identified feature of the geospatial distribution of land sale prices is logical, as the methodology for their expert monetary valuation takes into account the bonitet score of Ukraine's ag-



Soils of Ukraine					
	Bd66-1/2bc		De18-1a		Jc61-a
	Bd72-2b		De18-2a		Je87-2/3a
	Be12 Be122-2bc		De19-2a		Kh1-2a
	Be123-2b		De20-2ab		Kh31-2a
	Ch22-2a		Gh23-3a		Kh33-2a
	Ch5-2a		Gm14-2/3a		Kh34-2a
	Ck10-2ab		Gm30-2/3a		Lg41-2/3ab
	Cl12-2ab		Hg7-3a		Lg54-1a
	Cl13-2a		I-Be-2c		Lg55-1a
	D/SS		Jc49-1/3a		Lo89-2a

Fig. 3. Soils of Ukraine according to FAO classification [7]

Table 2

Codes and names of soils of Ukraine according to the FAO classification

Bd	Dystric Cambisols	Hg	Gleyic Phaeozems	Od	Dystric Histosols
Be	Eutric Cambisols	L-Be Lithosols	Lithosols-Eutric Cambisols	Pi	Leptic Podzols
Ch	Haplic Chernozems	Jc	Calcaric Fluvisols	Po	Orthic Podzols
Ck	Calcic	Je	Eutric Fluvisols	So	Orthic Solonetz
Cl	Luvic Chernozems	Kh	Haplic Kastanozems	We	Eutric Planosols
De	Eutric Podzoluvisols	Lg	Gleyic Luvisols	D/SS	Dunes and Shifting sands
Gh	Humic Gleysols	Lo	Orthic Luvisols	WAT	Inland Waters
Gm	Mollic Gleysols	Mo	Orthic Greyzems		

ricultural soil groups. The decrease in soil fertility is associated with the reduction in soil moisture levels.

Localization of zones of "high" and "high" sales prices of land plots for commercial agricultural production is observed in the direction west of the

city of Zaporizhzhia, which is conditionally protected from the east by the Dnipro River and a cascade of reservoirs, which in fact are practically impassable natural obstacles to traffic troops of the aggressor. Therefore, this localization is natural, and water

bodies represent an additional positive factor in pricing. Whereas in peacetime, the location of land plots in a potential flooding zone is a significant factor that lowers the price. Therefore, military actions can lead to a change in the pricing of land plots.

The influence of the distance from the battle line on the formation of the sales price of land plots for commercial agricultural production at distances of 50, 80 and 100 km was not found.

After the liberation of a large part of the occupied territory of Ukraine in the fall of 2022 and the relative stabilization of the land market for various purposes, in 2023 there was an increase in the sale price of plots for commercial agricultural production in all regions except Zaporizhzhia, Dnipropetrovsk, and Kharkiv regions (Fig. 4).

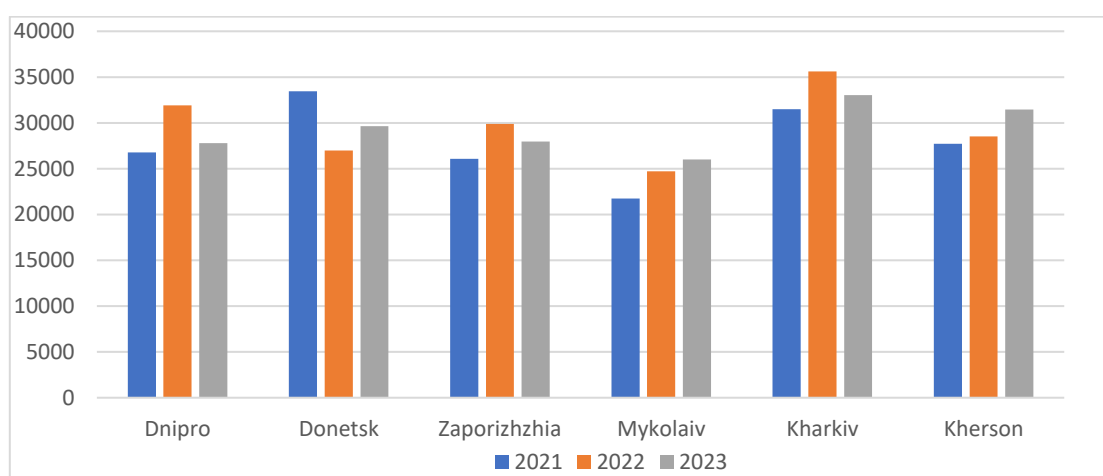


Fig. 4. The average price of 1 hectare of land for commercial agricultural production

Note that despite the fact that the regional center of the Kherson region is actually on the collision line, the price of plots has increased, including in the territory of the Kherson region. This indirectly confirms the positive protective influence of the great Dnipro River. It is about reducing the danger of occupation of other communities in the region, located north of the water body. It serves as a significant military natural obstacle for the potential penetration of the aggressor's troops, therefore it has a positive effect on the formation of the price of land plots.

The sale price of plots of land for personal farming after the start of Russia's military aggression in 2022-2023, compared to the base year of 2021, in hryvnia equivalent increased in the territory of all regions within the studied zones (Figs. 5,6). Instead, the corresponding values in the dollar equivalent decreased significantly.

The activation of the land market and the marked increase may be related to the increase in the demand of individuals, as well as legal entities, for land plots of personal peasant farms and the fact

This is explained by the fact that against the background of military operations, the number of offers of land shares (shares) for sale exceeded the number of needs, because the risks of property loss in the event of the movement of invading troops were too high.

In addition, in the legislation of Ukraine there is a legal norm of priority purchase by the tenant of the leased land plot (land share - share) in case of the owner's decision to sell it. That is why one of the main determining factors of the too low sale price of land plots is the restriction of the owners regarding the right of disposal, which was not changed due to the lack of time during the war. In addition, the adoption of a decision on the alienation of land plots is carried out under strict conditions of multi-vector uncertainty.

that the vast majority of them were not leased and were used by the owners directly.

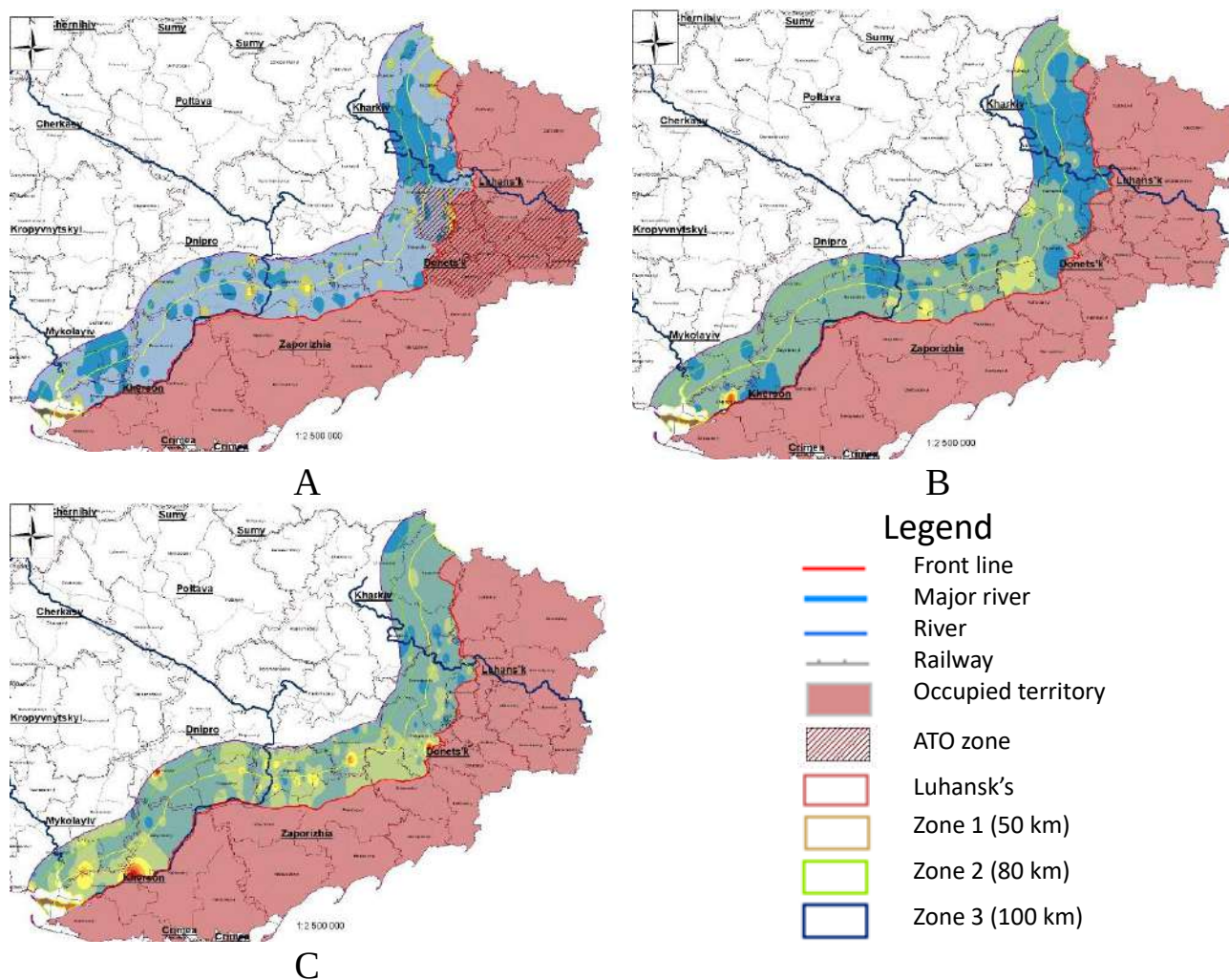
In addition, there was a partial return of internally displaced persons (IDPs) who resumed the use of their assets, due to which the supply of land plots decreased, compared to the beginning of military aggression, the observed dynamics of the land market is largely probable.

The increase in the value of plots for personal farming is particularly noticeable due to a significant increase in the price of purchase and sale agreements in 2023, compared to 2024 (see Fig. 6).

On the other hand, in 2022-2023 compared to 2021, there is a decrease in the values of the price of land plots (in dollar terms). The decrease is on average from 26.6% to 30.0%, which may indirectly indicate the deterioration of the economic situation in the state and the increase of risks of various nature.

In particular, it is about the lack of guarantees from the state regarding the territorial integrity of its individual parts and the potential change of owners of land plots.

In addition, there is a high danger of changing



Price	UAH	Level	Price per year, USA dollars		
			2021	2022	2023
	< 14 000	Lowest	< 500	< 370	< 350
	14 000 – 28 000	Significantly lower	500 – 1 030	370 - 750	350 - 750
	28 000 – 42 000	Low	1 030 – 1 540	750 – 1 130	750 – 1 150
	42 000 – 56 000	Average	1 540 – 2 050	1 130 – 1 500	1 150 – 1 500
	56 000 – 70 000	Elevated	2 050 – 2 570	1 500 – 1 890	1 500 – 1 880
	70 000 – 84 000	High	2 570 – 3 080	1 890 – 2 270	1 880 – 2 260
	> 98 000	Highest	> 3 600	> 2 655	>2 650

Fig. 5. The cost of 1 hectare of land for personal farming: A - 2021, B - 2022, C - 2023

the general mode of economic functioning of subjects of economic activity on lands located in the immediate vicinity of the demarcation line. Buying an agricultural plot of land, which is located near the military demarcation line of two countries, may carry additional risks for the buyer, which are listed below.

Active hostilities entail a high risk of coming under fire or other military action. Uncertain in time is the danger of damage to the soil cover, which is the main means of production in agriculture.

Military and government bodies can restrict access to certain territories, which will lead to a change in their functioning regime, primarily in the context of limiting economic activity.

Due to the danger and uncertainty, the value of such a plot may decrease significantly. Lands and real estate objects may require significant investment for recovery after hostilities (mining, restoration of damaged soils and infrastructure).

In addition, there may be controversial issues regarding the uncertainty regarding the outcome of

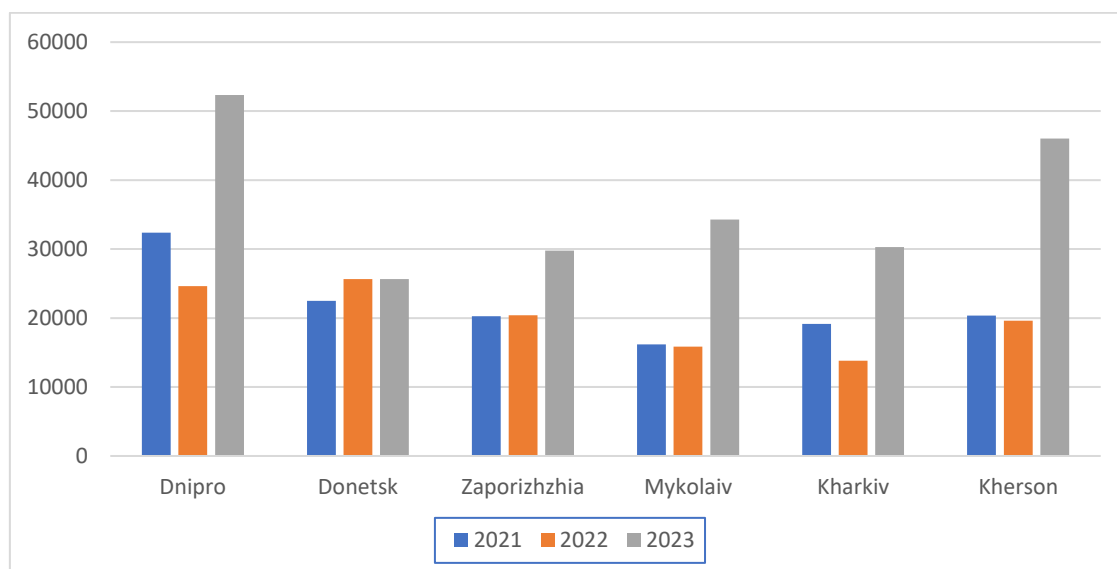


Fig. 6. The average price of 1 hectare of land for personal farming

the end of the military conflict, and as a consequence the increased danger of using real estate as a resource for reparations and compensations.

The local population may be negatively disposed to the new owners due to the aggravated situation.

Possible damage to roads, power grids, water supply and other infrastructure elements is likely, which will increase the cost of production.

As a result, a significant decrease in the receipts of both internal and external investment resources, deterioration of logistics connections with product sales markets is also expected.

In general, the market of land plots, which are located in relative proximity to the battle line and are in conditions of significant uncertainty, is actually in a state of certain stagnation. The formation of the sale price of land plots of the researched types of purpose is under the influence of a significant number of potentially perceptible determining factors. Among them, political uncertainty, the lack of a clear understanding of the future by participants in the land market, the imperfection of the existing legislation regulating the purchase and sale of plots for commercial agricultural production (in conditions of war) are prominent among them.

Considering the above, potential buyers should carefully evaluate all the mentioned risks, consult with experts before making a decision to buy a plot of land near the military demarcation line.

Conclusions. This study presents the results of research on the cartographic and analytical assessment of land price formation in Ukraine, depending on the physical and geographical conditions of the territory under military aggression.

Based on a literature and analytical review, it was established that the formation of land sale prices for three main land use categories-namely, 02.01

for the maintenance of residential and household buildings (homestead), 01.01 for commercial agricultural production, and 01.03 for personal farming-occurs under the complex influence of determining factors of political, economic, military, geographical, and other origins.

Among the main types of uncertainty, several determining factors were identified: political and military risks, instability of the legal environment, potential losses, uncertainty about the future, and uncertainty regarding the reliability (sufficient security) of the geographical location of land plots.

The study revealed that land sale prices for various purposes exhibit dynamic and geospatial differentiation, depending on the manifestation of different determining factors, such as the state of the military-political and economic situation, and their geographical location, particularly regarding soil cover. It was found that land prices are influenced by the location of land plots within urban agglomerations of large settlements and/or under the protection of natural obstacles, such as rugged terrain or large water bodies (lakes, rivers), which can potentially slow down military advances.

It was determined that the distance of land plots from the established combat line at 50, 80, and 100 km had little to no effect on land sale prices.

A significant influence was found regarding the distance of residential and household building plots from localized combat zones formed between 2014 and 2022. It was proven that land prices increased in the northern and southern directions along the combat line (ATO zone), which formed after 2014, reaching peak values in the agglomerations of large cities such as Dnipro, Mykolaiv, Odesa, Kherson, and Zaporizhzhia.

On the other hand, it was established that the presence of rivers, reservoirs, and other water bodies

in land price formation exerts an indirect protective influence and acts as a positive factor (increasing value).

Price ranges for land sales by year were established. In 2021, prices for residential building and household maintenance land ranged from \$7.0 to \$29.0 or more per 100 m²; for commercial agricultural production, from \$1,213 to \$6,760 or more per hectare; and for personal farming, from \$500 to \$3,600 or more per hectare. In 2022, the market for residential building and household maintenance land ceased to function; for commercial agricultural production, prices ranged from \$890 to \$4,980 or more per hectare; and for personal farming, from \$370 to \$2,655 or more. In 2023, prices ranged from \$5.5 to \$11.0, 890 to 4,960 UAH, and \$350 to \$2,650 respectively (per 100 m² and 1 hectare), which overall reflects a significant deterioration in Ukraine's economic climate and increased risks associated with

land sales transactions. Buyers of land plots face potentially higher risks, while sellers bear one-time financial losses.

The results indicate a general trend of changes in land prices across different regions of Ukraine. In particular, in Kharkiv, land prices for commercial agricultural production in 2022 reached their maximum value during the research period, while land for personal farming in the same region had its lowest values that year. Similar trends were observed in Zaporizhzhia and Dnipropetrovsk regions.

However, their price policies for land sales for different purposes vary significantly. For example, in Donetsk, the maximum land price for commercial production was recorded in 2021, while in Kherson, it was in 2023. In Mykolaiv, there was a gradual increase in prices for land for commercial production, while for personal farming, the maximum value was in 2023, and the minimum was in 2022.

Bibliography

1. Про експертну грошову оцінку земельних ділянок (16 Листопада 2011 р.). Отримано з: Офіційний портал Верховної Ради України: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1531-2002-%D0%BF#Text>.
2. Al-Adhami, A., & Abu-Shah, M. The Impact of the Civil War in Libya on Real Estate Prices. *Real Estate Market Journal*, 2014. P. 61-63.
3. Allouche, B., Kreindler, J. *The Impact of the Syrian Conflict on Land Prices in Urban Areas*, 2018.
4. Berk, C. The Impact of War on the Real Estate Market in Yemen: An Empirical Analysis. *Land Economics*, 2018. P. 4-10.
5. Elbersen, B., Beaufoy, G., Jones, G., Noij, I., van Doorn, A., Breman, B., & Hazeu. GIS-based assessment of land degradation due to military operations: A case study of XYZ conflict zone, 2020. P. 4-16.
6. Федірко, А., Хома, Р., & Резніченко, Д. Дослідження ринку нерухомості під час війни. *Ernst & Young – Forbes.ua*, 2022.
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. World Reference Base for Soil Resources, 2024. FAO Soils Portal: [https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-referencebase/en​contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-referencebase/en​contentReference[oaicite:0]{index=0})
8. Геоінформаційна система управління земельними ресурсами, 2022. Отримано з: Magnetic One Municipal Technologies: <https://magneticonemt.com/geoinformatsijna-sistema-upravlinnya-zemelnym-bankom-gromady>.
9. Guangsheng, Z., Hongmei, L., Yingxuan, W., Biao, C., Zongliang Z. The impact of rural out-migration on arable land use intensity: Evidence from mountain areas in Guangdong, China. *ScienceDirect*, 2016. P. 569-579.
10. John, A. G., & Marland, M. The Impact of War and Insecurity on Land Prices in Kabul, Afghanistan. 2019.
11. Ma, Y., Lyu, D., Sun, K., Li, S., Zhu, B., Zhao, R., & Zheng, M. Application of GIS for assessing land damage caused by military activities in conflict zones. *EconomicLiga*, 2019.
12. Моніторинг земельних відносин, 2023. Отримано з: Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру: <https://land.gov.ua/monitorynh-zemelnykh-vidnosyn/>.
13. Norton, C., Dannenberg, M., Yan, D., Wallace, C., Rodriguez, J., Munson, S., Smith, W. Utilizing GIS and remote sensing techniques for assessing land cover changes in conflict-affected areas, 2017. P. 8-17.
14. Регіональний посібник, 2019. Отримано з: Державна служба статистики України: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/12/zb_ru1ch2019.pdf
15. Santangelo, Grazia. The impact of FDI in land in agriculture in developing countries on host country food security, *Journal of World Business*, 2018. Vol. 53(1). P. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2017.07.006>
16. Шипулін, В. Основні принципи геоінформаційних систем. Харків: Харківська національна академія міського господарства, 2010.
17. Stefanski, J., Chaskovsky, O., & Waske, B. Mapping and monitoring of land use changes in post-Soviet western Ukraine using remote sensing data. *Appl. Geogr.*, 2014. P. 154-168. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.003>
18. Публічна кадастрова карта, 2021. Отримано з: KadastrLive. <https://kadastr.live/#6.8/49.615/33.445>
19. Thompson, S. The Real Estate Market in Conflict Zones. *Journal of Real Estate Research*, 2017.
20. Прозоре землекористування: запитання та відповіді (29.11.2022). Отримано з: <https://transparentcities.in.ua/articles/prozore-zemlekorystuvannia-zapytannia-ta-vidpovidy>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. About expert monetary valuation of land plots. Postanova dated October 11, 2002 N 1531 Kyiv. Verkhovna Rada of Ukraine <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1531-2002-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
2. Al-Adhami, A., & Abu-Shah, M. (2014). The Impact of the Civil War in Libya on Real Estate Prices. *Real Estate Market Journal*, 61-63.
3. Allouche, B., Kreindler, J. (2018). *The Impact of the Syrian Conflict on Land Prices in Urban Areas*.
4. Berk, C. (2018). The Impact of War on the Real Estate Market in Yemen: An Empirical Analysis. *Land Economics*, 4-10.
5. Elbersen, B., Beaufoy, G., Jones, G., Noij, I., van Doorn, A., Breman, B., & Hazeu. (2020). GIS-based assessment of land degradation due to military operations: A case study of XYZ conflict zone. 4-16.
6. Fedirko, A., Khoma, R., & Reznichenko, D. (2022). A study of the real estate market during the war Ernst & Young. *Forbes.ua* <https://forbes.ua/money/budivnistva-ne-zapuskayutsya-popitu-nemae-ale-tsini-ne-padayut-doslidzhennya-rinku-nerukhomosti-pid-chas-viyini-vid-ernst-amp-young-13032023-12337> [in Ukrainian].
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). World Reference Base for Soil Resources. FAO Soils Portal [https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en​:contentReference\[oaicite:0\]{index=0}](https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en​:contentReference[oaicite:0]{index=0}).
8. Geoinformation system of management of community land resources. (2022). Magnetic One Municipal Technologies: <https://magneticonemt.com/geoinformatsijna-systema-upravlinnya-zemelnyh-bankom-gromady> [in Ukrainian].
9. Guangsheng, Z., Hongmei, L., Yingxuan, W., Biao, C., Zongliang Z. (2016). The impact of rural out-migration on arable land use intensity: Evidence from mountain areas in Guangdong, China. *ScienceDirect*, 569-579.
10. John, A. G., & Marland, M. (2019). The Impact of War and Insecurity on Land Prices in Kabul, Afghanistan.
11. Ma, Y., Lyu, D., Sun, K., Li, S., Zhu, B., Zhao, R., & Zheng, M. (2019). Application of GIS for assessing land damage caused by military activities in conflict zones. *EconomicLiga*.
12. Monitoring of land relations. (2023). State Service of Ukraine for geodesy, cartography and cadastre: <https://land.gov.ua/monitorynh-zemelnykh-vidnosyn> [in Ukrainian].
13. Norton, C., Dannenberg, M., Yan, D., Wallace, C., Rodriguez, J., Munson, S., Smith, W. (2017). Utilizing GIS and remote sensing techniques for assessing land cover changes in conflict-affected areas, 8-17.
14. Region of Ukraine guide (2019). State Statistics Service of Ukraine: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/12/zb_ru1ch2019.pdf [in Ukrainian].
15. Santangelo, Grazia (2018). The impact of FDI in land in agriculture in developing countries on host country food security. *Journal of World Business*, 53, 75-84. <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2017.07.006>
16. Shypulin, V. (2010). The main principle of geoinformation systems. Kharkiv: Kharkivs'ka natsional'na akademiya mis'koho hospodarstva [in Ukrainian].
17. Stefanski, J., Chaskovskyy, O., & Waske, B. (2014). Mapping and monitoring of land use changes in post-Soviet western Ukraine using remote sensing data. *Appl. Geogr.* 154-168. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.003>
18. The public cadastral map (2021). Kadastr Live <https://kadastr.live/#6.8/49.615/33.445> [in Ukrainian].
19. Thompson, S. (2017). The Real Estate Market in Conflict Zones. *Journal of Real Estate Research*.
20. Transparent land use: questions and answers (29.11.2022). *Transparentcities* <https://transparentcities.in.ua/articles/prozore-zemlekorystuvannia-zapytannia-ta-vidpovidi-> [in Ukrainian].

Картографо-аналітична оцінка формування цін на земельні ділянки залежно від фізико-географічних умов території внаслідок військової агресії в Україні

Петро Трофименко¹

д. с.-г. н., доцент,

¹ Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка, ННІ «Інститут професійної освіти та технологій», Чернігів, Україна;

Анна Мінженер²

студентка бакалавріату,

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

ННІ «Інститут геології», Київ, Україна;

Віталій Зацерковний²

д. техн.н., професор, зав. кафедри геoinформатики;

Ірина Стахів²

к. геол. н., асистент;

Світлана Кобилянська³

директор,³ ТОВ «Оціночна компанія» «Аналітик», Київ, Україна

Представлене дослідження висвітлює питання формуванню ціни земельних ділянок в Україні внаслідок військової агресії в умовах невизначеності. Виконання досліджень передбачало виявлення особливостей формування реальної ціни земельних ділянок у випадку закінчення угоди купівлі-продажу в умовах невизначенос-

ті, залежно від комплексу ціноутворюючих чинників, в першу чергу, з урахуванням віддаленості від лінії бойового зіткнення з інтенсивними бойовими діями, географічними умовами території. Відсутність чіткого правового регулювання і високий ризик втрати майна зумовлюють укладання угод купівлі-продажу земельних ділянок з суттєвими обмеженнями. Використані методи досліджень: геопросторового аналізу даних, математичної статистики, картографо-аналітичної оцінки. Серед основних видів невизначеності ідентифікують декілька зумовлюючих чинників: політичні та військові ризики, нестабільність правового середовища, потенційні збитки невизначеність надійності (достатньої захищеності) географічного положення земельних ділянок, а також невизначеність майбутнього. Ціна продажу земельних ділянок різного цільового призначення має динамічну та геопросторову диференціацію, залежно прояву різних зумовлюючих чинників: стану військово-політичної, економічної ситуації та географічного їх розташування, яке в цілому узгоджується з якістю ґрунтів, характеризується місцезнаходженням земельних ділянок в середині міських агломерацій великих населених пунктів та/або під захистом природних перешкод у вигляді пересіченої місцевості, великих водних об'єктів (озер, річок), які потенційно можуть уповільнювати військовий наступ. Виявлено суттєвий вплив віддаленості земельних ділянок для обслуговування жилого будинку та господарських будівель від локалізованої зони бойових дій (у період 2014 - 2022 рр.), однак віддаленість земельних ділянок від лінії бойового зіткнення на відстані від 50 до 100 км практично не впливала на формування ціни купівлі-продажу земельних ділянок, що пов'язано з активізацією бойових дій та переходом ситуації у стан вищого ступеня невизначеності. Отримані результати надають важливу інформацію для планування перспектив розвитку ринку землі в умовах війни і післявоєнного відновлення, вказують на необхідність адаптації методів оцінки вартості землі з урахуванням наявних військово-політичних реалій. Результати дослідження вказують на необхідність внесення відповідних змін в методику нормативної грошової оцінки земельних ділянок та методику експертної грошової оцінки земельних ділянок.

Ключові слова: *фізико-географічні умови, ціна, невизначеність, геопросторові моделі, військова агресія, земельні ділянки, картографо-аналітична оцінка.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 13 жовтня 2024 р.

Прийнята 24 листопада 2024 р.

Key aspects of seawater intrusion in the Dniester River during storm surges

Yurii Tuckovenko^{1,2}

DSc (Geography), Professor, Head of Department of Oceanography and Marine Nature Management,

¹ Odessa National I. I. Mechnikov University, Odessa, Ukraine;

DSc (Geography), Professor, Chief Researcher,

² Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine, Odesa, Ukraine,

e-mail: tuch2001@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-3275-9065>;

*Nataliia Loboda*¹

DSc (Geography), Professor, Department of Land Hydrology,

e-mail: natalie.loboda@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-0794-9951>;

*Valeriya Ovcharuk*¹

DSc (Geography), Professor, Head of Department of Land Hydrology,

e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>

ABSTRACT

Introduction. This article explores the potential for saline water from the Dniester Estuary to travel upstream into the mouth of the Dniester River, a critical area where the “Dniester” station supplies potable water to Odesa City and where the intake point of the Lower Dniester Irrigation System is located. The study is urgent due to the risk that saline water poses to the quality of drinking and irrigation water at these intake points. The primary objective of this research was to utilize hydrodynamic modeling to determine the specific hydro-meteorological conditions under which saline, transformed sea water from the estuary could penetrate the mouth of the Dniester River.

Material and methods. To address this task, a simplified version (without considering the thermal factor) of the numerical 3-D non-stationary hydrodynamic model MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment), supplemented with a block for the transport of a conservative tracer, was used. The input data for the model included observations of wind condition variability and corresponding sea level fluctuations at the marine boundary of the Dniester Estuary, as well as observations of water level fluctuations in the mouth section of the Dniester River.

Results and Discussion. The findings of the study identified two key conditions necessary for such an event: (1) a significant reduction in the average daily river discharge to below 100 m³/sec, and (2) the occurrence of a strong surge wind from the south or southeast at speeds exceeding 15 m/sec, sustained for several consecutive days. Under these conditions, transformed sea water from the estuary can travel upstream through the right arm of the river, the Glybokyi Turunchuk. From there, it reaches the point where the Dniester River divides into two arms. The saline water is then drawn into the left arm, the Dniester, and eventually returns to the estuary. This process represents a significant threat to the region's freshwater resources, especially during periods of low river discharge and adverse wind conditions. The penetration of brackish estuarine waters into the Dniester River's mouth branches, namely the Dniester and Hlybokyi Turunchuk branches, occurs over some time of 12 to 24 hours. It has been concluded that due to the presence of two mouth branches through which the Dniester River flows into the Dniester Estuary, considering their location in the northeastern part of the estuary and the characteristics of water level rises in the estuary during wind surges, the penetration of estuarine waters with increased salinity (up to 7 ‰) into the main channel of the Dniester River (above the point where the river splits into two mouth branches) is unlikely, even when river discharge falls below 100 m³/s.

Conclusion. The case study presented in the article can serve as a valuable reference for experts tasked with designing hydro-engineering solutions. One proposed solution is the construction of a second estuarine canal (branch) to prevent the intrusion of transformed sea water into the river mouth, thereby safeguarding the quality of drinking and irrigation water in the region.

Keywords: Dniester Estuary, Dniester River mouth, transformed sea water penetration, up and down surge.

In cites: Tuckovenko Yurii, Loboda Nataliia, Ovcharuk Valeriya. (2024). Key aspects of seawater intrusion in the Dniester river during storm surges. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 272-287. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-22>

Introduction. An important problem faced by the population in the estuarine areas of many rivers is the deep penetration of saline seawater into the river mouths, which poses a risk to the stable fresh water supply for drinking, communal, and agricultural purposes.

The distance over which the transformed seawater penetrates the estuarine part of rivers is determined by two conditions: a decrease in the flow of water in the estuarine part of the river for one

reason or another, and a rise in the sea level, which occurs on different time scales. In the works [15, 30, 31] using hydrodynamic models, changes in the intrusion of salty seawater into river estuaries in seasons with minimal river runoff were determined, caused by a long-term trend of increasing the average annual sea level due to climate change.

The impact of storm surges on the intrusion of salt water into the mouth of the river was studied in the work [21, 32]. Although storm surges occur at

short intervals of a few days, combined with the rise in mean sea level caused by climate change, they can significantly increase the overall risk of saltwater intrusion into the estuary.

In addition to the peculiarities of the nature of sea level changes on different spatio-temporal scales and the temporal variability of the river flow, the penetration of salty seawater into the estuarine part of the river is influenced by other factors, such as the morphological structure of the river mouth and estuary (the number of estuarine branches, channels; the shape and size of the estuary, strait), anthropogenic regulation of the river flow, changes in the relief of the bottom due to natural processes and engineering measures [16, 17, 21, 22, 31, 32].

Therefore, the features of saltwater intrusion into the mouth of the river have a very individual character and should be studied separately. Accordingly, effective measures to prevent significant intrusion of saltwater into river estuaries or to mitigate their consequences will be different. It can be artificially regulating river runoff, building dams of various designs, reservoirs, and underground drainage networks [16, 23, 26, 32].

Four big European rivers flow into the north-western Black Sea: Danube, Dniester, Dnipro, and Pivdennyi Bug. The waters of the three last-mentioned rivers enter the sea through the Dniester Estuary and the Dnipro-Bug Estuary which are formed in their mouth areas. The conditions under which saline water penetrates the estuarine arms of the Danube have been considered in the work [4]; and in the Dnipro-Bug Estuary in the works [14, 25].

The Dniester Estuary is an expanded Dniester River valley stretching from the north-west to the south-east. The estuary is 44 km long, its maximum width is 12 km, average depth – 1.5-2.0 m, maximal depth – 2.6 m. The estuary is connected to the sea through the Dniester-Tsaregradske Mouth, about 300 m wide and 16 m deep. The estuarine mouth is connected to Bilgorod-Dnistrovskiy Port with a 14.5 km navigable canal. The estuary and the sea are divided by a 60 to 500 m wide and 11 km long sand and shell spit [9].

Black Sea tides are very low and are therefore categorized as non-tidal. The wind-induced up and down surges play a dominant role in the formation of the level fluctuations in the coastal zones on the time scales of a natural synoptic period [12]. The wind regime and the Dniester River discharge volume determine the water exchange between the Dniester Estuary and the adjacent north-western Black Sea.

The Dniester River is the main source of drinking water for Moldova and South-Western Ukraine [3]. The lower part of the catchment basin located in the arid zone is especially dependent on the water

level in the river. The Lower Dniester is a part of the river from Dubăsari (Moldova) down to the mouth (342 km). The lower part of the Dniester can be considered a transit one as the tributaries entering this river segment produce no significant influence on its water content. Most of those tributaries are drying up in the 21st century due to climate change [29]. The Dniester divides into two arms, the Dniester and the Shvydkyi Turunchuk, near the Moldavian village Cioburciu (140 km from the mouth), which converge near the Bile Lake (22 km far from the mouth). There is a Ukrainian water gauging station Nezavertaylivka on the Shvydkyi Turunchuk Arm and a Moldavian water gauging station Olanesti on the Dniester Arm. Downstream from the Bile Lake begins the Dniester Delta, which is entering the northeastern part of the Dniester Estuary. Three kilometers downstream from the village Maiaky the Dniester divides again into two estuarine arms (Fig.1a). The right arm called the Glybokyi Turunchuk is a man-made canal, which is ca. 100 m long and ca. 8-10 m deep; the other arm retains the name of the main river – the Dniester.

The “Dniester” Station (the intake structures abstracting water from the river to supply potable water to Odesa) is located five-six km upstream of Maiaky village near the town Biliaivka. Another intake is situated in Maiaky – this one is supplying water to the Lower Dniester Irrigation System watering the area of 20.0 thousand hectares [8].

The salinity regime of the Dniester Estuary is formed under the influence of freshwater discharge of the Dniester River and seawater inflow through the Tsaregradske Mouth. Sea water inflow gets more intensive during up and down surges caused by storm winds. In connection with the above the following question becomes topical: is it possible, and under which circumstances, that the water with increased mineralization will rise from the Dniester Estuary high upstream and reach the water intake structures, which could deteriorate the tap water quality in Odesa and restrict water abstraction for irrigation?

Earlier this matter was considered in the papers [2, 5, 9] in the context of peculiarities of the wind-driven rises and drops of water level in the Dniester mouth area. In particular, it was pointed out that intensive variations of water level with big amplitude take place in the mouth area on condition of river discharge decreases down to 100-130 m³/sec and stormy winds develop over the north-western Black Sea and the Dniester Estuary in the directions that are effective to cause strong up or down surge of waters in the estuary [2]. At that, with the increase of the Dniester discharge, the surges become less intensive. The paper [2], concerning P.Z. Ryabkov (1896), A.M. Befani (1998), V.M. Gontarenko

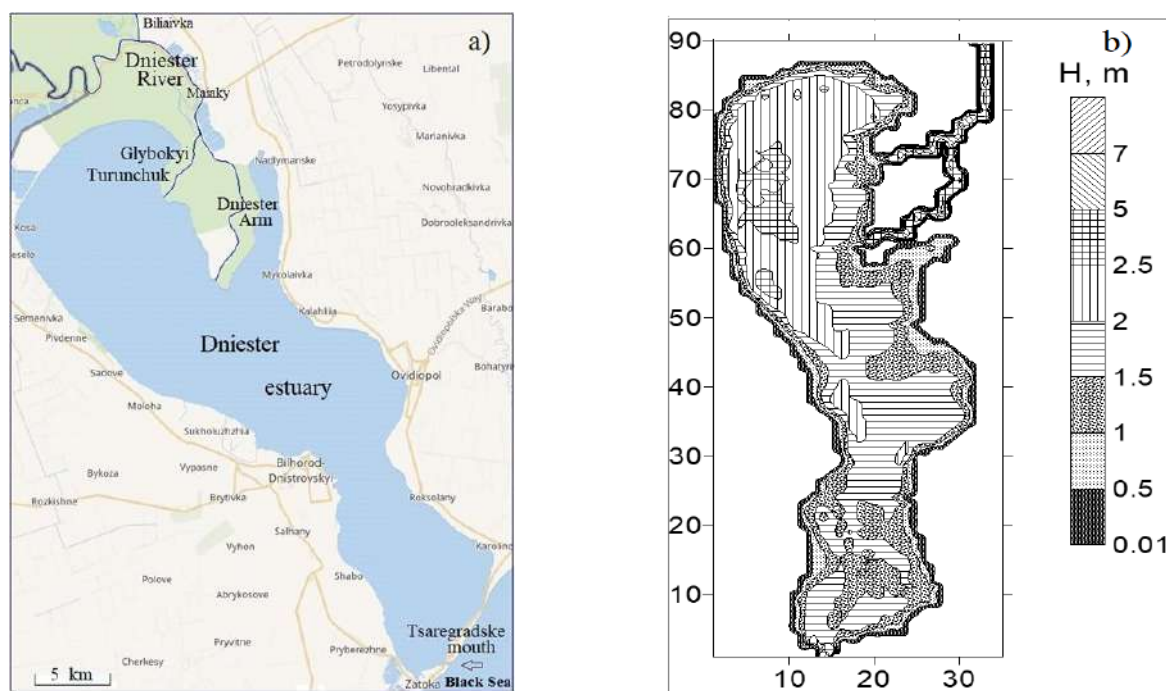


Fig. 1. Schematic map of the Dniester River mouth area and Dniester Estuary (a). Horizontal calculation grid and bathymetrical map of the Dniester Estuary with the adjacent Dniester River mouth area (the numbers of the calculation grid nodes with the horizontal step of 500 m are specified on the coordinate axes) (b)

(1992, 1993) mentions the possibility of the transformed sea water reaching the river intake structures ('Odesa Drinking Water Station'). However, it is our opinion that this is mostly an assumption based on the observations of water level in the river mouth in 1985 and 1986 (before the Dniester Reservoir was built) rather than on direct measurements of water mineralization. At the same time there is a conclusion in [13] that though the wind-driven water level fluctuations can be registered even near Olanesti (84 km from the mouth), saline water is not entering the river mouth. Water mineralization in the lowest segment of the river mouth near Maiaky is the same as in the upstream area (village Olanesti – town Bender).

The purpose of the work is to establish, using hydrodynamic modelling, the hydro-meteorological conditions under which the transformed sea water from the Dniester Estuary could enter the mouth part of the Dniester River and impact the quality of water used for drinking and irrigation.

Material and methods. The probability of transformed sea water backflow penetration into the Dniester arms depends significantly on the dryness of a year. With river flow increase, the probability of saline water tongue penetration from the estuary into the river mouth area becomes lower. In connection with the above, it is important to establish the real level possible of decrease in the Lower Dniester water discharge resulting from the joint impact of climatic change [6, 7] and water management activities.

Due to the increase in air temperatures against the background of almost constant precipitation, climate changes negatively affect the water content of the Middle and Lower Dniester tributaries. According to estimates [10], for the RCP4.5 scenario, the water resources of Nizhny Dniester should decrease by 30% by 2050 compared to the period before the onset of climate change (the 90s of the XX century), and under the RCP8.5 scenario - by 60%.

Seasonal runoff regulation is carried out by the Upper Dniester (Dniester) reservoir for hydropower purposes, located at a distance of 677.7 km from the mouth, after the way out of the main river from the Ukrainian Carpathians. The reservoirs are operated by the "Operation Rules", which should regulate water releases including the minimum guaranteed flow required for fish spawning and the Dniester reed-beds functioning. These rules state that the minimum average daily water discharge in all seasons should be not less than 100 m³/sec. The work [11] gives the minimum average monthly and daily flow values in front of the city Bender under natural conditions (Table 1). It can be seen from the Table that water discharges in the volume of 100 m³/sec should ensure a better mode of the minimum river flow formation than it was under natural conditions.

The average daily discharge of 100 m³/sec, guaranteed through water discharges of the Upper Dniester hydropower plant, maintains the water content of the river during the low-water season. However, in arid years a contradiction may arise between meeting the operational conditions of the

Table 1

Minimal, monthly average and daily discharge (m³/sec) in front of city Bender (Lower Dniester) under the natural conditions

Period	Summer			Winter		
Probability of exceeding a given value, %	75.0	95.0	99.0	75.0	95.0	99.0
Average monthly water discharge, m ³ /sec	116.0	89.5	82.5	117.0	87.5	65.0
Average daily water discharge, m ³ /sec	91.5	78.0	62.5	61.0	47.0	30.0

reservoir (water reserves in it) and the guaranteed water releases to meet the needs of the Lower Dniester. To determine the possibility of such situation occurrence, the data of the average monthly and daily Dniester flow observations at Olanesti village (1959-2016) and the Shvydkyi Turunchuk flow observations at Nezavertailivka village (1971-2017) were considered. Both gauging stations are located upstream of the Biliaivka water intake.

Analysis of the results shows that the minimum values of the average monthly flow at those gauging stations are observed in January and July. The average long-term runoff for January at the Olanesti measuring station is 93.3 m³/sec. This parameter is almost the same for the periods before and after the construction of the Upper Dniester hydropower station. The minimum average daily value for the entire observation period was 14.0 m³/sec; it was observed in 1962 (04.01.1962) before the Upper Dniester hydropower station was built.

After 1987, the long-term average value of the minimum daily winter runoff was 59.2 m³/sec; the lowest value was 35 m³/sec (1991). The lowest daily flow rates in the Shvydkyi Turunchuk Branch measured at Nezavertailivka were registered in the 1970s

and made ca. 43-45 m³/sec. At the beginning of the 21st century, the average daily flow at the Nezavertailivka gauging station was about 79 m³/sec throughout the year. Thus, it was established that according to the data on total discharge of the Dniester Branch (Olanesti gaging station) and the Shvydkyi Turunchuk Branch (Nezavertailivka gauging station), the minimum flow rate of the water coming from the main channel to the point where it divides into the Glybokyi Turunchuk and Dniester arms can be assumed as ca. 50 m³/sec - 120 m³/sec.

To solve the task mentioned in the objective of the article, a simplified variant (disregarding thermal factor) of the numerical non-stationary 3-D hydrodynamic MECCA model (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) [18-20] was applied. This model allows calculating water dynamics and distribution of an admixture in marine basins that have areas with smaller (sub-grid) sizes than the step of the computational grid in one of the horizontal directions (for example a connecting channel). The initial set of equations of the model is defined as follows.

The equations of motion in Boussinesq approximation in Cartesian coordinates:

$$\partial_t u + B_x^{-1} \partial_x (B_x u u) + \partial_y (u v) + \partial_z (u w) = -\alpha_0 \partial_x P + f v + B_x^{-1} \partial_x (2 B_x A_h \partial_x u) + (1 - \beta_c) \partial_y [A_h (\partial_x v + \partial_y u)] + \partial_z (A_v \partial_z u) - \beta_c C_{ws} B_x^{-1} u |u|, \quad (1)$$

$$\partial_t v + \partial_x (v u) + B_y^{-1} \partial_y (B_y v v) + \partial_z (v w) = -\alpha_0 \partial_y P - f u + B_y^{-1} \partial_y (2 B_y A_h \partial_y v) + (1 - \beta_c) \partial_x [A_h (\partial_y u + \partial_x v)] + \partial_z (A_v \partial_z v) - \beta_c C_{ws} B_y^{-1} v |v|. \quad (2)$$

The continuity equation:

$$B_x^{-1} \partial_x (B_x v) + B_y^{-1} \partial_y (B_y v) + \partial_z (w) = 0. \quad (3)$$

The equation of salt conservation:

$$\partial_t S + B_x^{-1} \partial_x (B_x u S - B_x D_h \partial_x S) + B_y^{-1} \partial_y (B_y v S - B_y D_h \partial_y S) + \partial_z (w S - D_v \partial_z S) = 0. \quad (4)$$

The hydrostatic equation:

$$\partial_z P = -\rho g. \quad (5)$$

The equation of state:

$$\rho = \rho_0 [1 + F_p(S)]. \quad (6)$$

Here u , v , and w are the components of the current velocity vector $\vec{v}$ in directions x , y , and z , respectively; t is the time; f is the Coriolis acceleration; P is the pressure; g is the gravitational acceleration;

ρ is the water density; $\alpha_0 = 1/\rho_0$ is the reference specific volume of water; S is the water salinity; A_h and A_v are the horizontal and vertical momentum diffusivity, respectively; D_h and D_v are the coefficients of horizontal and vertical mass diffusivity; B_x and B_y are the dimensionless (relative to the sizes of a cell of the computational grid) widths of flow in the x and y directions, respectively. The ∂_x , ∂_y , ∂_z , and ∂_t , represent the corresponding partial derivatives (e.g. $\partial F / \partial t = \partial_t F$).

The set of modelling equations written above takes into account the presence of a channel with a sub-grid scale in one of the horizontal directions and was obtained from the original set of equations formulated in standard form for the 3D hydrodynamical model [18]. The original initial set of equations of hydrodynamics was integrated in the direction normal to the flow in the horizontal plane. The resulting set of equations was compared with the initial one and a new set of equations was defined. The new set of equations corresponded to the initial one in the absence of a channel (three-dimensional flow) and to the equations integrated across the flow (two-dimensional flow) in the presence of a channel. In Eqs. (1)–(2), the multiplication factor β_c equals 0 in the absence of a channel and 1 in the presence of a channel; C_{ws} is the drag coefficient between the channel and the side. Equations (1)–(4) automatically turn into the corresponding traditional equations for $\beta_c = 0$ and $B_x = B_y = 1$. The equation of state and the hydrostatic approximation to the vertical momentum equation are unchanged. With such modifications, the model permits to calculation of currents and transfer of an admixture in river mouths or channels where the width of flow is less than the step of the computational grid (i.e. sub-grid scale) in one of the horizontal directions.

Model equations were transferred to the σ -vertical coordinate system to improve the computational properties of the model and to obtain a more precise description of water's vertical dynamic and

thermohaline structure in the region of small depths. The method for solving the hydrodynamic problem envisages the decomposition of the total current velocity into the velocity averaged over depth (barotropic component) and deviations from this velocity at each depth used for computations (baroclinic component).

The vertical turbulent viscosity is described by the semi-empirical theory of turbulence with the use of mixing length arguments. The instantaneous viscosity is described as the function of a mixing length, the local vertical velocity shear, and the water column stability [18-19].

$$A_v = A_{v0} + A_z [C_{R0}(1 + C_{R1} Ri)^{-C_{R2}}]; \quad (7)$$

$$D_v = D_{v0} + A_z [C_{R3}(1 + C_{R4} Ri)^{-C_{R5}}]; \quad (8)$$

where

$$A_z = [\kappa z(1 - z/H)]^2 \sqrt{(\partial_z u)^2 + (\partial_z v)^2}; \quad (9)$$

$\kappa = 0.4$ is the Kármán's constant; A_{v0} is the reference viscosity; D_{v0} is the background vertical mass diffusivity; C_{R0} , C_{R1} , C_{R2} , C_{R3} , C_{R4} , and C_{R5} are the constants equal to 1.0, 10.0, 0.5, 1.0, 3.33, and 1.5, respectively [24]; and Ri is the Richardson number.

The coefficients of horizontal turbulent exchange are calculated from the value of the local horizontal shift of the barotropic component of current velocity and the pace step ΔL of the horizontal finite-difference grid [27]:

$$A_h = A_{h0} + C_{AH}(\Delta L)^2 \sqrt{2[(\partial_x U)^2 + (\partial_y V)^2] + (\partial_y U + \partial_x V)^2}; \quad (10)$$

$$D_h = A_h, \quad (11)$$

where U and V are the components of the vector of the vertically-integrated horizontal current velocities; C_{AH} is the coefficient for horizontal diffusivity and A_{h0} is the background value.

The boundary conditions for the set of Eqs. (1)–(6) are defined as follows.

(i) At the sea surface ($z = 0$):

$$\begin{aligned} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) &= \rho A_v (\partial_z u, \partial_z v); D_v \partial_z S = 0; \\ w &= \frac{dh}{dt}; P = P_a, \end{aligned} \quad (12)$$

where h is the deviation of the sea level from the unperturbed state; C_w is the specific heat capacity of water; P_a is the atmospheric pressure; τ_{sx} , τ_{sy} are the wind stresses at the upper (air-water) interface are given by the formulas:

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= (C_{aw1} + C_{aw2} W_{10}) W_{10} W_x, \\ \tau_{sy} &= (C_{aw1} + C_{aw2} W_{10}) W_{10} W_y, \end{aligned}$$

where W_x and W_y are the components of the wind velocity at a height of 10 m over the sea level along the x - and y - axes, respectively, W_{10} is the

modulus of wind velocity at a height of 10 m, and C_{aw1} and C_{aw2} are the friction coefficients set equal to 0.0008 and 0.000065 sec/m, respectively.

(ii) At the bottom ($z = -H$):

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho A_v (\partial_z u, \partial_z v); D_v \partial_z S = 0. \quad (13)$$

where τ_{bx} , τ_{by} are the bottom friction stresses at the lower (water-bottom) interface have the form:

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \Phi u_b \text{ and } \tau_{by} = \Phi v_b; \\ \Phi &= [C_{wb1} + C_{wb2} (u_b^2 + v_b^2)^{1/2}], \end{aligned}$$

u_b and v_b are the components of the bottom current velocity; C_{wb1} and C_{wb2} are the friction coefficients whose typical values are equal to 0.001 and 0.0026 m/sec, respectively.

At the point of entry of the river bed into the computational domain, boundary conditions have the following form:

$$h_t = \frac{Q_r}{B_x B_y \Delta L^2}, (HS)_t = 0, \quad (14)$$

where Q_r - river discharge, m³/sec.

At the open sea border, we specify the perturbations of the sea level caused by wind action, $h = h_m(x, y, t)$. The following conditions are formulated for S : if the flow enters into the computation region, then baseline values (S^*) characteristic of the open sea are assigned to the border with the open sea; otherwise, values of modeled variables are extrapolated from the region of computation with the help of simplified advection equations

$$S_m = S^* \text{ if } \vec{v}\vec{n} \leq 0; \quad (15)$$

$$\partial_t S_m = -\vec{v}\vec{n}\partial_{\vec{n}}S \text{ if } \vec{v}\vec{n} > 0, \quad (16)$$

where $\vec{v}\vec{n}$ is the projection of the vector of current computed at the boundary points of the domain onto the outer normal to that boundary.

The model's structure permits to assimilation of new information on the variability of meteorological and hydrological parameters with a given time resolution for (i) speed and wind direction at the sea surface; (ii) water salinity, sea level at the open sea border; (iii) water discharge, mineralization of river waters at the on the lateral liquid boundary. The linear interpolation in time is done between discrete input values.

The following values were used for modeling parameters: $C_{ws} = 0.008$; $A_{h0} = 1.0 \text{ m}^2\text{sec}^{-1}$; $C_{AH} = 0.01$; $A_{v0} = D_{v0} = 10^{-6} \text{ m}^2\text{sec}^{-1}$.

Previously, the model was successfully used to determine effective ways to stabilize the hydrological and hydroecological regimes of the Tiligulsky, Dofinovsky, and Tuzlovsky estuaries of the north-western Black Sea region [1, 20, 28].

During calculations, the estuary's water area together with the adjacent estuarine section of the Lower Dniester was covered with a horizontal calculation grid of 35x90 nodes, its step was 500 m (Fig. 1b). Six vertical calculation levels in the σ - s-coordinate system was used.

The probability of the transformed seawater penetration from the Dniester Estuary up into the Dniester mouth area increases when the small values of the river discharge coincide with strong (storm) surge-driving winds. Those winds contribute to sea waters' rising into the estuary and further to the Dniester River arms; they also contribute to water level rises in the area of the estuary, which is the mouth seaside of the Dniester River. That is why in the first set of numerical experiments with the model the winds of different directions and forces were combined with low-water period discharges in the Dniester River main channel (upstream of the intake structures) that were set artificially decreased starting with 175 m³/sec (175, 150, 125, 100, 75, 50). During that stage, we did not take into account the wind-induced sea level fluctuations (up and down surges) at the open sea border of the calculation area (the Tsaregradske Mouth of the Dniester Estuary).

During the second set of digital experiments, the real wind conditions were set, and the respective sea-level fluctuations by the data from observation at the "Tsaregradske Mouth" Marine Hydrometeorological Station (MHS) and the "Bilgorod-Dnistrovskiy" Marine Hydrometeorological Station. The average daily Dniester River discharges (upstream of the intake structures) were set artificially reduced starting with 175 m³/sec. Out of the standard observation sets for the period 1990-2010 three month-long intervals were picked up with the most favorable conditions for the transformed seawater to enter the Dniester River estuarine arms and the Glybokiyi Turunchuk: strong surges with a significant increase in water level both on the border between the estuary and the sea and in the estuary, namely: October 1994, March 2007 and September 2008.

Results and discussion. The first set of numerical experiments with the model has shown that the strongest surges in the Dniester Estuary happen at southern and south-eastern winds (Fig. 2). At south-eastern wind, in case of its force growing during three days from 5 to 25 m/sec, the difference in level between the southern and the northern parts of the estuary reaches 170 cm. However, the transformed sea water enters only the Glybokiyi Turunchuk Arm and this only starts under the condition that the average daily discharge in the main river is below 100 m³/sec, which coincides with the conclusions from the previous studies [5].

It is shown in Fig. 3 how the nature of the barotropic (depth-averaged) water circulation in the estuary and the arms of the Dniester River estuarine part changes with strengthening of southern and south-eastern surge-driving winds and the river water discharge of about 75 m³/sec. It can be seen that with the wind speed increase from 10 to 20 m/sec, during the second day, the direction of the current in the Glybokiyi Turunchuk Arm changes to the opposite – the water starts to go from the estuary into this estuarine arm.

When the high wind speed (20-30 m/sec) stays during the third day of the modelling time, the water level at the point where the river divides into two arms grows so much due to hydraulic backwater that the flow of the Glybokiyi Turunchuk Arm towards the estuary is restoring.

The described features of water flow directions variability in the Dniester River estuarine branches are explained by the fact that, as can be seen in Fig. 2, with given surge winds the water level in the estuary near the Glybokiyi Turunchuk Arm mouth is 15 cm higher than the water level in the estuary near the entrance to the Dniester Arm. Therefore, it is natural that the estuarine water enters the river mouth through the Glybokiyi Turunchuk Arm.

When the speed of a storm surge wind stays the

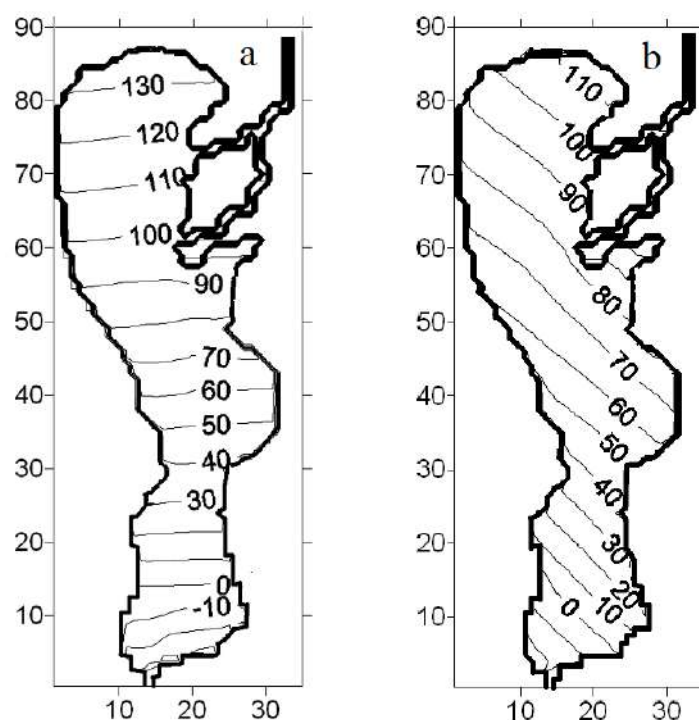


Fig. 2. Denivelation of water level in the Dniester Estuary (cm) with strengthening of the south-eastern (a) and southern (b) winds up to 20-25 m/sec

same or gets somewhat weaker, as the result of water level increases in the place where the main flow of the Dniester River splits into two arms, the Glybokyi Turunchuk and the Dniester, due to the river water backing up by the estuarine, the flow from the estuary into the Glybokyi Turunchuk Arm first gets weaker and then changes for the usual, in direction to the estuary, but its intensity is lower than before (Fig. 3c).

It should be pointed out that in case of southern and south-eastern storm winds that cause the highest surge in the upper part of the estuary, the water level mark at the outlet of the Dniester Arm is always lower than those of the Glybokyi Turunchuk Arm and the place where the main river channel divides into the two arms. At the same time, in different temporal periods of wind surge development, the level in the Glybokyi Turunchuk Arm can be both higher and lower than that at the point of the main river channel division into the two mouth arms.

Variability of salinity spatial distribution obtained for the hydrometeorological conditions described above using the model is presented in Fig. 4. As the southern and south-eastern surge winds intensify, the transformed sea water of higher salinity rises up along the estuary's eastern shore to the mouths of Glybokyi Turunchuk and Dniester Arm. Penetration of waters having a salinity of 4-7 ppt into the Glybokyi Turunchuk is visible. The front of estuarine brackish water penetrates this branch up to the point where the Dniester main channel divides into two branches, the Glybokyi Turunchuk, and the

Dniester Arm, after which the brackish estuarine water mixes intensively with the fresh river water and returns to the estuary through the Dniester Arm with the river flow.

The process of brackish estuarine water penetration in the Glybokyi Turunchuk Arm develops in a period of one day. Preliminary analysis of results of the second series of numerical experiments with the model for three selected monthly samples of real variability of the wind conditions and the corresponding sea level fluctuations in the Tsaregradske Mouth showed that penetration of transformed sea waters into the Dniester River estuarine arms occurred only in the case of the storm observed in March 2007. Wind conditions variability in March 2007, according to the data from the Tsaregradske Mouth MHS, is shown in Table 2.

The variability of sea level deviations from its initial undisturbed state during the period of calculation (March 2007) is shown in Figure 5a. It can be seen that in the period from 18 to 23 March a wind-caused rise in water level happened at the seaward edge of the estuary in the Tsaregradske Mouth, as well as in the part of the estuary near the river mouth. At the same time, the wind-induced water level rise in the estuary near the mouth of the Dniester River exceeds that at its sea border significantly (by 1.2 m during the period of maximal surge). During the mentioned period of intense surge, the conditions established under which the water level mark in the estuary near the mouth of the Glybokyi Turunchuk Arm exceeded the level mark at the point

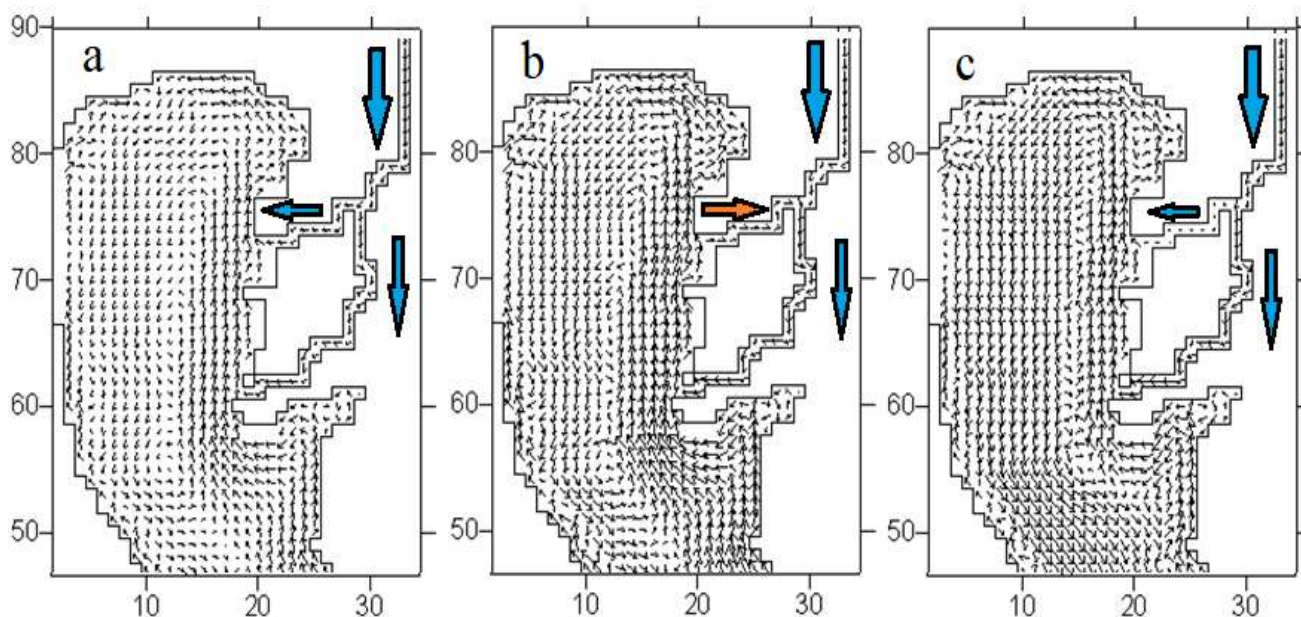


Fig. 3. Variability of barotropic (average in depth) circulation of water at strengthening of the south-eastern wind from 5 to 25 m/sec and the Dniester discharge of $75 \text{ m}^3/\text{sec}$:
a) the first modeled day; b) the second day; c) the third day of wind speed growth

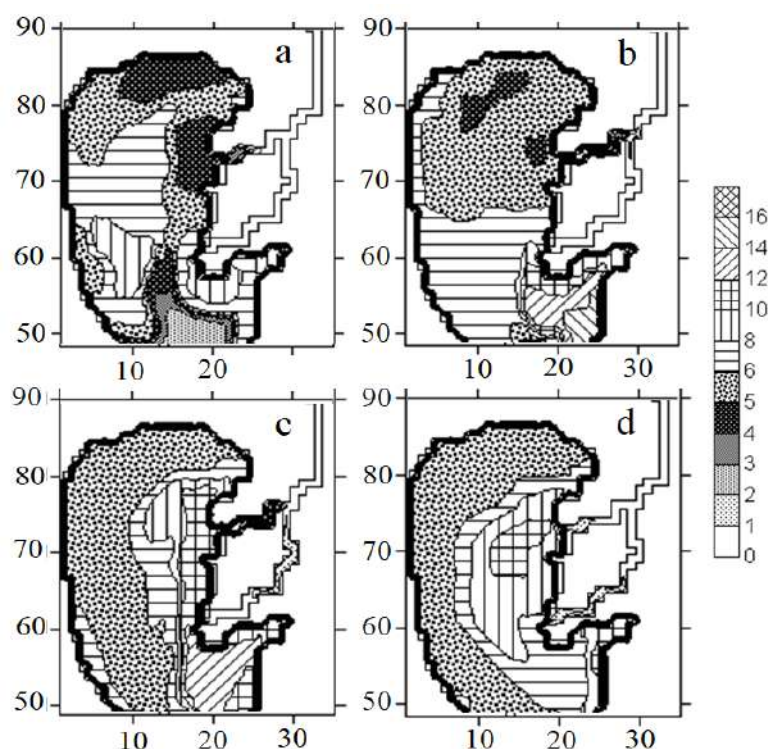


Fig. 4. Variability of water salinity (ppt) spatial distribution obtained from the model at growing southern wind speed from 5 to 25 m/sec and the Dniester discharge of $75 \text{ m}^3/\text{sec}$:
a) in 1 day at 10-15 m/sec southern wind; b) in 1.5 days at 20 m/sec southern wind;
c) in 2 days at 25 m/sec southern wind; d) in 2.5 days at 20 m/sec southern wind

where the main channel of the Dniester River divided into two branches - the Glybokyi Turunchuk and the Dniester Arm (Figure 5b).

In such periods the water from the estuary enters the Glybokyi Turunchuk Arm. The water level mark in the estuary near the Dniester Arm mouth is

always lower than the mark at the point where the Dniester River main channel splits into two arms. Therefore, no transformed marine (estuarine) water enters the Dniester Arm from the estuary.

Wind conditions during the period of intensive surge development in the estuary were characterized

Table 2

Wind Speed and Direction Variability in March 2007 According to the Data of Observations at the Tsaregradske Mouth MHS

Date	Time, Hour	Wind Direction, Rhumbs	Wind Speed, m/sec	Time, Hour	Wind Direction, Rhumbs	Wind Speed, m/sec	Time, Hour
17.03.07	6	NW	3	22.03.07	6	SE	7
	18	S	6		18	E	9
18.03.07	6	NW	14	23.03.07	6	E	12
	18	Calm	0		18	E	25
19.03.07	6	S	5	24.03.07	6	E	22
	18	NE	10		18	N	6
20.03.07	6	S	14	25.03.07	6	N	7
	18	S	14		18	NE	8
21.03.07	6	S	14	26.03.07	6	NE	11
	18	SE	15		18	W	7

Notes: S – southern; N – northern; E – eastern; W – western; SE – south-eastern; SW – south-western; NE – north-eastern; NW – north-western.

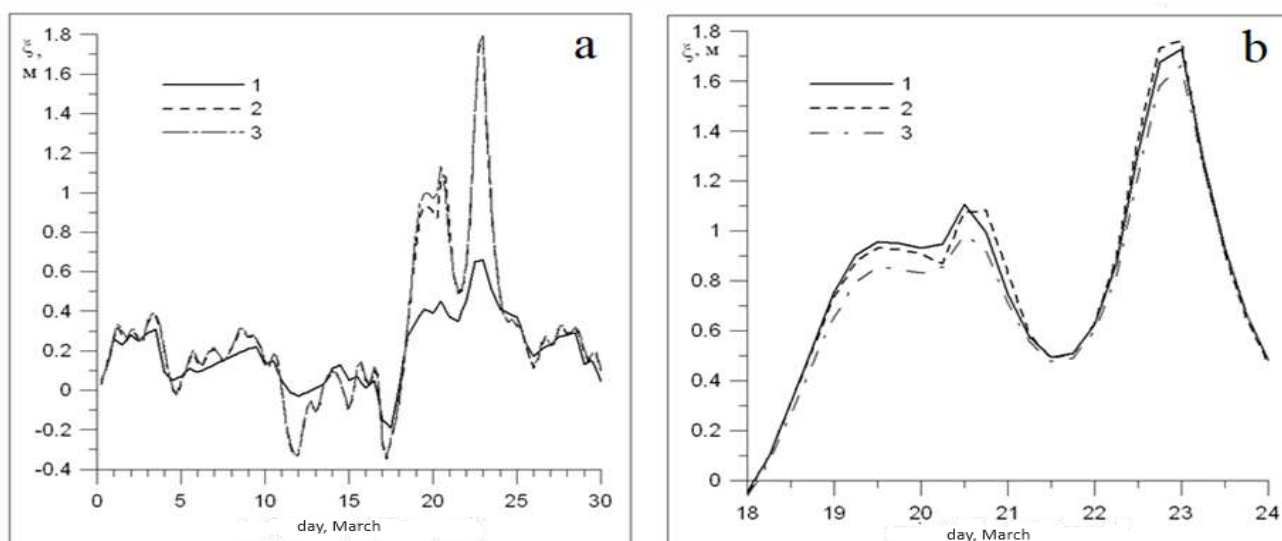


Fig. 5. Water level denivelation (m) in March 2007: a) 1 – according to the data of observations in the Tsaregradske Mouth; calculated by the model: 2 – at the entrance to the Glybokyi Turunchuk Arm from the estuary; 3 – in the Dniester River at the water gauging station in Maiaky village; b) calculated by the model: 1 – at the point where the Lower Dniester splits into branches, grid point (28.76); 2 – at the exit of the Glybokyi Turunchuk Arm into the estuary, grid point (21.73); 3 – at the exit of the Dniester Arm into the estuary, grid point (19.61)

by the dominance of the southern and southeastern winds at a speed of 5-15 m/sec for 3.5 days from 03/19 to 03/22/2007 (Table 2). At that, the storm winds with the speed of 14-15 m/sec lasted for 2 days.

The variability of the spatial distribution of water level deviations from the initially set sea level mark (as of March 1, 2007) during the period of intense water surge in March 2007, calculated using the model, is shown in Figure 6. It can be seen that at the maximal surge on 22.03.2007, the skew of the water level between the southern and northern ends of the estuary reaches 1.5 m. The water level mark in the estuary near the Glybokyi Turunchuk Arm

mouth is 15-20 cm higher than the level mark near the mouth of the Dniester Arm.

Schemes of the depth-averaged (barotropic) water circulation in the estuary and estuarine segment of the Dniester River, with stationary average daily discharge of 50 m³/sec during the wind surge development period are shown in Figure 7. The formation of the current directed from the estuary into the Glybokyi Turunchuk Arm during the 21st and 22nd days of calculations (March 21-22) is visible. The discharge flow from the Dniester Arm into the estuary continues during the entire period of the surge.

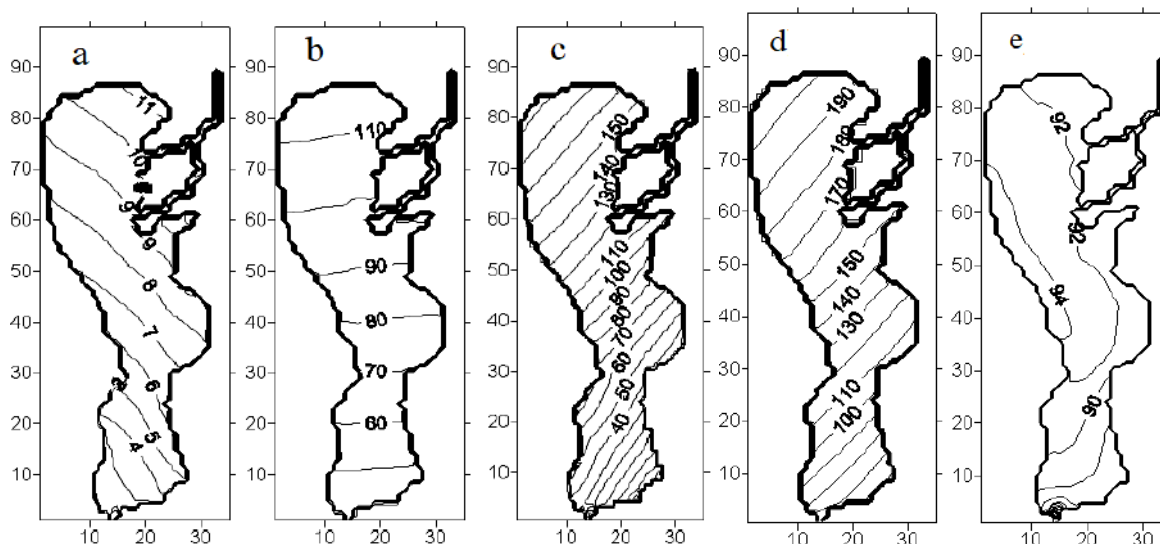


Fig. 6. Model-calculated variability of the spatial distribution of water level deviations (cm) in the estuary from the initially set level in March 2007 (as of March 1, 2007): a) 18th day, 0:00; b) 20th day, 0:00; c) 22nd day, 12:00; d) 23rd day, 0:00; e) 23rd day, 12:00

The model-calculated variability of the water salinity spatial distribution in the estuary's water area and the Dniester River mouth, at the unchanged average daily discharge (Maiaky water gauging station) of 100, 75, and 50 m³/sec, is presented in Figure 8-9. It can be seen that the lower the Dniester River flow under the same wind conditions, the more intensively and in larger volume brackish estuarine water penetrates the river mouth. Thus, in case the Dniester River discharge is set as 100 m³/sec for the period of maximal surge development during the 22nd day of the month, brackish estuarine water rises only to the middle of the northern arm (Glybokyi Turunchuk).

When the discharge is 75 m³/sec, the estuarine water penetrates the river mouth almost up to the place where it divides into two estuarine arms, while in case the average daily discharge of the Dniester River drops down to 50 m³/sec (Figure 9) the brackish estuarine water reaches the point where the Dniester divides into two branches (Glybokyi Turunchuk and Dniester Arm) and is drawn by the discharge flow into the Dniester Arm increasing its water salinity to 3-4 ppt. At that, the time of brackish estuarine water stay in the river mouth area also increases.

It can be seen from (Figure 9) that by the middle of the 23rd day, during the stage of the surge termination and water level decrease in the estuarine area, when the estuarine water is already pressed out by the discharge flow from the Glybokyi Turunchuk Arm into the estuary, the brackish water is still present in the Dniester Arm and its salinity makes several ppm.

In conclusion, we have to note that the results obtained in the first and second series of numerical

experiments with the model are in good agreement with each other and allow us to generalize the conclusion on the conditions and nature of the penetration of transformed sea water (brackish, estuarine) into the Dniester River mouth.

Conclusion. It was established based on hydrodynamic modeling results that the most favorable conditions for saline seawater penetration in the Dniester Estuary and then, after transformation into brackish estuarine waters, the estuarine arms of the Dniester River, are the storm surge-causing winds of southern and south-eastern directions.

The following circumstances should coincide for the transformed seawater penetration of the Dniester Estuary: average daily discharge of the Dniester should go down to 100 m³/sec or below; surge winds from the south or southeast at a speed of 14-20 m/sec should prevail for several days.

The transformed sea water penetrates the estuarine arms and further, the Dniester River main channel from the estuary through the right estuarine arm, the Glybokyi Turunchuk, and then, having reached the point where the Dniester River channel divides into two estuarine arms, the water from the estuary is drawn into the left branch (the Dniester Arm) by the discharge flow and returns via the Dniester Arm back to the estuary.

The process of brackish estuarine water penetration in the Dniester and the Glybokyi Turunchuk estuarine arms takes place over 12-24 hours.

Since water level in the estuary at the entrance to the Glybokyi Turunchuk Arm at surge winds from the sea will always be higher than at the entrance into the Dniester Arm, is unlikely that estuarine water of higher salinity (up to 7 ppt) could penetrate the main channel of the Dniester River (that is high-

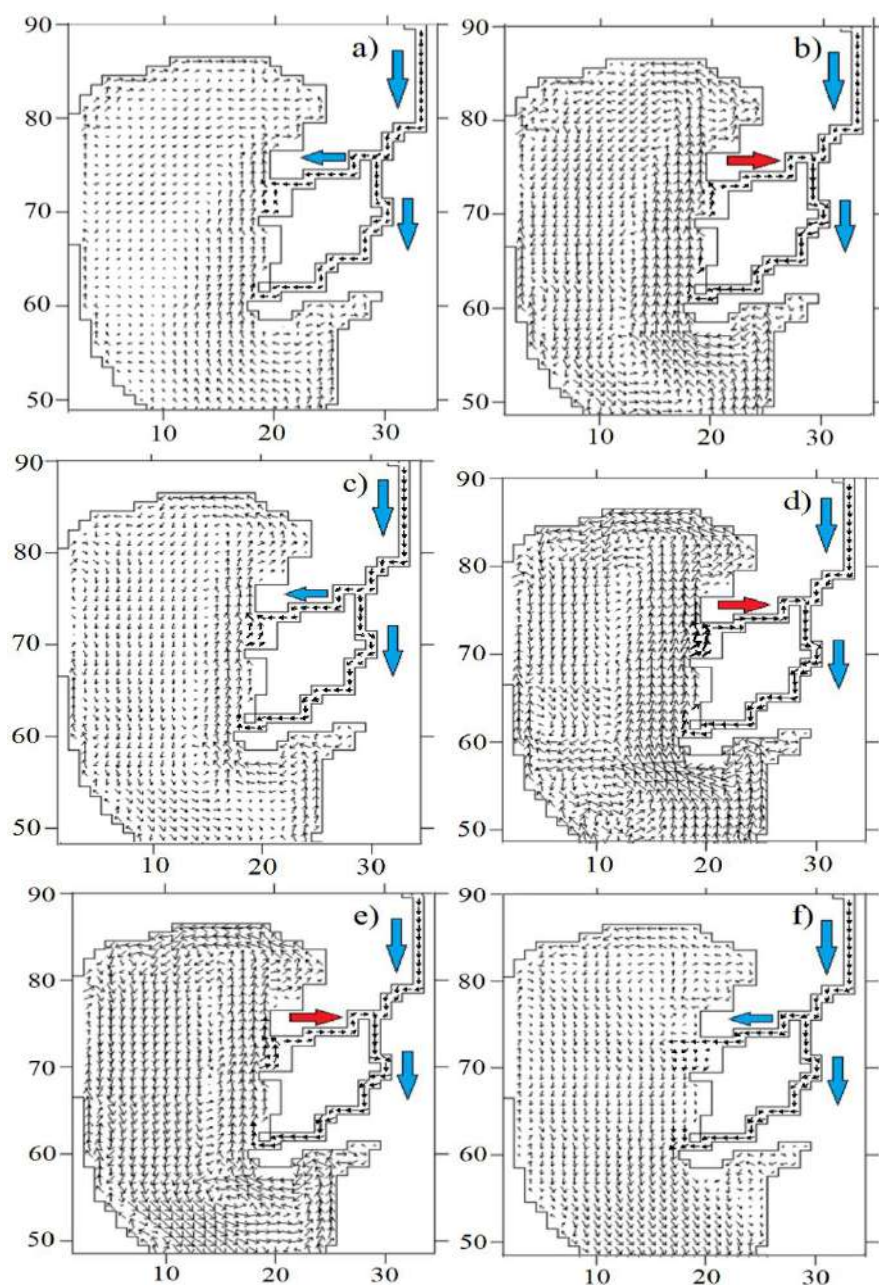


Fig. 7. Variability of barotropic (depth-mean) water circulation in March 2007 at the Dniester River average daily discharge of $50 \text{ m}^3/\text{sec}$: a) 18th day, 0:00; б) 21st day, 0:00; c) 22nd day, 0:00; d) 22nd day, 12:00; e) 23rd day, 0:00; f) 23rd day, 12:00

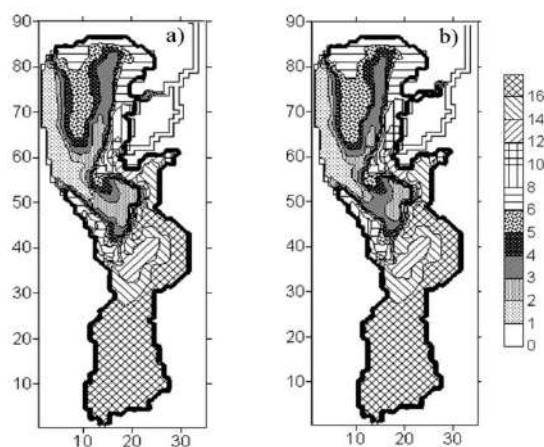


Fig. 8. Variability of water salinity (ppt) spatial distribution obtained from the model for 12:00 of 22 March 2007 at the Dniester River average daily discharge of a) $100 \text{ m}^3/\text{sec}$; б) $75 \text{ m}^3/\text{sec}$

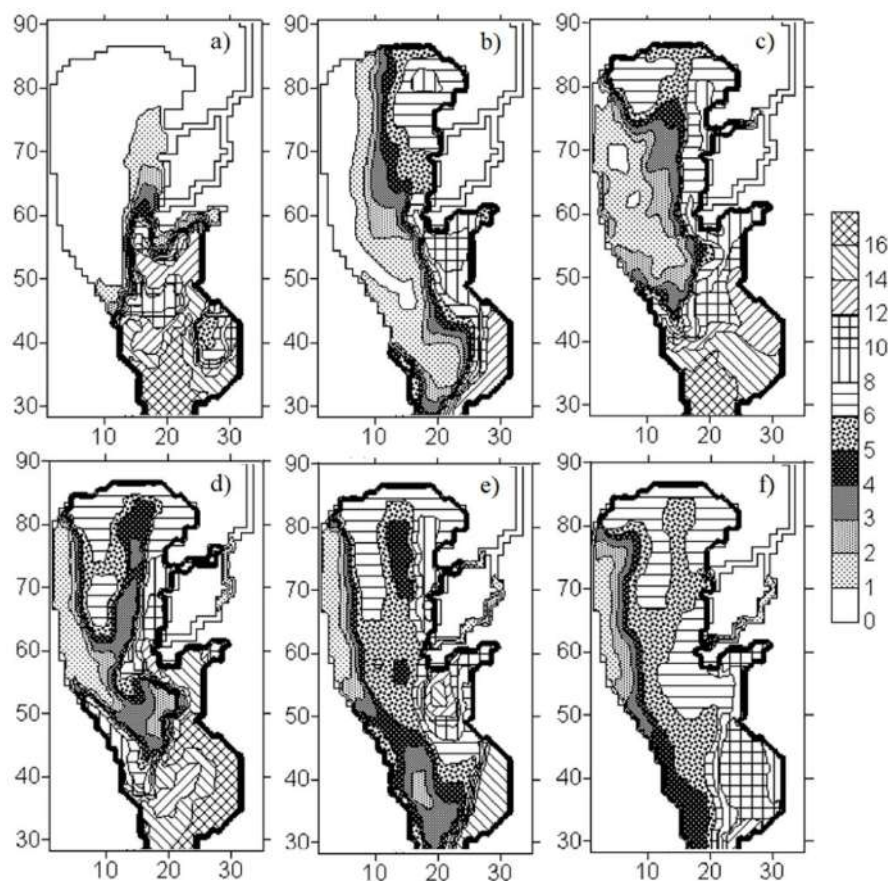


Fig. 9. Variability of water salinity (ppt) spatial distribution obtained from the model for March 2007 at the Dniester River average daily discharge of 50 m³/sec: a) 20th day, 0:00; b) 21st day, 0:00; c) 22nd day, 0:00; d) 22nd day, 12:00; e) 23rd day, 0:00; f) 23rd day, 12:00.

er than the place where the river divides into two estuarine arms) even with flow rate going below 100 m³/sec, as evidenced by the scheme of estuarine water distribution in the Dniester River mouth area described in the paper.

The case described in the article could be used by experts as an example when identifying effective hydro-engineering measures to prevent transformed sea water penetration in river mouth by the building of a second estuarine canal (arm).

Bibliography

1. Актуальные проблемы лиманов северо-западного Причерноморья: монография / Одесский государственный экологический университет; под ред. Ю. С. Тучковенко, Е. Д. Гонченко. Одесса: ТЕС. 2012. 224 с. URL: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/654>
2. Белов В.В., Гриб О.М., Килимник О.М. Сучасний гідроекологічний стан гирлово-плавневої системи річки Дністер та перспективи його поліпшення. Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія. 2010. Т. 18. С. 180-186.
3. Вишневський В.І., Куций А.В. Багаторічні зміни водного режиму річок України. Київ: Наукова Думка, 2022. 252 с.
4. Гидрология дельты Дуная: монография / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: ГЕОС, 2004. 448 с.
5. Гидрологическое обоснование экологических попусков воды для обеспечения функционирования Днестровских плавней: Отчет о научно-исследовательской работе / Одесский гидрометеорологический институт. Одесса, 1988. 177 с.
6. Гребінь В.В., Мудра К.В. Вплив кліматичних змін на гідрологічний режим річок басейну Дністра (ретроспективний аналіз попередніх досліджень). Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2016. 3 (42). С. 34-41.
7. Гребінь В.В., Мудра К.В. Використання регіональної моделі клімату (РЕМО) для оцінювання тенденцій колювання стоку води в басейні Дністра. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія. 2018. 1 (70). С.22-28. URL: <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2018.70.4>
8. Кулібабін О. Г., Осадчий В. С. Концепція подальшого розвитку зрошення на Одещині: монографія / Одеська Державна Академія Будівництва та Архітектури. Одеса, 2022. 348 с.

9. Лиманно-устьевые комплексы Причерноморья. Географические основы хозяйственного освоения: монография / Под ред. Г.И. Швобса. Л.: Наука. 1988. 303 с.
10. Лобода Н. С., Козлов М. О. Оцінка водних ресурсів річок України за середніми статистичними моделями траєкторій змін клімату RCP4.5 та RCP8.5 у період 2021-2050 роки. Український гідрометеорологічний журнал. 2020. (25). С. 93-104. URL: <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>
11. Правила експлуатації водосховищ Дністровського каскаду ГЕС і ГАЕС при НІПР 77.10 буферного водосховища 772-39- Т48 / Укргідропроєкт. Харків. 2017. 105 с. URL: https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2018-11/732-39-%D0%A248_ua%20%281%29.pdf
12. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV: Черное море. Выпуск 1: Гидрометеорологические условия: монография / Под ред. А.И. Симонова, Э.Н. Альтмана. С.-П.: Гидрометеоиздат. 1991. 429 с.
13. Хільчевський В.К., Осадчий В.І., Курило С.М. Регіональна гідрохімія України: підручник. Київ: ВПЦ «Київський університет». 2019. 343 с.
14. Хмара Т.В., Тучковенко Ю.С., Слечук К.А. Проникновение соленых морских вод в приустьевые области рек Днепр и Южный Буг. Лимани північно-західного Причорномор'я: актуальні гідроекологічні проблеми та шляхи їх вирішення: матеріали всеукр. науково-практ. конф., 12-14 вересня. Одеса: ОДЕКУ, 2012. С. 134-137. URL: <https://docplayer.net/83168351-Limani-pivnichno-zahidnogo-prichornomor-ya-aktualni-gidroekologichni-problemi-ta-shlyahi-yih-virishennya-veresnya-2012-r-ukrayina-m.html>
15. Chen, W.; Mao, C.; He, L., and Jiang, M. Sea-level rise impacts the saline water intrusion and stratification of the Yangtze Estuary. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research, Special Issue*. 2020. 95. P. 1395-1400. URL: <https://doi.org/10.2112/SI95-269.1>
16. Cotta, A. J. B., & de Jesus, H. C. Impactos, extensão e proposta de mitigação da intrusão salina no Rio São Mateus. *Pesquisas Em Geociências*. 2021. 48(4). e107238. URL: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.107238>
17. Eslami, S., Hoekstra, P., Kernkamp, H. W. J., Nguyen Trung, N., Do Duc, D., Nguyen Nghia, H., Tran Quang, T., van Dam, A., Darby, S. E., Parsons, D. R., Vasilopoulos, G., Braat, L., and van der Vegt, M. Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: results of field observations and integrated coastal-inland modelling, *Earth Surf. Dynam.* 2021. 9. P. 953–976. URL: <https://doi.org/10.5194/esurf-9-953-2021>.
18. Hess K.W. MECCA Programs Documentation: Technical Report / NOAA. NESDIS 46. Washington, D.C. 1989.
19. Hess K.W. Mecca2 Program Documentation. NOAA Technical Report NOS CS 5. Silver Spring, MD.2000
20. Ivanov V. A., Tuchkovenko Yu. S. Applied Mathematical Water-Quality Modeling of Shelf Marine Ecosystems. Sevastopol. Marine Hydrophysical Institute. 2008. 295 p. URL: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/1658/>.
21. Jie Yang, Wei Zhang Storm-induced saltwater intrusion responds divergently to sea level rise in a complicated estuary. *Environ. Res. Lett.* 2023. 19 (1). 014011 URL: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0e32>
22. Kolb P., Zorndt A., Burchard H., Gräwe U., Kösters F. Modelling the impact of anthropogenic measures on saltwater intrusion in the Weser estuary, *Ocean Sci.* 2022. 18. P. 1725–1739. URL: <https://doi.org/10.5194/os-18-1725-2022>
23. Lončar, G., Kravica, N., Gotovac, H., Oskoruš, D., Kulić, T. Numerical analysis of dam action preventing saltwater intrusion along the Neretva riverbed. *Hrvatske Vode*. 2020. 28(112). P. 113-124.
24. Munk, W.H., & Anderson, E.R. Notes on the theory of the thermocline. *Journal of Marine Research*. 1948. 7(3). P. 276–295.
25. Nesterov, A.A. and Maderich, V.S. Modeling of Hydrodynamics and Transport Processes in the Dnieper-Bug Estuary. *Physical Oceanography*. 2008. 18(6). P. 345–356. URL: <https://doi.org/10.1007/s11110-009-9028-8>
26. Saber Abdelaal, Hocine Oumeraci (2018). Modelling and mitigation of storm-induced saltwater intrusion: Improvement of the resilience of coastal aquifers against marine floods by subsurface drainage. *Environmental Modelling & Software*. 2018. 100. P. 252-277. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.030>
27. Tag P. M., Murray F. W., Koenig L. R. A comparison of several forms of eddy viscosity parametrization in a two-dimensional long-wave propagation. *Journal of Applied Meteorology*. 1979. 18(11). P. 1429–1441. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C1429:ACOSFO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C1429:ACOSFO%3E2.0.CO;2)
28. Tuchkovenko Yu. S., Tuchkovenko O. A., Khokhlov V. N. Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019. (5). P. 37-46.
29. Tuchkovenko Y., Khokhlov V. & Loboda N. Assessment of Climate Change Impact on Parameters of Freshwater Balance in Lagoons of North-Western Black Sea Coast. *International Research-to-Practice Conference on 'Climate Services: Science and Education': Conference Proceedings*, 22-24 September, Odesa, Ukraine. 2021. P. 136-137.
30. Wei He, Jian Zhang, Xiaodong Yu, Sheng Chen, Jian Luo. Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: A case study of Nandu River Estuary, China. *Water Resources Research*. 2018. 54(12). P. 9919-9934 URL: <https://doi.org/10.1029/2018WR023285>
31. Wei He, Hongxing Zhou, Jian Zhang, Hui Xu, Chunsheng Liu. Combined effects of runoff increase and sea level rise on the water exchange and saltwater intrusion for an estuary bay in non-flood season. *Hydrological Processes*. 2022. 36 (12). e14727. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.14727>

32. Yang, F.; Xu, Y.; Zhang, W.; Zou, H.; Yang, J.; Liang, J.; Ji, X. Assessing the Influence of Typhoon on Salt Intrusion in the Modaomen Estuary within the Pearl River Delta, China. *Journal Marine Science Engineering*. 2024. 12. 22. URL: <https://doi.org/10.3390/jmse12010022>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Tuchkovenko Y.S. and Gopchenko E.D. (eds), (2012). *Actual Problems of Lagoons of the North-Western Black Sea Region*. Odesa State Environmental University, Odesa: TES publ. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/654>
2. Belov, V.V., Grib, O.M., Kilimnik, O.M. (2010). Current Hydro-Environmental State of the Dniester River Estuarine Reed-Bed System and Prospects of Its Improvement. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 18, 180-186. [in Ukrainian]
3. Vyshnevskiy, V.I. and Kutsyi, A.V., (2022). *Long-Term Dynamics of Ukrainian River's Water Regime Changes*. Kyiv: Naukova Dumka publ. [in Ukrainian]
4. Mikhailov, V.N. (ed), (2004). *Hydrology of the Danube Delta*. M.: GEOS.
5. Report on Research Activity (1988). *Hydrological Rationale of Ecological Water Releases to Provide for the Dniester Reed-Beds Functioning*. Odesa: Odesa Hydrometeorological Institute.
6. Grebin V.V., Mudra, K.V. (2016). The Impact of Climatic Changes on the Hydrological Regime of the Rivers in the Dniester Basin (Retrospective Analysis of the Previous Researches). *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 3 (42), 34-41. [in Ukrainian]
7. Grebin V.V. and Mudra K.V. (2018). Use of the Regional Climate Model (REMO) for Water Flow Trends Evaluation in the Dniester River Basin. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, 1 (70), 22-28. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2018.70.4>
8. Kulibabin, O.G. and Osadchyi, V.S. (2022). Concept of Odesa Region Irrigation Further Development. Odesa: Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. [in Ukrainian]
9. Shvebs, G.I. (ed), (1988). *Estuarine and Mouth Complexes in the North-Western Black Sea. Geographical Base of Economic Development*. L.: Nauka publ.
10. Loboda, N.S., & Kozlov, M.O. (2020). Assessment of water resources of the Ukrainian rivers according to the average statistical models of climate change trajectories RCP4.5 and RCP8.5 over the period of 2021 to 2050. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, (25), 93-104. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25.2020.09>
11. Rules of Operation of the Reservoirs of the Dniester Cascade of Hydroelectric Power Stations and Pumped-Storage Electric Power Plants at the Full Reservoir Level 77.10 of the Buffer Reservoir 772-39-T48, 2017. *Ukrhidroproekt*, Kharkiv. Available at: https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2018-11/732-39-%D0%A248_ua%20%281%29.pdf [in Ukrainian].
12. Simonov, A.I. and Altman, E.N. (eds) (1991). *Project «Seas of the USSR». Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. Volume IV: The Black Sea. Issue 1: Hydrometeorological conditions*. St.-Pt: Gidrometeoizdat publ.
13. Khilchevskiy, V.K., Osadchyi, V.I., Kurylo, S.M., (2019). *Regional Hydrochemistry of Ukraine*. Kyiv, Kyiv University. [in Ukrainian]
14. Khmara, T.V., Tuchkovenko, Yu.S. and Slepchuk K.A. (2012). Penetration of Saline Sea Waters into the Dnipro and Pivdennyi Bug Rivers' Estuarine Areas. *Estuaries of the North-Western Black Sea: Urgent Hydro-Environmental Issues and the Ways to Solve them: Materials of All-Ukrainian Sc. and Pract. Conf.*, 12-14 Sept. Odesa: OSENU, 134-137. Available at: <https://docplayer.net/83168351-Limani-pivnichno-zahidnogo-prichornomor-ya-aktualni-gidroeologichni-problemi-ta-shlyahi-yih-virishennya-veresnya-2012-r-ukrayina-m.html>
15. Chen, W.; Mao, C.; He, L., and Jiang, M. (2020). Sea-level rise impacts the saline water intrusion and stratification of the Yangtze Estuary. In: Malvarez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research*, Special Issue, 95, 1395-1400. DOI: <https://doi.org/10.2112/SI95-269.1>
16. Cotta, A. J. B., & Jesus, H. C. de. (2021). Impactos, extensão e proposta de mitigação da intrusão salina no Rio São Mateus. *Pesquisas Em Geociências*, 48(4), e107238. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.107238>
17. Eslami, S., Hoekstra, P., Kernkamp, H. W. J., Nguyen Trung, N., Do Duc, D., Nguyen Nghia, H., Tran Quang, T., van Dam, A., Darby, S. E., Parsons, D. R., Vasilopoulos, G., Braat, L., and van der Vegt, M. (2021). Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: results of field observations and integrated coastal-inland modelling, *Earth Surf. Dynam.*, 9, 953–976. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-953-2021>.
18. Hess K.W. (1989). *MECCA Programs Documentation: Technical Report*. NOAA. NESDIS 46. Washington, D.C.
19. Hess, K.W. (2000). *Mecca2 Program Documentation*. NOAA Technical Report NOS CS 5, Silver Spring, MD.

20. Ivanov V.A. and Tuchkovenko Yu.S. (2008). Applied Mathematical Water-Quality Modeling of Shelf Marine Ecosystems. Sevastopol, Marine Hydrophysical Institute. Available at: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/1658/>.
21. Jie Yang, Wei Zhang (2023). Storm-induced saltwater intrusion responds divergently to sea level rise in a complicated estuary. *Environ. Res. Lett.*, 19 (1), 014011 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0e32>
22. Kolb, P., Zorndt, A., Burchard, H., Gräwe, U., and Kösters, F. (2022). Modelling the impact of anthropogenic measures on saltwater intrusion in the Weser estuary, *Ocean Sci.*, 18, 1725–1739. <https://doi.org/10.5194/os-18-1725-2022>
23. Lončar, G., Krvavica, N., Gotovac, H., Oskoruš, D., Kulić, T. (2020). Numerical analysis of dam action preventing saltwater intrusion along the Neretva riverbed. *Hrvatske Vode*, 28(112), 113-124.
24. Munk, W.H., & Anderson, E.R. (1948). Notes on the theory of the thermocline. *Journal of Marine Research*, 7(3), 276–295.
25. Nesterov, A.A. and Maderich, V.S., (2008). Modeling of Hydrodynamics and Transport Processes in the Dnieper-Bug Estuary. *Physical Oceanography*, 18(6), 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11110-009-9028-8>
26. Saber Abdelaal, Hocine Oumeraci (2018). Modelling and mitigation of storm-induced saltwater intrusion: Improvement of the resilience of coastal aquifers against marine floods by subsurface drainage. *Environmental Modelling & Software*. 100, 252-277. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.030>
27. Tag P. M., Murray, F. W., & Koenig, L. R. (1979). A comparison of several forms of eddy viscosity parametrization in a two-dimensional long-wave propagation. *Journal of Applied Meteorology*, 18(11), 1429–1441. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C1429:ACOSFO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C1429:ACOSFO%3E2.0.CO;2)
28. Tuchkovenko Yu. S., Tuchkovenko O. A., Khokhlov V. N. (2019). Modelling water exchange between coastal elongated lagoon and sea: influence of the morphometric characteristics of connecting channel on water renewal in lagoon. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 37-46.
29. Tuchkovenko Y., Khokhlov V. & Loboda N., (2021). Assessment of Climate Change Impact on Parameters of Freshwater Balance in Lagoons of North-Western Black Sea Coast. *International Research-to-Practice Conference on 'Climate Services: Science and Education': Conference Proceedings*, 22-24 September, Odesa, Ukraine, 136-137.
30. Wei He, Jian Zhang, Xiaodong Yu, Sheng Chen, Jian Luo (2018). Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: A case study of Nandu River Estuary, China. *Water Resources Research*, 54(12). <https://doi.org/10.1029/2018WR023285>
31. Wei He, Hongxing Zhou, Jian Zhang, Hui Xu, Chunsheng Liu (2022). Combined effects of runoff increase and sea level rise on the water exchange and saltwater intrusion for an estuary bay in non-flood season, *Hydrological Processes*, 36 (12), e14727. <https://doi.org/10.1002/hyp.14727>
32. Yang, F.; Xu, Y.; Zhang, W.; Zou, H.; Yang, J.; Liang, J.; Ji, X. Assessing the Influence of Typhoon on Salt Intrusion in the Modaomen Estuary within the Pearl River Delta, China. *Journal Marine Science Engineering*. 2024, 12, 22. <https://doi.org/10.3390/jmse12010022>

Ключові аспекти проникнення морської води у річку Дністер під час штормових нагонів

Юрій Тучковенко^{1,2}

д. геогр. н., професор, завідувач кафедри океанології та морського природокористування,

¹ Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, Одеса, Україна;

головний науковий співробітник,

² Інститут біології моря НАН України, Одеса, Україна;

Наталія Лобода¹

д. геогр. н., професор кафедри гідрології суші;

Валерія Овчарук¹

д. геогр. н., професор, завідувач кафедри гідрології суші

В статті обговорюється проблема можливості проникнення солонуватих вод з Дністровського лиману у гирлову частину річки Дністер протяжністю близько 22 км від лиману. Актуальність дослідження полягає в тому, що в цій частині р.Дністер розташована водозабірна станція «Дністер», яка живить питною водою місто Одеса, а також водозабір Нижньо-Дністровської зрошувальної системи. Мета роботи полягала у визначенні шляхом застосування гідродинамічного моделювання таких гідрометеорологічних умов, за яких можливе проникнення трансформованих морських вод з Дністровського лиману в гирлову область річки Дністер. Для вирішення цієї задачі використовувався спрощений варіант (без урахування термічного фактору) чисельної 3-D нестационарної гідродинамічної моделі МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment), доповненої блоком переносу консервативної домішки. В результаті гідродинамічного моделювання встановлено, що для проник-

нення трансформованих морських вод в гирлові рукави р.Дністер необхідне виконання наступних умов: (1) середньодобові витрати р.Дністер повинні зменшитись нижче $100 \text{ м}^3/\text{с}$; (2) домінування нагінних вітрів південного або південно-східного напрямків зі швидкістю більшою 15 м/с протягом декількох діб. За таких умов проникнення трансформованих морських вод з лиману до гирлових рукавів і далі до основного русла р. Дністер відбувається спочатку через правий гирловий рукав – Глибокий Турунчук, а потім, після досягнення місця розділення основного русла р. Дністер на два гирлових рукави, лиманні води залучаються стоковим потоком в русло лівого рукава – Дністер, і повертаються через нього до лиману. Процес проникнення солонуватих лиманних вод до гирлових рукавів Дністер та Глибокий Турунчук відбувається на часовому відрізку тривалістю 12-24 год. Зроблений висновок про те, що через наявність двох гирлових рукавів, якими річка Дністер впадає в Дністровський лиман, з урахуванням місця їх розташування в північно-східній частині лиману та особливостей підвищення рівня води в лимані при нагінних вітрах, проникнення лиманних вод з підвищеною солоністю (до 7 ‰) в основне русло р. Дністер (вище за місце розділення русла на два гирлові рукави) маловірогідно навіть при витратах річки менших за $100 \text{ м}^3/\text{с}$. Описаний в статті випадок може бути використаний фахівцями як приклад при визначенні ефективних гідротехнічних заходів для запобігання проникненню трансформованих морських вод в гирла річок шляхом будівництва другого гирлового каналу (рукава).

Ключові слова: *Дністровський лиман, гирло Дністра, проникнення перетвореної морської води, підйом і спад.*

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Надійшла 15 вересня 2024 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 20 листопада 2024 р.

Current situation of glacier and snow glades in the southern mountain area of Lesser Caucasus province

Jamal Huseynov¹

PhD (Geography),

¹ Azerbaijan Airlines JSC, National Aviation Academy, Baku, Azerbaijan,

e-mail: camal_huseynov_88@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7878-578X>;

Allahverdi Tagiyev²

PhD student, Researcher,

² Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan,

e-mail: allahverdi.taghiyev@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-5526-3631>

ABSTRACT

Problem definition. The rise in air temperature due to the impact of global warming causes the melting of glaciers in mountainous regions and accelerates freshwater scarcity in lowland areas. This process gradually reduces the annual duration of ice and snow cover in the Lesser Caucasus Mountains. The reduction in the area of ice and snowfields, along with the decline in precipitation, leads to an expansion of desertification and deforestation in lowland and foothill regions.

Formulation of the purpose. The research was conducted to determine the current state of perennial snowfields and glacier reserves located on the Karabakh volcanic plateau, Mixtoken, and Saribulag ridges, considered part of the southern mountainous region of the Lesser Caucasus.

Research methods. For this purpose, satellite imagery interpretation was conducted, utilizing the data archives of satellites such as Azersky, Landsat, Sentinel-1, and others. Analyses were carried out on the raster files obtained after decoding the satellite images, employing various measurement and processing methods. The study also addressed the region's physical geographical position and climatic conditions, examining the long-term variations in air temperature and precipitation levels. The analyses were conducted using observational data (air temperature and atmospheric precipitation) covering the years 1961–2023. Mathematical-statistical and cartographic methods were employed in the study. The interpretation of satellite images, their analysis based on various indices, and the mapping of data were carried out using GIS technology.

The main material. In comparison with the period 1981–2010, the average monthly temperature in this part of the Lesser Caucasus region increased by 0.9–1.4°C in January (0.9°C), May (1.4°C), and June (0.9°C) during 2011–2022, while it decreased by 0.5°C in February and 0.7°C in November. Between 2011–2015, the average annual precipitation in the region decreased by 1%, or approximately 7 mm, compared to the overall period. The results indicate that, depending on air temperature, the extent of snowfields in this region does not exceed 6.0 km². Firn ice in the region is distributed at elevations of approximately 3100–3300 meters. These glaciers are located on the eastern slope of the Gizilbogaz Heights, accumulating on rocky surfaces exposed on sloping terrain. The total area of firn ice, which is situated in small clusters, is 0.148 km², comprising five glacier clusters of varying sizes. Two of these are large, covering an area of 0.14 km², while the remaining three smaller glaciers have a combined area of approximately 0.005 km² (8.67 hectares).

Conclusions. The area of snowfields decreases during warm years as air temperature rises. In this mountainous region, the long-term average increase in air temperature has been 0.2°C. In other months, temperature fluctuations remained within climatic norms. The reduction in the period during which precipitation falls in solid form due to the effects of climate change prevents the formation of new glaciers and snowfields. In periods with higher average annual temperature, the process of glacier melting accelerates.

Keywords: Mikhtokan Mountain range, climate change, climate norm, glacier, firn, snow glades, GIS technology, amount of precipitation, temperature anomaly, tendency.

In cites: Huseynov Jamal, Tagiyev Allahverdi. (2024). Current situation of glacier and snow glades in the southern mountain area of Lesser Caucasus province. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 288–302. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-23>

Problem definition. The ice masses in the world's most remote and harsh regions are formed not only by the remains of ancient ice ages but also by ongoing active processes in nature [1, 2, 18]. As the glaciers expand, they begin to slide with increasing mass, slowly moving down valleys and into plains, as a result, the rocks are subjected to exaration processes, forming a cirque and glaciated valley. That is, after the ice mass reaches a critical thickness, it begins to move under the influence of gravity. As glaciers move, they erode the underlying rocks, transporting them over long distances and ac-

cumulating them [15, 18].

The initial stage of glacier formation begins with the accumulation of snow. This process occurs when annual snow exceeds seasonal ablation (melting and sublimation). Glaciation is usually concentrated in accumulation zones, areas of glaciers where snowfall exceeds melting losses [1, 22]. As snow accumulates, the pressure of the load from successive layers of snow causes compaction. This process reduces the porosity inside the snow [20, 23]. Compaction causes the air trapped inside the snow to be expelled. Compacting snow becomes a

granular and more densely packed “firn”, representing an intermediate stage between snow and ice. Firn usually has a density varying between 400-830 kg/m³, depending on the period of formation and local conditions. Accumulation of snow, melt, avalanche and other materials on the firn results in its continuous burial and strong compaction [15, 21]. When the density exceeds about 830 kg/m³, the firn becomes glacial ice. At this stage, recrystallisation processes dominate, and small ice crystals grow at the expense of smaller crystals. The transition from firn to ice is also accelerated by the melting and refreezing of ice in the pore spaces. Thus, the melting of ice reduces the volume of air spaces and increases its density. As a result of this, the emerging glacier is characterized by an ice crystal structure. Glacier refers to the annual layers formed by the accumulation of layers of snow over time, the firn stage and the dense ice sheets formed at the end. These layers can be identified by changes in crystal size, impurity (dust, debris, etc.) content and isotopic composition. The stratigraphy of a glacier provides valuable information about past climatic conditions and the dynamics of the glacier over time [15, 19].

Analysis of recent research. About 69 % of the world’s freshwater is frozen in glaciers. In many regions, glaciers provide a steady supply of meltwater to both human communities and the rivers and lakes that feed the settlements. However, glaciers are also sensitive indicators of climate change. As global temperatures rise, many glaciers around the world are retreating at an alarming rate, leading to concerns about rising sea levels and loss of freshwater supplies [6, 13, 20].

By studying the glaciers that existed in the Greater Caucasus mountains in different periods, researchers such as G.V. Abikh, K.I. Bogdanovich, P.J. Bolarovich, A.V. Pastukhov, L.N. Leontyev, B.A. Budagov, R.A. Ismayilov, V.F. Yahyayev and others made various calculations [1].

Highlighting previously unsolved parts. However, the global warming observed in recent times is expanding its influence, causing rapid melting of glaciers and shrinking of water resources. Therefore, the discovery of the current state of glaciers and snowdrifts in other regions of the country is considered one of the most urgent issues for the scientific community today.

Formulation of the purpose. Studying the current state of the ice and snow glades located in the southern mountainous part of the Lesser Caucasus province is the primary goal of the research. Based on observational data from 1961-2022, against the background of changes in air temperature and atmospheric precipitation, it has been tried to determine the modern condition and distribution charac-

teristics of perennial ice and snow glade in the area where the Karabakh volcanic plateau, Saribulagh and Mikhtokan ridges meet and where the highest peaks of the region are located.

Research methods. The research is based on the observation of air temperature and atmospheric precipitation in the Istisu, Shusha, Lachin, Khankendi, Asgaran and Aghdara hydrometeorological stations of the National Hydrometeorological Service located in the southern part of the Lesser Caucasus province from 1961-1990, and expanded data with statistical methods from 1991-2015. The annual time series could only be extended by AI until 2022. The analysis of glaciers is based on expedition data, interpretation of satellite images and application of GIS technology to them.

Primary data were collected from the National Hydrometeorological Service, State Statistics Committee, satellite-reanalysis resources, and periodical scientific and statistical publications [25, 26, 27]. To determine the effects of climate change on the temperature and precipitation of this region in recent years, a comparative analysis of the relevant indicators of the years 1981-2010 and the relevant indicators of the years 2011-2015 recommended by the World Meteorological Organization (WMO) as the latest climate norm was conducted [24].

In hydrometeorology, the evaluation of the dynamics of time series in the long term was performed by various methods. The multi-year trend of annual precipitation and the graphical representation of the trend curve attached to it make it difficult to determine the multi-year tendency of this random quantity due to the high coefficient of variation in individual years.

For a more reliable determination of the multi-year trend of air temperature and atmospheric precipitation, the concept of moving average quantity is applied. Sharp deviations of random quantities consisting of long series in a small time phase (individual years) distort the trend plotted for the overall series and the accuracy becomes lower. A moving average quantity is used to smooth out those deviations and determine the tendency of the series in small time phases (3, 5, 10 years, etc.). This permits to determine the dynamics of the considered random quantity (precipitation amount) in any period with data [9]. In this study, the average moving quantity is calculated by the following formula (1) for ten years:

$$X_{1i} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{10}}{10}, X_{2i} = \frac{X_2 + X_3 + X_4 + \dots + X_{11}}{10}, \dots \quad (1)$$

there, X_{1i} , X_{2i} ... etc., is the decadal moving average of the time series. X_1 , X_2 , etc. and the annual precipitation series is the considered year and the series limits of the next 9 years (10 years in total) including that year. In other words, the further limit

of the moving quantity consists of the amount of precipitation in that year and the mathematical average of the next 9 years. Thus, the rows are completed with this rule until the end. The last limit of the series is equal to the amount of precipitation for that year only. Calculating decadal average indicators for each year avoids sharp deviations on the graph and expresses the tendency of the general dynamics.

The main material. The southern mountainous part of the Lesser Caucasus province consists of the Karabakh volcanic plateau, Mikhtokan and Saribulagh ridges. In the central part of the mountainous region of Kalbajar-Lachin, Saribulaghdagh (3005 m, Saribulaghdagh), Chil-Gaya extends in the meridian direction, and Mikhtokan range (3616 m, Dalidagh) continues from west to east [11, 16]. Volcanic cones such as Boyuk Ishigli, Dalidagh, Alagollar, Garadagh, Gorus volcanic plateau and intrusive massifs, which are considered the highest relief forms of the volcanic plateau with an absolute height of 2500-3500 m, occupy a large area [11, 21]. Exaration, accumulative relief forms, cirque, trog valley, moraine ridge and closed depressions are widely developed in the highlands and plateau area. Here, the accumulative relief forms have decreased up to 2600 metres [1, 22]. This mountainous region is located in seismic dislocation, landslide, flood, avalanche, surface and erosion zones.

With the increase in altitude in the mountainous part of the area, atmospheric pressure decreases, solar radiation and effective radiation increase, and air temperature and its daily amplitude become usually small [7, 10]. In this area, the share of water vapour decreases, and the strength and direction of the wind undergoes a complex change. In the mountains, the amount of cloudiness and precipitation also changes with height. Precipitation in this area increases up to a certain height and then commences to decrease. The change of meteorological elements in the mountainous area causes the overall change of climatic conditions depending on the altitude. Therefore, from the plain areas towards the highest areas, mountain steppes are replaced by mountain forests. Summer pastures alternate with alpine and subalpine meadows in the cold climate with dry winters in most of the territory of Kalbajar and Lachin districts. In the higher parts, nival and subnival landscapes are common in the mountain-tundra climate with frosty winter and cold summer [10, 16].

The annual amount of sunshine hours is 2000-2200 hours in the parts above 3000 m with the increase in altitude. A decrease in cloudiness in high mountain areas leads to an increase in sunny hours. Sunless days decrease to a minimum in the Mikhtokan range, especially around the peak of Dalidagh, and due to the reduction of cloudiness, there is always sunshine. The total solar radiation reaches

150-152 kcal/cm² in the area of the volcanic plateau and the Mikhtokan ridge. The largest amounts of albedo fluctuate between 40-60% in the highlands. In the winter season, the formation of snow cover in medium and high mountain areas allows the indicators of reflected radiation to be close to 50-70%. In the summer months, albedo is characterized by low values (18-22%). On the volcanic plateau and in the territory of the Mikhtokan range, the effective radiation on the peak of Dalidagh is characterized by indicators of 46-48 kcal and less. In the annual course of the effective radiation of the surface cover in the study area, maximum amounts are recorded in summer, and minimum amounts are recorded in winter months. The annual amount of the radiation balance of the area is 22-30 kcal and lower in the parts of the volcanic plateau above 3000 m. The radiation balance is always positive in the warm season and negative in the cold season [11, 16].

The large rivers of the region, Tartar (200 km), Khachin (119 km), Hakari (113 km), etc., flow from this mountainous terrain. and their length is higher than 100 km. Among these rivers, Tartar (2650 km²) and Hakari (2570 km²) have the largest catchment area. The density of the river network in the Tartar River basin is 0.82 km/km², and 0.80 km/km² in Khachin. Almost all of the rivers starting from this zone belong to the group of spring-summer torrential rivers formed by melting snow. In the area of 1500-2000 m, which is considered the zone where the stream originates, the first snow falls in October-November. The maximum level of spring-summer luxuriance lasts from the end of May to the middle of June. During this period, the occurrence of snow melt, underground water and frequent incessant precipitations create the conditions to reach the maximum level of drought in the mountainous region. The mountainous terrain, high watershed ridges, high water level and high volume of flow affect it [11, 14].

Analyses indicate that January is the coldest month with an average temperature of 0.4°C in the central part of the Lesser Caucasus Mountains, where Kalbajar and Lachin districts are located. In this month, the average monthly air temperature decreases from +3°C to -5°C from the plains (≈300-400 m) to the upper parts of the middle highlands (≈2300 m). This indicator was around 1.3°C (+4 – (-4°C)) in February and 5°C (+9 – (-1°C)) in March [8]. In the central mountainous region of the southern part of the Lesser Caucasus province, the average monthly temperature indicators commence to increase from April (9.8°C), and rise to 14.5°C in May and 19.2°C in June. July and August are the hottest months in these regions of the province and the average monthly temperature for both months is around 22°C across the province. In July and Au-

gust, this indicator varies in the range of 14-27°C, depending on the stations. The average monthly temperature decreases in September and October and is close to 6°C in the region in November. Although the average monthly temperature in December is around 2°C, this indicator drops to -3°C in the upper parts of the middle highlands. The multiannual average temperature varies from 5.0 to 14.6°C, depending on the stations, from the plains to 2300 m of the mid-mountain range, and is 11.1°C for the region. In this area, the snow line passes through approximately 2900-3100 m. In January, February, March, April, May, October, November and December, the average monthly air temperature in the highlands is below 0°C.

A trend graph of the average annual temperature in the mountainous region of Kalbajar and Lachin from 1961-2022 was developed (Figure 1).

As can be seen from the graph, although the temperature indicators in the multi-year period have different fluctuations in individual years, an increase in air temperature can be seen in all stations in the general multi-year period.

There is an increase in the trend curve on the graph. In the 62-year time period of average annual total temperature indicators for these parts of the province, 1966, 1995, 1998, 1999, 2001, 2004, 2010, 2018, 2019 and 2021 are the warmest years of the series, 1964, 1967, 1969, 1972, 1973, 1974, 1976, 1982, 1984, and 2011 are 10 relatively cold years. The analysis indicates that 90% of the coldest years in the region occurred before 1984, and 90% of the warmest years occurred after 1995. This ratifies that the warming in this region has intensified since 1995.

Determining the effects of climate change,

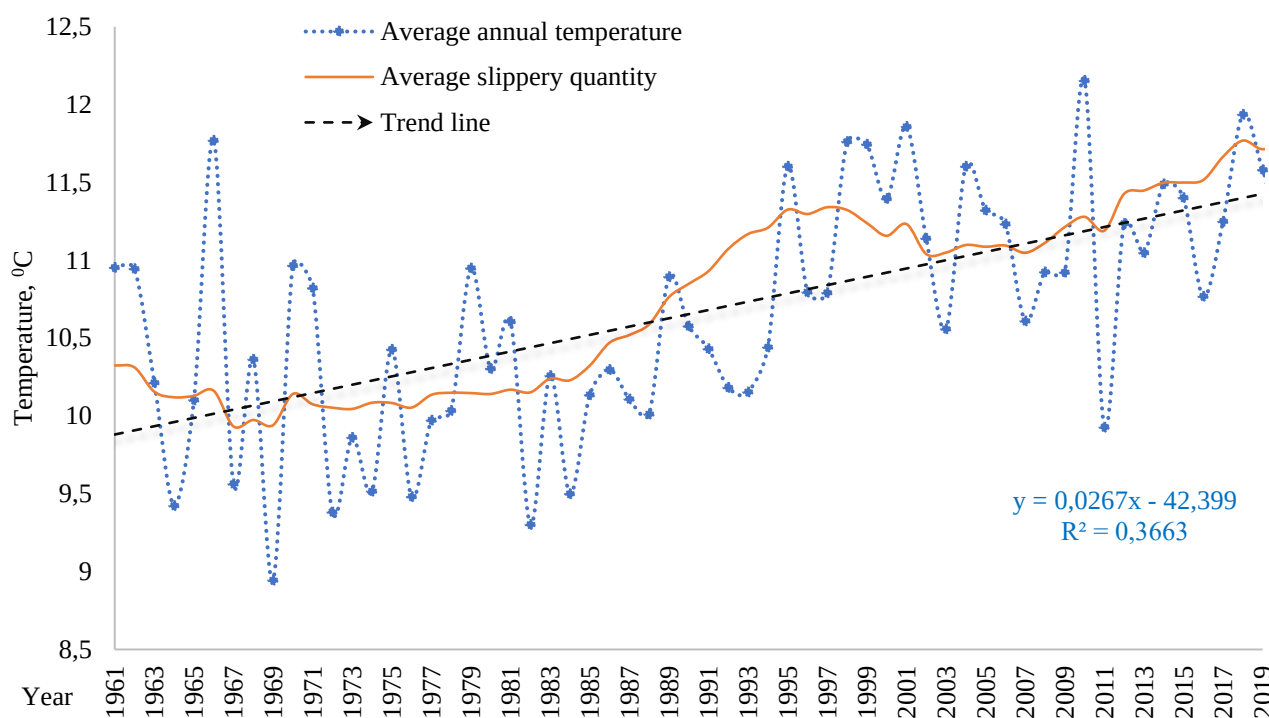


Fig. 1. Dynamics of average annual air temperature at hydrometeorological stations

which are currently showing their effects in all regions [6], on the air temperature regime in the southern mountainous part of the Lesser Caucasus province is one of the most important issues today. Analysis of statistical data unveils that from 2011-2022, the average monthly temperature indicators in these parts of the Lesser Caucasus province were 0.9-1.4°C in January (0.9°C), May (1.4°C), June (0.9°C), April (0.5°C) and it increased by 0.5°C in September (0.5°C), decreased in February (0.5°C) and November (0.7°C), and fluctuated within the climatic norm in other months. The multi-year average increase in air temperature in this mountainous region was 0.2°C. The increase in air temperature is

at its highest in January, May and June. In February and November, compared to the norm, lower fluctuations were recorded (Figure 2). At the stations in the region, a higher increase in monthly average temperatures was recorded in Aghdara (1.9°C, May), and a greater decrease was recorded in Lachin (-1.2°C, November).

The analysis indicates that the reliability of the extended statistical series data for this region is somewhat low. For this reason, the satellite data of the air temperature of the region was consulted. Satellite data was based on the air temperature data (T2M) covering the years from 1981-2021 recorded by the Merra-2 satellite at a height of 2 m above the

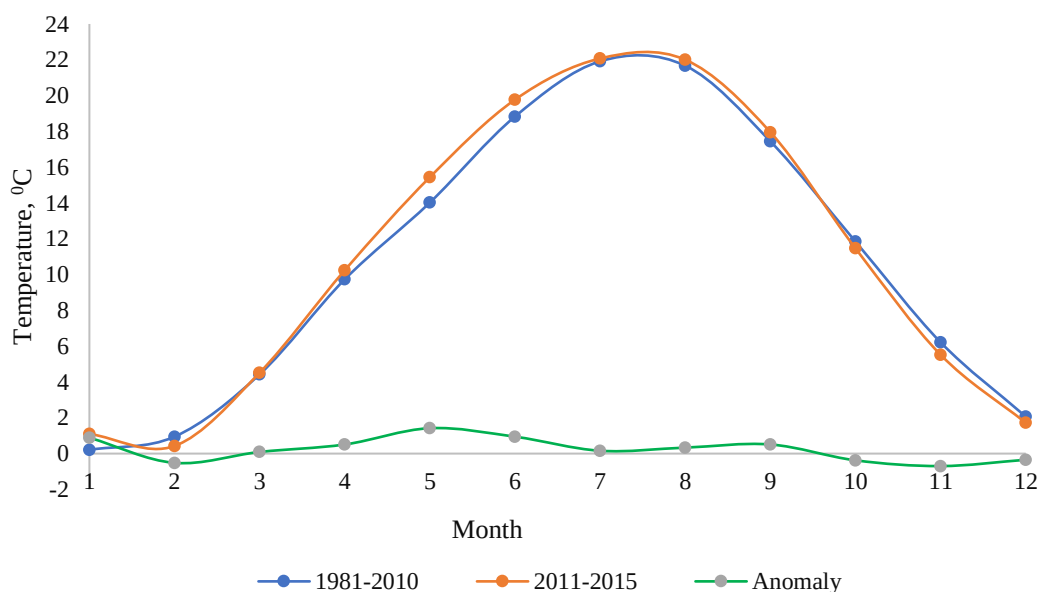


Fig. 2. Fluctuations of air temperature from 2011-2015 compared to 1981-2010 according to ground observation data

earth's surface [25, 26, 27]. According to the analysis of satellite data, compared to 1981-2010, from 2011-2022, an increase in air temperature was observed in the region in all months except October (-0.2°C) and November (-0.4°C). Temperature increase was higher in May (1.6°C) and June (1.2°C). In other months, this indicator is around 0.2 - 0.9°C . The average perennial temperature increase in the region is 0.5°C . Analysis of observation and satellite data reveals that the air temperature in this region increased in May and June, and decreased in November.

The average annual rainfall for the region is around 520 mm (403-608 mm). Although the amount of annual precipitation in the region increases from the plains to the 1000-1500 m area of the middle highlands (Shusha, 608 mm), it slightly decreases in the upper parts of the middle highlands (Istisu, 508 mm). It increases again in the lower parts of the highlands and starts to decrease above 3000 m. In this area, 66% of the annual precipitation falls in the hot season and 34 % in the cold season. The highest precipitation falling in the south-central mountainous part of the Lesser Caucasus province is observed in spring (205 mm). Summer (139 mm) has more precipitation than autumn (110 mm).

In the low mountains and plains, the amount of precipitation is greater in summer (80-140 mm) than in autumn (100-110 mm). Less precipitation falls here in winter and is 65 mm (51-73 mm). Stations located in the middle highlands, such as Shusha and Lachin, have higher annual precipitation than other stations. Less precipitation is recorded in the east in the Karabakh plain (Aghdara) (403 mm). In the 2200-2400 m area of the middle highlands (Istisu) the precipitation with 11-20 mm (17 %), 21-30 mm

(16 %), 31-40 mm (17 %) and 41-50 mm (17 %) amount is more widespread.

A multi-year analysis of precipitation in the region by month shows that less precipitation is recorded in January and December (18 mm) in winter. May (96 mm) is the month with the maximum rainfall in the region. Starting in June, the increase in air temperature reduces the temperature contrast between altitudes and increases evaporation. In this month, until the end of July, strong convective processes take place and quite rainy weather conditions are observed. Although the amount of precipitation is 73 mm in June, it is reduced by half in July (38 mm). Such precipitation decrease continues in August (28 mm). A slight decrease in air temperature from September (38 mm) leads to an increase in temperature differences associated with orography, resulting in a gradual acceleration of the cloud formation process. In October, the amount of precipitation increases to 40 mm, and the autumn maximum of precipitation is observed. Starting from November (32 mm), precipitation decreases again and reaches 18 mm in December.

Compared to the climate norm, from 2011-2015, the average perennial precipitation in the southern mountainous part of the Lesser Caucasus province was observed to be low at Asgaran (1%) and Aghdara (1%) stations, and decreased by 1-5% at other stations of the region. Provided paying attention to the graph showing the fluctuations compared to the climate norm with average indicators, compared to the years 1981-2010, the average annual precipitation in the region from 2011-2015 decreased by 1% or 7 mm for the entire period (Figure 3). The amount of atmospheric precipitation in the

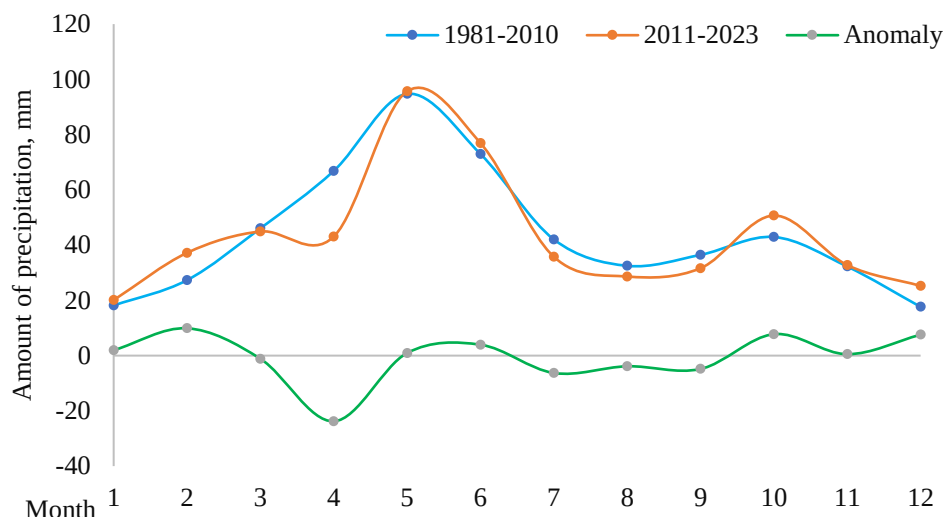


Fig. 3. Fluctuations of average monthly precipitation of ground stations in the southern mountainous part of the Lesser Caucasus province

region increased by no more than 10 mm in January, February, July, October and December.

This indicator remained stable in March, June and November, decreased 24 mm in April, 6 mm in July, 4 mm in August and 5 mm in September compared to the climatic norm. The total precipitation of the region remained almost unchanged in March, May and November. Small indicators of precipitation fluctuations in the whole region are related to the increase of its amount in some stations and decrease in some stations. A greater decrease in the amount of precipitation in the region occurred in April.

The analysis unveils that in the southern mountainous part of the Lesser Caucasus province, although precipitation has increased slightly from mid-autumn to mid-winter in recent times, there is a chaotic decrease in early spring and mid-summer to early autumn. Such fluctuations in precipitation indicate an increase in drought in spring and summer in the plains relief of the middle highlands and a decrease in the volume of water in permanent streams. Shrinking of forests in the region, the evolution of green landscape types towards bush and dry-desert types is inevitable. Additionally, the decrease in precipitation during the vegetation period has a negative effect on their development and damages the productivity of the rural economy [6, 7]. The reduction in rainfall in the late spring and summer months leads to the evolution of plant varieties. That is, fluctuations in temperature and precipitation in the same landscape zone lead to a better spread of other plant varieties [3, 12]. Figure 4 indicates a clear example of how dry massifs will be replaced by thickets over time.

A graph depicting the long-term dynamics of the annual amount of atmospheric precipitation in the Kalbajar and Lachin districts has been drawn up. As can be seen here, the multi-year indicator of the

annual precipitation has varied in the range of approximately 350-850 mm. The trend of precipitation in the general period tends to decrease. If we pay attention to the dynamics of the average moving amount over the entire period, the precipitation in the region compared to the climate norm (1981-2010) showed small fluctuations from 1961-1970, higher from 1971-1982, 2002, 2009 and 2015-2022, 1983 - had lower indicators in 2001, from 2003-2008. Compared to the climate norm, 52% of the annual rainfall totals in the long term for the entire region are lower than the climate norm, and 48% are higher (Figure 5). The multi-year precipitation trend indicates that 1961, 1970, 1971, 1989, 1995, 1996, 1999, 2000, 2005 and 2006 are the least, 1963, 1972, 1974, 1981, 1982, 1988, 1994, 2006 2, 2003 and 2018 is 10 consecutive years with the most precipitation. Analysis of multi-year rainfall in this region exhibits that 70% of the 10 years with the lowest rainfall occurred after 1989. During this period, 70% of the 10 years with the highest precipitation occurred before 2002. Here, the highest average values of precipitation in the long term were found in 1963 (854 mm) and 1981 (761 mm).

In recent times, regional climate change has made the winter milder with the increase in air temperature, while the summer is hotter and stuffiness. Convective processes have shifted until mid-summer [3,12, 22]. Such a warming process reduced the period of solid precipitation in the central highlands and extended the phase of foggy weather conditions. Due to the increase in the rate and volume of melting in the high mountain zone, the amount of glaciers and snow glades that carry over to the next year has decreased sharply [5, 17]. In some years, the glaciers, which have completely melted and run out, cause the water in the river basins to decrease [8, 13, 20].



Fig. 4. Drying of forest massifs in the area of 900-1100 m altitude in the Lachin district (August 2024)

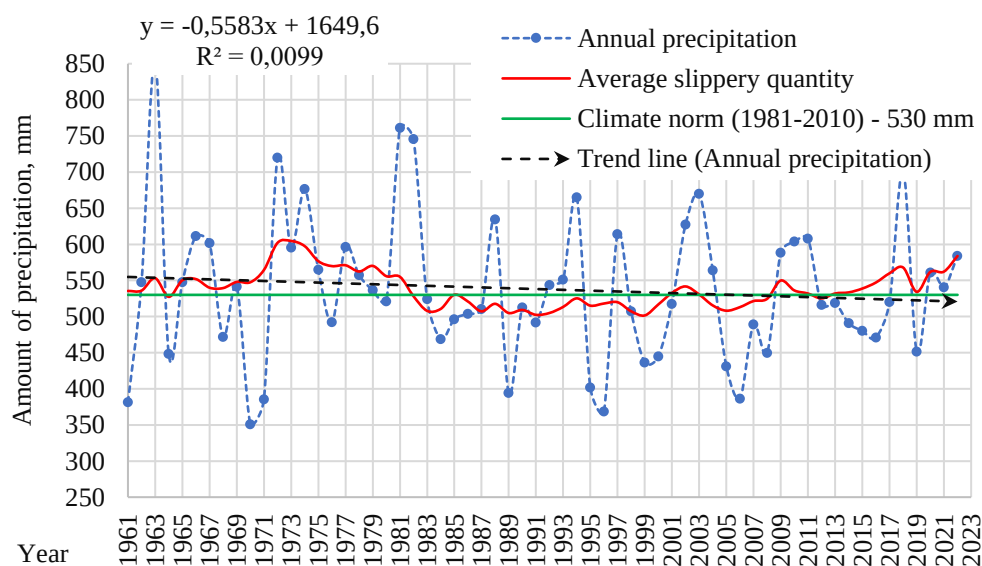


Fig. 5. Perennial dynamics of average annual precipitation in the Kalbajar and Lachin districts

In the Lesser Caucasus Mountains, no extensive studies have been conducted about glaciers, snowfields, etc. In recent times, known processes

have led to a slowdown in research in this field. With this research, for the first time, the snow reserves available in August in the area above 3000 m

above the junction of the Mikhtokan and Karabakh ridges in the southern part of the Lesser Caucasus mountains were evaluated.

The territory of the watershed, where Mikhtokan, Saribulagdagh and Karabakh volcanic plateaus are connected, studied with satellite photos, is located in an area 2800-3600 m above sea level. This zone is between the summits of Sarchali (3433 m), Gizilboghaz (3581 m) of the Karabakh volcanic plateau and Dalidag (3616 m) of the Mikhtokan range. Since the higher peaks are on the edges, the central part where the ridges meet has a relatively flat topography. The high mountain slopes located here are distinguished from other mountain slopes by their gentle slope and smooth surface (Figure 6).

The relief consists of large peaks and plateaus between which large volcanic sediments come to the surface. If we pay attention to the relief in August, when the ice and snow cover of the year has a minimal area, it is clearly observed that the nival and subnival landscape develops in the area. In the places where the volcanic lava rises to the surface, the gravel, oval rocky relief occupies a large area. Since there are gaps in the deeper parts of such rocks,

melting snow and ice flows over the rocks and fills those depressions, resulting in the formation of cirque lakes. Outcrops of rock and grey soil patterns look a lot like ice and snow because they appear pale white in satellite images.

However, if we pay attention to all the images, the borders of the snow glades are completely cut and stand out sharply from the surroundings. Additionally, the sun's glare is clearly felt in all parts covered with snow. The presence of such a shine distinguishes snow cover from ordinary soil samples. Sunlight is a sharp, bright white colour that results from the presence of small amounts of sediment or dust particles (Figure 7).

If we take into account that the sediments were covered by the snow cover by wind and avalanches, it can be concluded that these covers fell a short time ago. There is no doubt that such snow glades are the product of the last one or several years. Both the analysis of images (2017-2023) and physical characteristics permit us to clarify the result.

In this area, snow glades are available in August as well. Glades can usually be found parallel to the direction of flow in valleys in depressions or at

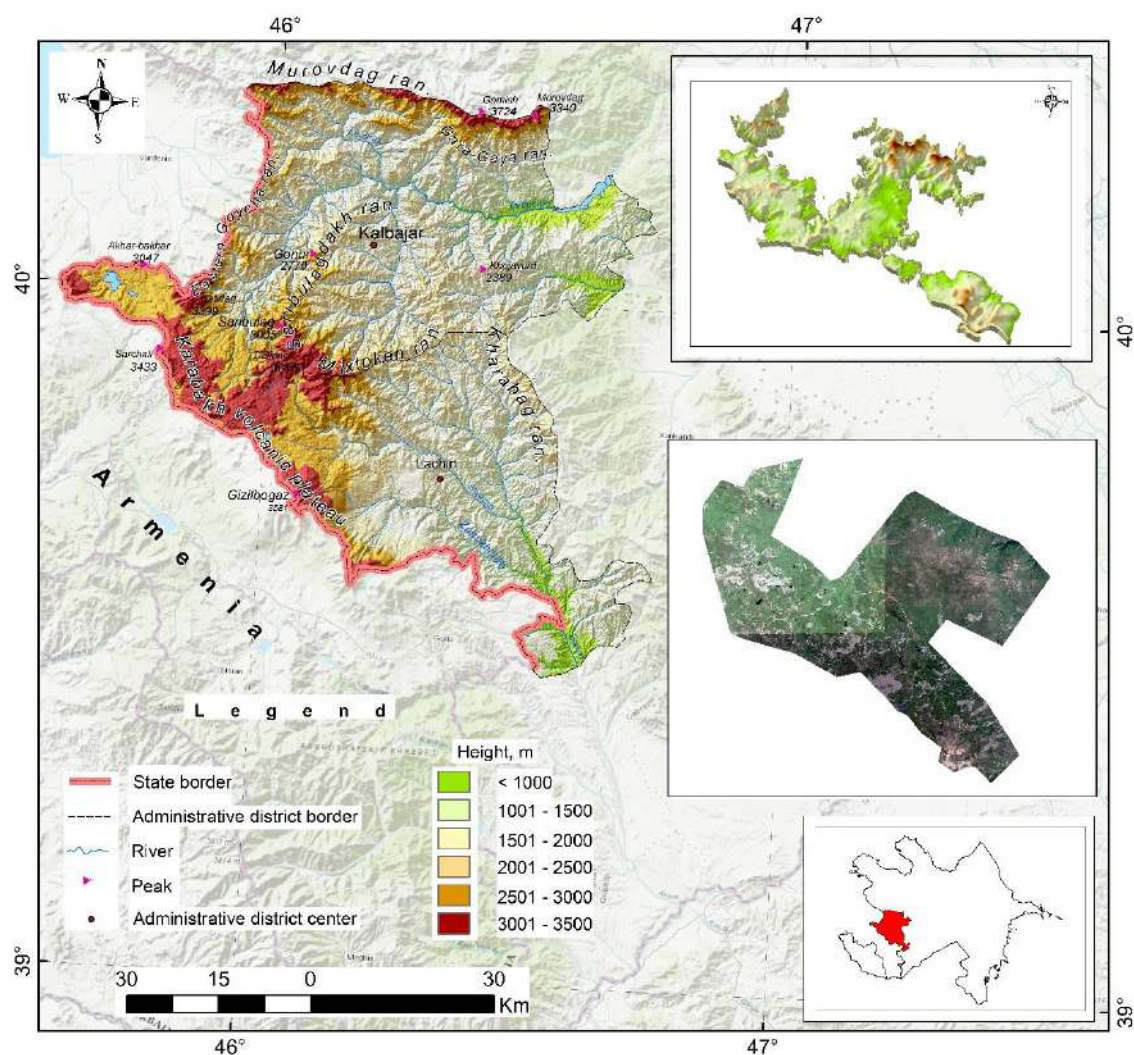


Fig. 6. 3D, satellite and physical-geographic image of the research object

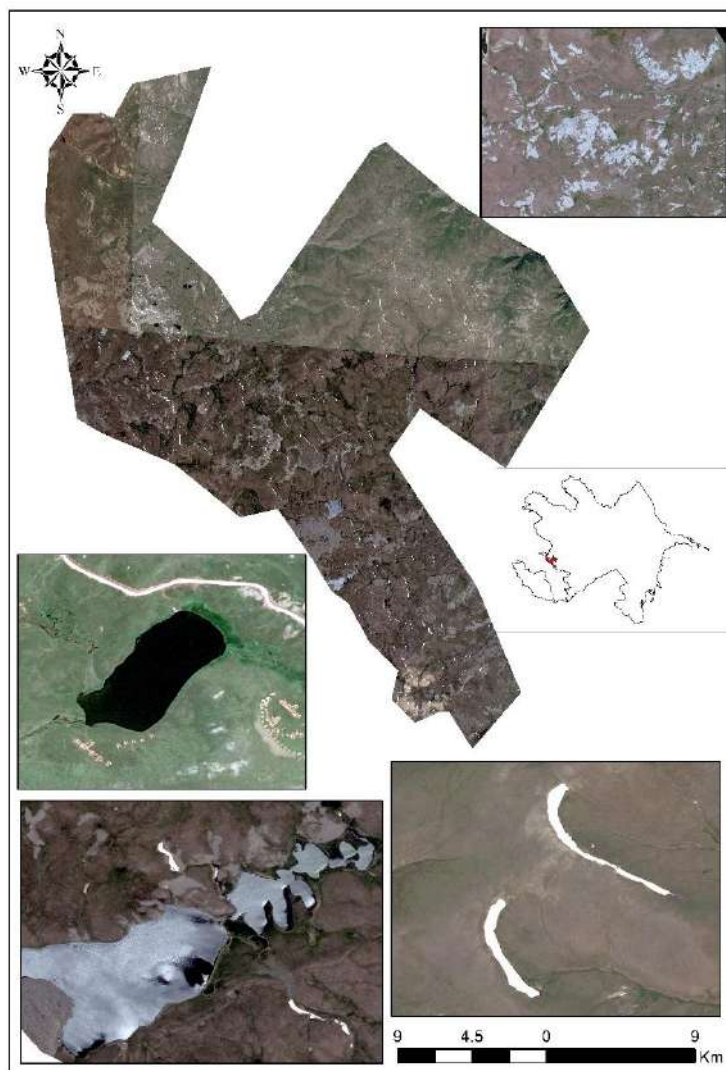


Fig. 7. View of the primary elements of the terrain from satellite images

the watersheds of ridges and hills. Areas with snow glades can be called areal **snowfields**, where the snow glades of the area become a general massif (Figure 8). The location of those snowfields on the banks of the flow zones of the valleys moving vertically or horizontally causes late melting of those residues that flow from the surrounding areas during melting and turn into ice during the cold season. Such snowfields can usually remain for the next year, and in the cold period, snow falls on them again several times.

Studies prevail that, depending on the air temperature of the region in individual years, the total area of snowfields does not exceed 6.0 km². The territory of such glades can retreat with the rise of air temperature in the hot season. According to satellite data, the snowfields were more in 2017, 2019, 2021, 2023 and 2024, where the most snowfields were 5.72 km² in 2017. This shows itself with lower indicators in the following years. According to the analysis of 2021, the number of snow glades in the region is 1250-1300 units. Even if the snow glades

left here in the following year melt, there will be snow in this area again the following year.

With the application of GIS technology, the boundaries and areas of the mentioned snow glades were determined. Changes in the area of snow glades in the perennial period indicate that more snow reserves were recorded in the region in 2021. This is due to more rainfall that year. Therefore, those areas are areas of potential snow glades. Snow glades, which had maximum indicators in 2021, gradually decreased in the following years (Figure 9). The total area of snow glades in this area was minimal in 2017. From 2021, it increased to the maximum level in the region, and until 2023, a decrease was recorded. In 2024, the expansion of snow glades was again experienced.

Some of the fields located in cirques are covered with debris cones that are constantly moving from the highlands. Debris layers covering the top of the snow protect it from permanent and strong melting. The primary reason for the maintenance of snow fields here is the climate, and another reason is



Fig. 8. Snow glades and general snowfield in the area

their location on the northern slopes of the mountains, in the sunless zone. Thus, the sun's rays fall on these slopes at a sharp angle, and the temperature on that surface is lower.

Since the climate of the Lesser Caucasus Mountains is dry, hot and continental, modern glaciers have rarely developed in this area. Modern glaciers develop as small ridges only on high peaks where there is a great elevation and the climatic conditions are favourable for the formation and maintenance of the glacier. The lack of favourable cold climatic conditions does not permit the spread of glacier reserves in this part of the Lesser Caucasus. However, in a small part of the research area, it can be possible to find remnants of snow that have turned into several-year-old furnaces.

In this region, the glaciers (firn) are scattered in a small area and isolated at an altitude of about 3100-3300 m. Those glaciers were collected on the rocks in the sloping plain zone on the eastern slope of the Gizilboghaz elevation (Figure 10). The moraine deposits on the snow block the brightness of the glacier. Generally, glaciers reflect most of the sunlight falling on an open surface, and it causes low level of albedo. However, covering the surface of the glacier with sediments increases the absorption of solar rays and causes the glacier to melt faster. The total area of firn ice located here in the form of small balls is 0.148 km² (148 ha). This glacial firn is still in the firn stage. Analysis indicates that the ice remnant was formed in the last few years. That area of the glacier melts in some years, turning it into a bedrock lake.

In this area, the number of big and small glacier balls is 5. Two of them cover a relatively large area

of 0.14 km² (139.3 ha). The area of 3 other smaller ices is about 0.005 km² (8.67 ha).

The lakes are poorly developed when the ice exists or the cirque is almost empty. When there is no ice, these lakes are filled with water, and in satellite images, such lakes resemble relatively round black spheres with a black colour (Figure 11a, b). There are more than 100 large and small lakes, ponds and small water holes in the area. The total area of the lakes is about 2.36 km². Nourishment of such small lakes collecting water feed with snow, ice and rainwater. 20 of these lakes are large compared to others. One of the big lakes here is Zalkhagol (Figure 11b).

During the cold season of Zalkhagol, its surface is covered with ice. This lake is considered the source of Bazarchay. The water seeping from the lakes is the primary source of nutrition for the beginning of the Tartar River and the left tributary of the Hakari River. Since these lakes are located in a rocky terrain, there is a constant supply of water, as water percolates and evaporates at a slow rate. Starting from the end of September, the process of freezing these lakes and covering the area with snow begins. From the beginning of autumn, precipitation begins to fall heavily on these mountains.

The analysis reveals that the air temperature has constantly increased with higher indicators from 2017-2023.

Despite these growth indicators, the snow and ice reserves in the region were sufficient in 2021. There is a relationship between the increase in temperature and the dynamics of the snow reserve. However, because the increase in temperature in the low highlands increases possible evaporation, the

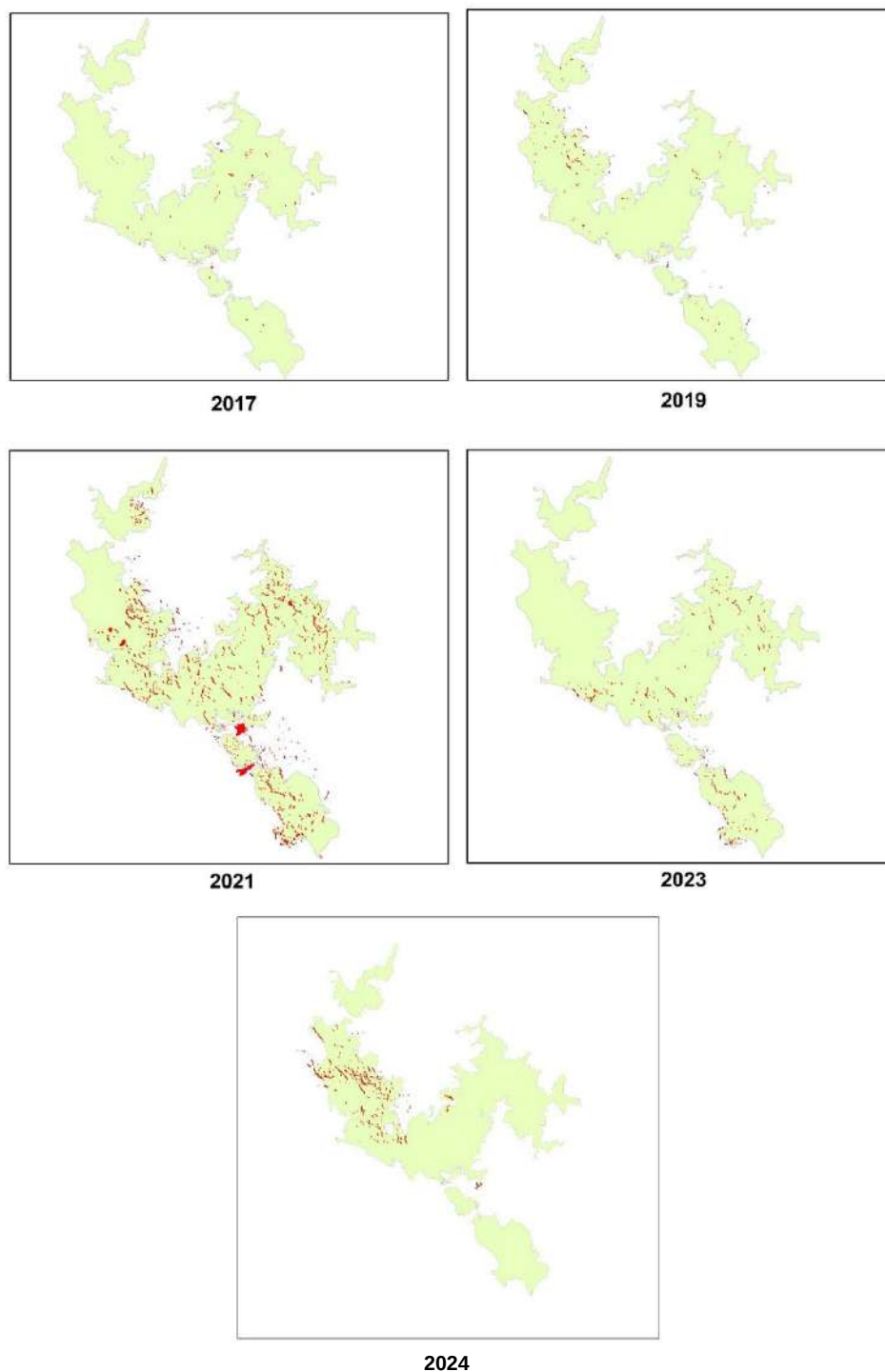


Fig. 9. Perennial dynamics of snow glades (red polygons) in the area

precipitation in the middle and high highlands increases compared to other years as well. The formation of precipitation means an increase in the number of cloudy days. This prevents the sun's rays from directly falling on the snow and ice cover in the high mountains and causes an increase in its existence period. At the same time, solid or mixed precipitation prolongs the duration of the snow supply in this area.

Conclusions. The following conclusions were obtained in the research conducted based on hydro-meteorological data and satellite images in the sou-

thern mountainous part of the Lesser Caucasus physical-geographical province (Mikhtokan, Saribulagh ranges and Karabakh volcanic plateau):

1. From 2011-2022, the average monthly temperature indicators in these parts of the Lesser Caucasus province increased by 0.9-1.4°C in January (0.9°C), May (1.4°C), June (0.9°C); by 0.5°C in April (0.5°C) and September (0.5°C), whereas it decreased in February (0.50C) and November (0.70C), and fluctuated within the climatic norm in other months.

2. Compared to 1981-2010, the average annual

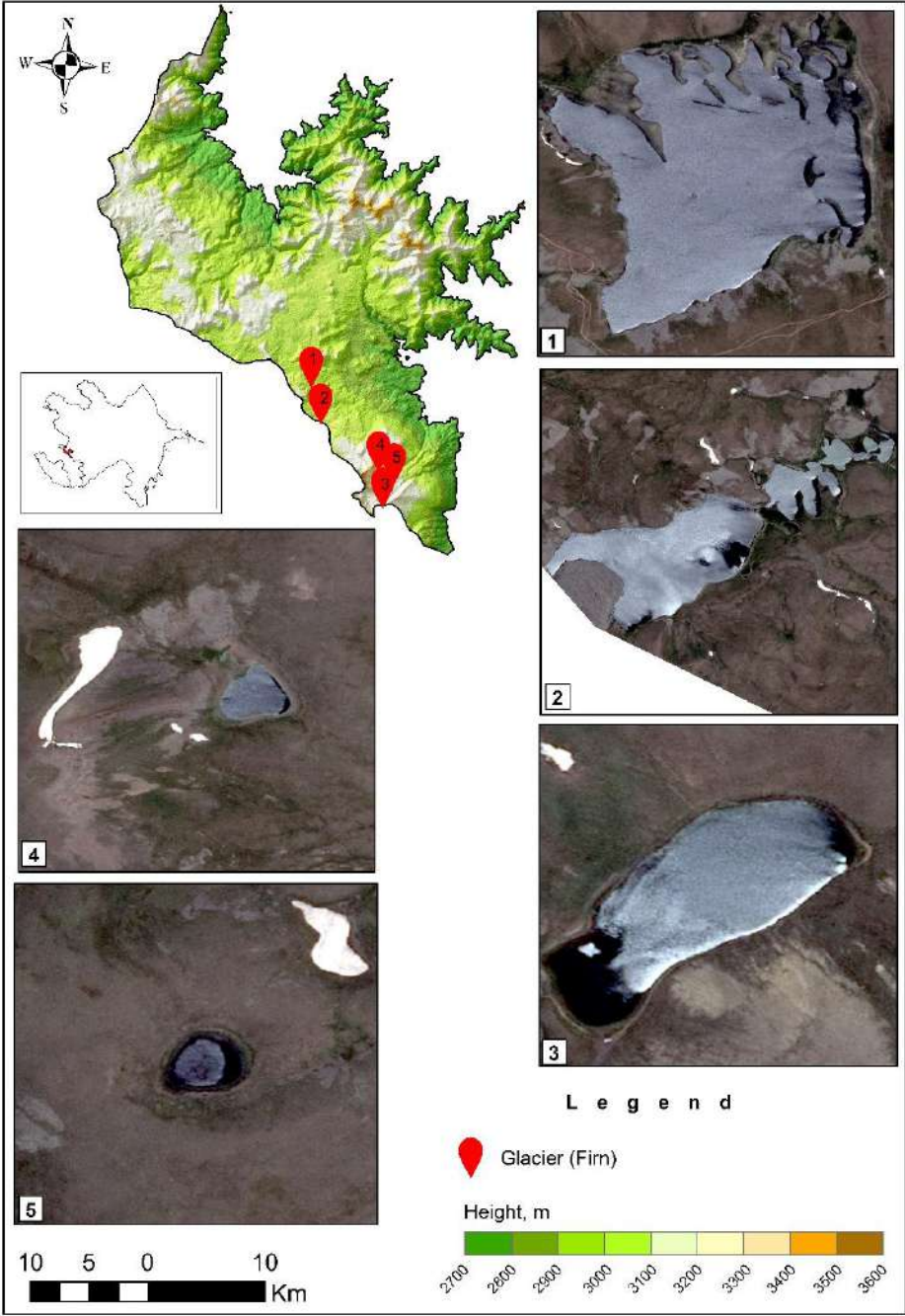


Fig. 10. Firn ice of Gizilboghaz peak

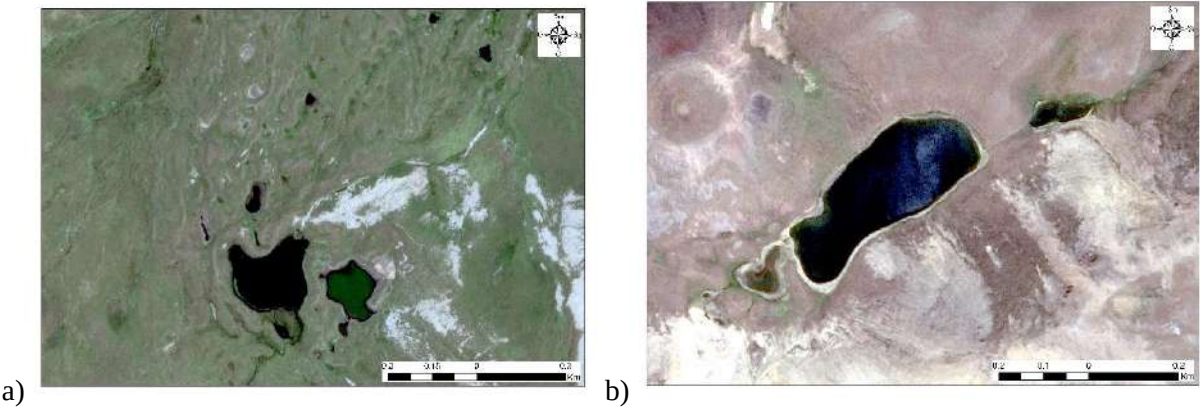


Fig. 11. Glacier-fed lakes of the Karabakh volcanic plateau

precipitation in the region from 2011-2015 decreased by 1% or 7 mm over the entire period.

3. Depending on the air temperature, the amount of snow cover in this region does not exceed 6.0 km². According to satellite data, the snowfields were more in 2017, 2019, 2021, 2023 and 2024, where the most snowfields were 5.72 km² in 2017. According to the analysis of 2021, the number of snow glades in this zone is 1250-1300 pieces.

4. Glaciers (firn) are spread in the region at an altitude of approximately 3100-3300 m. Those glaciers were collected on the rocks in the sloping plain zone on the eastern slope of the Gizilboghaz elevation. The total area of firn ice located here in the form of small balls is 0.148 km² (148 ha). Here, the number of big and small glacier balls is 5. Two of them are large, covering an area of 0.14 km² (139.3 ha).

As a result of the field expedition and satellite research carried out for the first time in the highland

region of Mikhtokan, Saribulagh ridges and Karabakh volcanic plateau, modern information about snow glades and glaciers was obtained for the first time. The results of the research can be used in mitigation and adaptation measures against climate change. At the same time, the water resources of the rivers originating from that region can be evaluated and can be of special importance in the preparation of future forecasts. Considering that the research area (Kalbajar-Lachin) is a brand-new settlement area, it can be used during the placement of residential and social infrastructure, agricultural and industrial areas in this zone. The results of the research should be taken into account when developing warning systems to protect against destructive natural events in this zone.

This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation – Grant № AEF-MQM-QA-2-2023-3(45)-05/02/1-M-02.

Bibliography

1. Budaqov, B.Ə. *Azərbaycanın Böyük Qafqaz hissəsində müasir və qədim buzlaşma*, Bakı: AMEA-nın nəşriyyatı, 1965. 200 p.
2. Carturan, L., Philipp, R., Paul, F. On the disequilibrium response and climate change vulnerability of the mass-balance glaciers in the Alps // Cambridge University Press: *Journal of Glaciology*, 2020, Vol. 66, Is. 260, p. 1034–1050. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.71>
3. Etzelmüller, B. Isaksen, K., Czekirde, J., Westermann, S. Hilbich, C., Hauck, C. Rapid warming and degradation of mountain permafrost in Norway and Iceland // *Copernicus: The Cryosphere*, 2023, Vol. 17, Issue 12, p. 5477–5497. <https://doi.org/10.5194/tc-17-5477-2023>
4. *Azərbaycan Respublikası ərazisində hidrometeoroloji şərait və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr / Azərbaycan Respublikası Ekologiya və Təbii Sərvətlər Nazirliyi, Hidrometeorologiya Elmi-Tədqiqat İnstitutu. – Bakı: Ziya, – 2001-2017-ci illər üzrə dövrü nəşrlər*. 56 p.
5. Hartl, L., Helfricht, H., Waldhuber, M. S., Seiser, B., Fischer, A. Classifying disequilibrium of small mountain glaciers from patterns of surface elevation change distributions // Cambridge University Press: *Journal of Glaciology*, 2022. Vol. 68, Issue 268, p. 253–268. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.90>
6. Helevera, O., Mostipan, M., Topolnyi, S. Winter and spring long-term dynamic of air temperature in Central Ukraine // *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 2023, (59), p. 83-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07>
7. Huseynov, N.Sh., Huseynov, J.S. Distribution of the Contemporary Precipitation Regime and the Impact of Climate Change on it within the Territory of Azerbaijan // *Barcelona: Journal of Geography & Natural Disasters*, 2022. Vol. 12, Is. 4, №: 1000254, p. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.35841/2167-0587.22.12.254>
8. Hüseynov, N.Ş., Hüseynov, C.S. *Azərbaycanın iqlimi: Havanın temperatur rejimi*. Bakı, *Optimist*. 2024. 267 p.
9. İmanov, F.Ə. *Hidrometeorologiyada statistik metodlar*. -Bakı: MBM, 2011, 272 p.
10. *Qarabağ və Şərqi Zəngəzurun coğrafiyası: təbii-coğrafi şərait və sosial-iqtisadi inkişaf potensialı* // red. Z.N. Eminov ilə. Bakı, *Optimist*, 2021, 536 p.
11. *Azərbaycan Respublikasının Coğrafiyası* / red. R.M.Məmmədov. – Bakı: Avropa, c. 1: *Fiziki Coğrafiya*, 2015. 530 p.
12. Kenneth, E.K., Thomas, R. K., David, R. E., Kelly, R., John, Y., Xungang, Y., Paula, H. Probable maximum precipitation and climate change / UK: *Geophysical Research Letters*. v. 40 (7), 2013. P. 1257-1455. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
13. Mahmudov, R.N. *Müasir iqlim dəyişmələri və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr*. -Bakı: Milli Aviasiya Akademiyası, 2018. 232 p.
14. Məmmədov, M.Ə. *Azərbaycan hidroqrafiyası*. – Bakı: Nafta-Press, 2002. 266 p.
15. Miroslav, K., Donald, R. N. Soil regulates the circulation of water on the planet Earth (Chapter of eBook) / Springer: *Soil, The Skin of the Planet Earth*, Dordrecht, 2015. P. 137–158. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9789-4_10
16. *Azərbaycan Respublikasının Milli Atlası [Xəritə]* / Bakı: Dövlət Torpaq və Xəritəçəkmə Komitəsi, 2014. 444 p.
17. Otto, F.E.L. Attribution of extreme events to climate change / F.E.L. Otto // *Annual Review of Environment and Resources*, 2023. V. 48. P. 813-828. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-083538>
18. Roger L. H., *Principles of Glacier Mechanics /Third edition/* London: Cambridge University Press, 2020. – P. 304. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20073>

19. Solomina, O., Bushueva, I., Dolgova, E., Jomelli, V., Alexandrin, M., Mikhaleiko, V., Matskovsky, V. Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium // *Global and Planetary Change*, 2016. Vol. 140, p. 28-58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
20. Shahgedanova, W.M., Hassell, H.D., Stokes, C. R., Popovnin, V. Climate Change, Glacier Retreat, and Water Availability in the Caucasus Region // Springer: Threats to Global Water Security: Environmental Security, 2009. Vol. 140, p. 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
21. Tielidze, L.G., Wheate, R.D. The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan) // *Copernicus: The Cryosphere*, 2018. Vol. 12, Issue 1, p. 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
22. Tielidze, L.G., Nosenko, G.A., Khromova, T.E. Paul, F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 // *Copernicus: The Cryosphere*, 2022. Vol. 16, Issue 2, p. 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
23. Vander, V.C.J. *Fundamentals of Glacier Dynamics* /Second Edition: CRC Press, London, 2013, p. 107. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0032247400016922>
24. World Meteorological Organization. *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals* // Geneva, 2017. № 1203, Switzerland. 29 p. ISBN 978-92-63-11203-3.
25. Available at: www.power.larc.nasa.gov
26. Available at: www.earthexplorer.usgs.gov/
27. Available at: www.data.giss.nasa.gov/gistemp/

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Budagov, B.A. (1965). *Modern and ancient glaciation in the Greater Caucasus part of Azerbaijan*. ANAS publishing house, Baku, 200 [in Azerbaijani].
2. Carturan, L., Philipp, R., Paul, F. (2020). On the disequilibrium response and climate change vulnerability of the mass-balance glaciers in the Alps. *Journal of Glaciology*, 66 (260), 1034-1050. <https://doi.org/10.1017/jog.2020.71>
3. Etzelmüller, B., Isaksen, K., Czekirda, J., et al. (2023). Rapid warming and degradation of mountain permafrost in Norway and Iceland. *The Cryosphere*, 17 (12), 5477-5497. <https://doi.org/10.5194/tc-17-5477-2023>
4. Hartl, L., Helfricht, H., Waldhuber, M. S., et al. (2022). Classifying disequilibrium of small mountain glaciers from patterns of surface elevation change distributions. *Journal of Glaciology*, 68 (268), 253-268. <https://doi.org/10.1017/jog.2021.90>
5. Helevera, O., Mostipan, M., Topolnyi, S. (2023). Winter and spring long-term dynamic of air temperature in Central Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 83-94. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-07>
6. Huseynov, N.Sh., Huseynov, J.S. (2022). Distribution of the Contemporary Precipitation Regime and the Impact of Climate Change on it within the Territory of Azerbaijan. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 12(4), 1-7. <https://doi.org/10.35841/2167-0587.22.12.254>
7. Huseynov, N.Sh., Huseynov, J.S. (2024). *Climate of Azerbaijan: Air temperature regime*. Optimist, Baku, 267 [in Azerbaijani].
8. Imanov, F.A. (2011). *Statistical methods in hydrometeorology*. MBM, Baku. 272 [in Azerbaijani].
9. Eminov, Z.N. (2021). *Geography of Karabakh and Eastern Zangezur: natural-geographic conditions and socio-economic development potential*. Optimist, Baku, 536 [in Azerbaijani].
10. Mammadov, R.M. (2015). *Geography of the Republic of Azerbaijan (Physical Geography)*. Avrora, Baku, 1, 530 [in Azerbaijani].
11. Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Azerbaijan, Scientific Research Institute of Hydrometeorology (2001-2017). *Hydrometeorological conditions and dangerous hydrometeorological events in the territory of the Republic of Azerbaijan*. Ziya, Baku, 56 [in Azerbaijani].
12. Kenneth, E.K., Thomas, R.K., David, R.E., et al. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40 (7), 1257-1455. <https://doi.org/10.1002/grl.50334>
13. Mahmudov, R.N. (2018). *Modern climate changes and dangerous hydrometeorological phenomena*. National Aviation Academy, Baku, 232 [in Azerbaijani].
14. Mammadov, M.A. (2002). *Hydrography of Azerbaijan*. Nafta-Press, Baku, 266 [in Azerbaijani].
15. Miroslav, K., Donald, R. N. (2015). Soil regulates the circulation of water on the planet Earth. *Soil, The Skin of the Planet Earth*, Dordrecht, 137-158. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9789-4_10
16. National Atlas of the Republic of Azerbaijan (2014). *State Land and Mapping Committee*, Baku, 444 [in Azerbaijani].
17. Otto, F.E.L. (2023). Attribution of extreme events to climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 813-828. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112621-083538>
18. Roger L. H. (2020). *Principles of Glacier Mechanics* (Third edition), Cambridge University Press, London, 304. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20073>

19. Solomina, O., Bushueva, I., Dolgova, E., et al. (2016). Glacier variations in the Northern Caucasus compared to climatic reconstructions over the past millennium. *Global and Planetary Change*, 140, 28-58. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
20. Shahgedanova, W.M., Hassell, H.D., Stokes, C. R., Popovnin, V. (2009). Climate Change, Glacier Retreat, and Water Availability in the Caucasus Region. *Threats to Global Water Security: Environmental Security*, 140, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.008>
21. Tielidze, L.G., Wheate, R.D. (2018). The Greater Caucasus Glacier Inventory (Russia, Georgia and Azerbaijan). *The Cryosphere*, 12(1), 81-94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
22. Tielidze, L.G., Nosenko, G.A., Khromova, T.E. Paul, F. (2022). Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere*, 16(2), 489-504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>
23. Vander, V.C.J. (2013). *Fundamentals of Glacier Dynamics (Second Edition)*. CRC Press, London, 107. <https://doi.org/10.1017/S0032247400016922>
24. World Meteorological Organization (WMO) (2017). *Guidelines on the Calculation of Climate Normals*. Geneva, 1203, 29.
25. Available at: www.power.larc.nasa.gov
26. Available at: www.earthexplorer.usgs.gov/
27. Available at: www.data.giss.nasa.gov/gistemp/

Сучасний стан льодовиків і снігових галявин у південному гірському районі провінції Малий Кавказ

Джамал Гусейнов ¹

к. геогр. н.,

¹ АТ «Азербайджанські авіалінії»,

Національна авіаційна академія, Баку, Азербайджан;

Аллахверді Тагієв ³

аспірант, наук. співробітник,

² Азербайджанський державний університет нафти та промисловості,

Баку, Азербайджан

У роботі досліджено сучасний стан багаторічних снігових галявин і льодовикових запасів, розташованих на Карабахському вулканічному плато, хребтах Міхтокан і Сарібуга, що вважається південною гірською частиною провінції Малий Кавказ. Для цього були інтерпретовані супутникові усереднені фотографії, а також використані супутникові бази даних Azersky, Landsat, Sentinel-1 та ін. Розрахунки та аналізи проводилися з використанням різних методів вимірювання та обробки отриманих растрових файлів після декодування супутникових зображень. Крім цього, в дослідженні вказувалося фізико-географічне положення місцевості, кліматичні умови, зверталася увага на багаторічні зміни температури повітря та кількості опадів. У дослідженні розглядався вплив зміни клімату на запаси льодовиків. Порівняно з 1981-2010 рр., з 2011-2022 рр. середньомісячні показники температури в цій частині провінції Малий Кавказ підвищилися на 0,9-1,4°C у січні (0,9°C), травні (1,4°C), червні (0,9°C); зросла на 0,5°C у квітні (0,5°C) та вересні (0,5°C); при цьому в лютому (0,5°C) і листопаді (0,7°C) цей показник знижувався, а в інші місяці коливався в межах кліматичної норми. Середньорічна кількість опадів по області за 2011-2015 роки за весь період зменшилася на 1%, або на 7 мм. Залежно від температури повітря площа снігових галявин у цьому регіоні не перевищує 6,0 км². Територія таких галявин може танути з підвищенням температури повітря в теплу пору року. У регіоні фірновий лід поширений приблизно на висоті 3100-3300 метрів. Ці льодовики були зібрані на східному схилі гори Гізилбогаз, на скелях, які знаходяться близько до поверхні на похилому схилі. Загальна площа фірнового льоду, розташованого на цій ділянці у вигляді малих куль, становить 0,148 км², а кількість великих і малих льодовикових куль – 5. Дві з них великі і займають площу 0,14 км². Площа 3 інших менших льодів становить близько 0,005 км² (8,67 га).

Ключові слова: хребет Міхтокан, зміна клімату, кліматична норма, льодовик, фірн, снігові галявини, ГІС-технологія, кількість опадів, температурна аномалія, тенденція.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 14 жовтня 2024 р.

Прийнята 21 листопада 2024 р.

ЕКОЛОГІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-24>

UDC 911.2:631.41(669.126)

Received 18 September 2024

Accepted 18 November 2024

Spatial variability of some soil properties around Zaria area, Kaduna state, Nigeria

Yasin Agono Awwal¹

Lecturer, Researcher, ¹ Federal University Wukari, Taraba State, Nigeria,
e-mail: awwalyasin@fuwukari.edu.ng,  <https://orcid.org/0000-0002-7693-8471>;

Ruqayyah Muhammad Fatihu²

MSc, Department of Geography,
² Ahmadu Bello University, Kaduna State, Nigeria,
e-mail: ruqfatihu@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0000-4927-8546>

ABSTRACT

Introduction. Spatial variability of soil properties as influenced by both intrinsic and extrinsic factors, plays a pivotal role in agricultural productivity. Understanding this variability is critical for implementing site-specific management, which optimizes resource allocation while sustaining soil health. This study investigates the spatial variability of selected soil properties in agricultural fields around Zaria, Kaduna State, Nigeria, utilizing geostatistical techniques to provide insights for sustainable land management.

Materials and Methods. The study was conducted in an 85-hectare area located in Zaria, Kaduna State. Seventy soil samples were collected using a grid sampling approach across 85 hectares. Following standard laboratory procedures, the samples were analysed for properties, including particle size distribution, bulk density (BD), pH, organic carbon (OC), and cation exchange capacity (CEC). Geostatistical analysis using Kriging interpolation and semivariogram modelling was employed to determine spatial dependence.

Normal Distribution Test and Data Transformation. Laboratory data from the studied soil properties were tested for normality using the Ryan-Jover test, which revealed that most soil properties did not follow a normal distribution ($P < 0.05$). Johnson transformation was hence applied to improve normality for reliable geostatistical modelling, as confirmed by the residuals from QQ Plots.

Descriptive Statistics of Soil Properties. Clay content exhibited the highest variability ($CV = 43.09\%$), ranging from 60 to 420 g kg⁻¹. CEC showed moderate to high fertility potential, ranging from 6.33 to 25.50 cmol kg⁻¹, while OC were generally rated low. BD and pH showed weak spatial variability ($CV < 15\%$) due to the influence of intrinsic soil factors.

Geostatistical Analysis of Soil Properties. Semivariogram modelling revealed strong spatial dependence for most soil properties (nugget ratio < 0.25), including BD, OC, and pH, suggesting intrinsic factors as key drivers. Spatial ranges varied across properties, with clay and CEC extending to 339.9 m and 347.6 m, respectively, while pH and BD showed shorter ranges of 85.4 m and 93.3 m. Spatial patterns in sand and clay demonstrated inverse relationships, as areas with higher clay contents exhibited higher CEC and pH levels.

Spatial Distribution Maps. Kriging interpolation highlighted distinct spatial patterns, such as higher clay and CEC concentrations in specific zones, and lower pH in sandy areas, indicative of leaching effects. Maps showed that the spatial distribution of OC and BD is influenced by short-range processes, requiring localized management strategies.

Conclusion. This study demonstrates the necessity of addressing spatial variability in soil management plans. Strong correlations between clay and CEC emphasize the critical role of texture in influencing soil fertility. Properties like OC and BD, with weak spatial dependence, demand immediate attention through targeted interventions such as organic amendments and improved tillage practices.

Keywords: Kriging, semivariogram, spatial variability, soil properties.

In cites: Awwal Yasin Agono, Muhammad Fatihu Ruqayyah (2024). Spatial variability of some soil properties around Zaria area, Kaduna state, Nigeria. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 303-312. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-24>

Introduction. Variability in soil properties exists in nature due to changes that may be inherent such as geologic and pedologic factors [1], or induced, such as effect of landuse and other management practices [2, 3] on land. These intrinsic and extrinsic factors of land formation lead to variability in soil properties [3, 4], consideration of which is important for proper land management [5]. Site-specific management which is an important concept for maximizing agricultural productivity is highly dependent on understanding spatial variability of soil properties [6].

Spatial variability refers to the extent of variation in a given soil property over space [7]. Its assessment is based on the geographical assumption that objects that are closer are more closely related [8 – 11] and has been achieved using classical descriptive statistics such as mean, range, coefficient of variation [3, 12] and/or geostatistical methods such as variograms [6], isotropic variograms [13], semivariogram [14]. Many of these studies also employed the use of ordinary Kriging [15 – 18], co-kriging [6, 19], inverse distance weighting (IDW) [20], and other

interpolation methods to estimate variability in soil properties across unsampled locations within a desired study area.

According to Ardahanlioglu et al. [21], Kriging and IDW are the most commonly employed extrapolation methods in agriculture. Both methods utilize allocation of weights to observed properties in estimating values of defined properties at unobserved locations. However, Saleh [13] asserted that Kriging is more complicated and laborious to implement than IDW. Kriging provides a more accurate explanation of the spatial distribution of the data, while suggesting valuable information about the error or estimation [22]. The process of Kriging is contingent upon computing accurate semivariogram models from which estimates of variance can be reliably estimated. To develop this accurate semivariogram, a sufficient number of samples that can represent the autocorrelation of the soil property under consideration must be used [23].

Several researchers have utilized Kriging to evaluate variability of physical and chemical properties of soil on agricultural fields [24]. For instance, Masood and Salim [6] utilized Kriging technique to determine spatial variability of hydro-related physical properties of Al-Rasheed Loam in Iraq. The study explored properties such as saturated hydraulic conductivity, initial infiltration rate, Porosity and bulk density, revealing a moderately skewed (-0.5 to 0.5) spatial distribution for the studied characteristics. Saleh [13] studied spatial distribution of particle sizes, utilizing spherical and gaussian models for parameter determination of semivariogram models. While Yakub et al. [14] evaluated spatial variability in total nitrogen, organic carbon and pH in Wukari local government area of Nigeria.

Zaria province of Kaduna State includes communities that depend on agriculture as their major source of livelihood. Soils of the area are characterized by a diverse range of soil types, which shape

their properties and influence strategies for their management [25]. Several works have been carried out to investigate properties of soils in Zaria [5, 26]. Works have been carried out to investigate variation in soil properties in the area as a result of difference in parent material [27], topography [26, 28], and vegetative cover [25, 29]. However, these studies employed conventional method that were site specific and considered variation in soil units selected as a function of these factors, rather than as a continuum in space. About 25 years ago agronomists realized that geostatistics could be harnessed for precision agriculture, and they have made substantial progress in the technology since [30]. It is used for the site-specific management of crop nutrients, pH, irrigation, weeds and crop pests [31, 32].

Quantitative explanation of the inherent variation in soil properties across agricultural fields help by providing valuable basis for site-specific management, while increasing our knowledge of soils and aid in planning appropriate use for soil resources [33]. Therefore, this study aims to examine spatial variability of selected soil properties across farming fields under continuous cultivation.

Materials and Methods. Location of the study area. The study area consists of 85 ha, and is located between $11^{\circ} 6' 44.93''$ N, $7^{\circ} 37' 24.23''$ E and $11^{\circ} 4' 45.67''$ N, $7^{\circ} 39' 0.35''$ E (Figure 1). The region which has a tropical Savanna climate type with distinct wet and dry season [34], falls between Sabon Gari and Giwa local government area, Zaria, Kaduna State, Nigeria and is predominantly agrarian. Majority of the land under agricultural use are cultivated mechanically through conventional tillage. Most of the soils have a sandy to sandy loam texture [26, 35], and have been classified as leached ferruginous tropical soils developed on weathered regolith overlain by a thin deposit of wind-blown silt from the Sahara Desert during many decades of propagation of tropical continental air mass into the area [36].

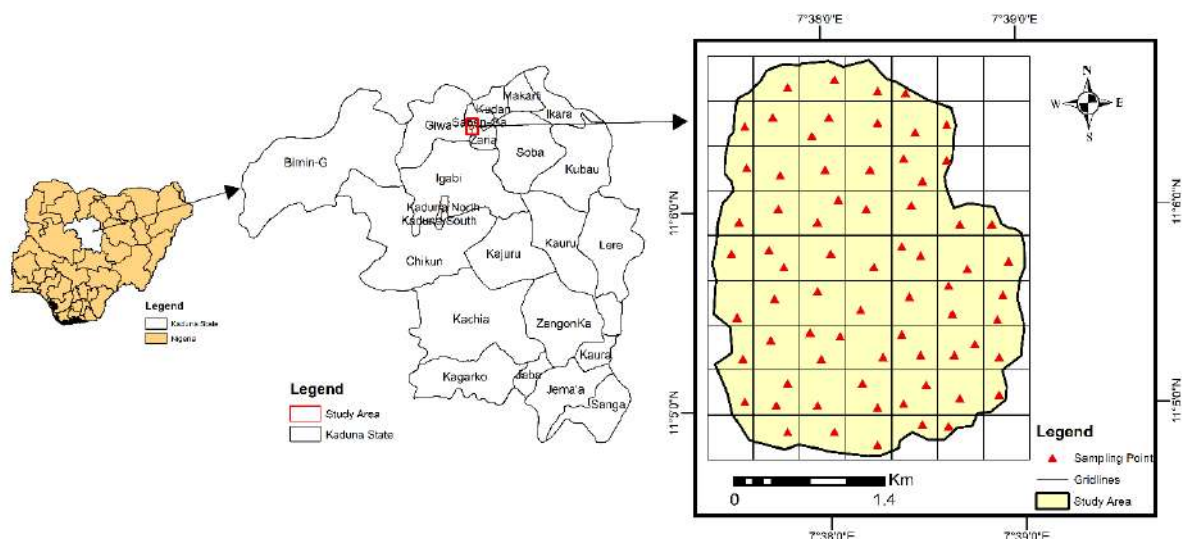


Fig. 1. Map of study area showing sample points

Sampling and soil analysis. A reconnaissance survey was carried out to delineate the study area, which spanned 83 hectares and was predominantly used for cultivating maize, watermelon, millet, cowpea and rice. A grid sampling method was employed, dividing the site into 63 grids (9×7), each approximately 120×120 m, using ArcGIS 10.5 [37]. Soil samples were collected from a depth of 0 – 45 cm to capture the spatial variability of soil properties. A total of 70 samples were obtained, with at least one sample from each grid, and additional samples from selected grids on observed heterogeneity. All sampling points were carefully georeferenced and recorded for precise spatial analysis (Figure 1).

Laboratory studies. Particle size analysis was determined using the Bouyoucus Hydrometer method as described by Gee and Or [38]. Organic carbon (OC) was determined by Walkley-Black dichromate wet oxidation method [39]. Glass electrode was used to determine soil pH in a 1:2.5 soil/water solution ratio, as described by Uyovbisere et al. [40]. Cation exchange capacity (CEC) was determined by neutral (pH 7.0) NH_4OAc saturation method as described by [41].

Statistical Analysis. Descriptive statistics and Pearson's coefficient of correlation were computed for the studied properties using R software [42]. The Ryan-Jover normality test was performed to test the hypothesis assuming each property has a normal variable distribution using Minitab 17.0. Properties without normal distribution ($P < 0.05$) were subjected to Johnson Transformation. Johnson transformation technique is renowned for its applicability in situations where standard parametric methods require

normality. It involves evaluating different transformation functions with four parameters shown in the equation below [43]. The transformation process optimally selects one of three (i.e. bounded, SB, log-normal (SL), and unbounded, SU) families of distributions, which can easily alleviate the non-normality and skewness of the raw data [44]. Johnson transformation is expressed as:

$$Z = \gamma + \delta f \left[\frac{x - \xi}{\lambda} \right] \quad (1)$$

where Z denotes a standard normal variable, γ and δ represent the shape parameters, $f(\cdot)$ is the function of transformation, λ is a scale parameter and ξ is a location parameter. This transformation method defines the lognormal system of distributions, making it suitable for soil data, since earlier researches have shown that soil properties are more closely log-normally distributed [45].

Geostatistical Analysis. The ArcGIS 10.5 software was used to build semivariogram models, $\gamma(h)$ describing degree of spatial dependence of random variable $Z(x_i)$ over certain distance points [46]. The model is given in Equation (2)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (2)$$

Where $\gamma(h)$ is the semivariance for the interval distance class h , $N(h)$ is the number of pairs, $Z(x_i)$ and $Z(x_i + h)$ are the measured sample values at position i and $(i + h)$, respectively. Two semivariogram models were used to describe the studied characteristics. Exponential model was used by default, while spherical models were used when transformation was done [6]. The models are depicted as:

$$\text{Exponential: } \gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right] & h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{Spherical: } \gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (4)$$

Where, C_0 : nugget variance, C : structural variance, $(C_0 + C)$: sill value of semivariogram, a : range of spatial correlation.

Results and Discussion. Normal Distribution Test and Data Transformation. The Ryan-Jover statistic was used to test the normality of each soil property. Sand content was the only property whose normality was not rejected based on its p-value which was greater than 0.05. The other properties were transformed using Johnson transformation. The transformation of the data improved the normality of the distributions, as indicated by the increased RJ and p-values as shown in Table 1. The necessity of applying transformation techniques on soil properties have been proven in several researches [12, 47, 48].

QQ plots were used to visualize the degree of

fitness of the data to normal distribution (Fig. 2). The plots compare the observed residuals to the expected values if the residuals were normally distributed. Few outliers are observed for sand, silt, clay and CEC, however, most of the data points clustered around the normal distribution line, suggesting sufficient normality.

Descriptive Statistics of Soil Properties. Descriptive statistics for soil properties are presented in Table 1. Sand content in the study area ranged from 100 to 740 g kg^{-1} (mean, 503.10 g kg^{-1}), and BD ranged from 1.22 to 1.40 Mg m^{-3} (mean, 1.31 Mg m^{-3}). Clay was the most variable soil separate in the study area, ranging from 60 to 420 g kg^{-1} . Soil pH varied between strongly acidic (5.20) and moderately alkaline (8.40), exhibiting weak variability (<15%).

Table 1

Soil Properties	RJ	Normal Dist.	P-Value	Transformation	RJ	Normal Dist.	P-value
Sand	0.985	NR	>0.100	None	-		
Silt	0.940	R	<0.010	Johnson	0.994	NR	0.167
Clay	0.978	R	0.044	Johnson	0.992	NR	0.331
pH	0.957	R	<0.010	Johnson	0.995	NR	0.380
OM	0.935	R	<0.010	Johnson	0.997	NR	0.930
CEC	0.966	R	<0.010	Johnson	0.995	NR	0.818

Note: RJ: Ryan-Jover statistics; NR: not rejected; R: rejected

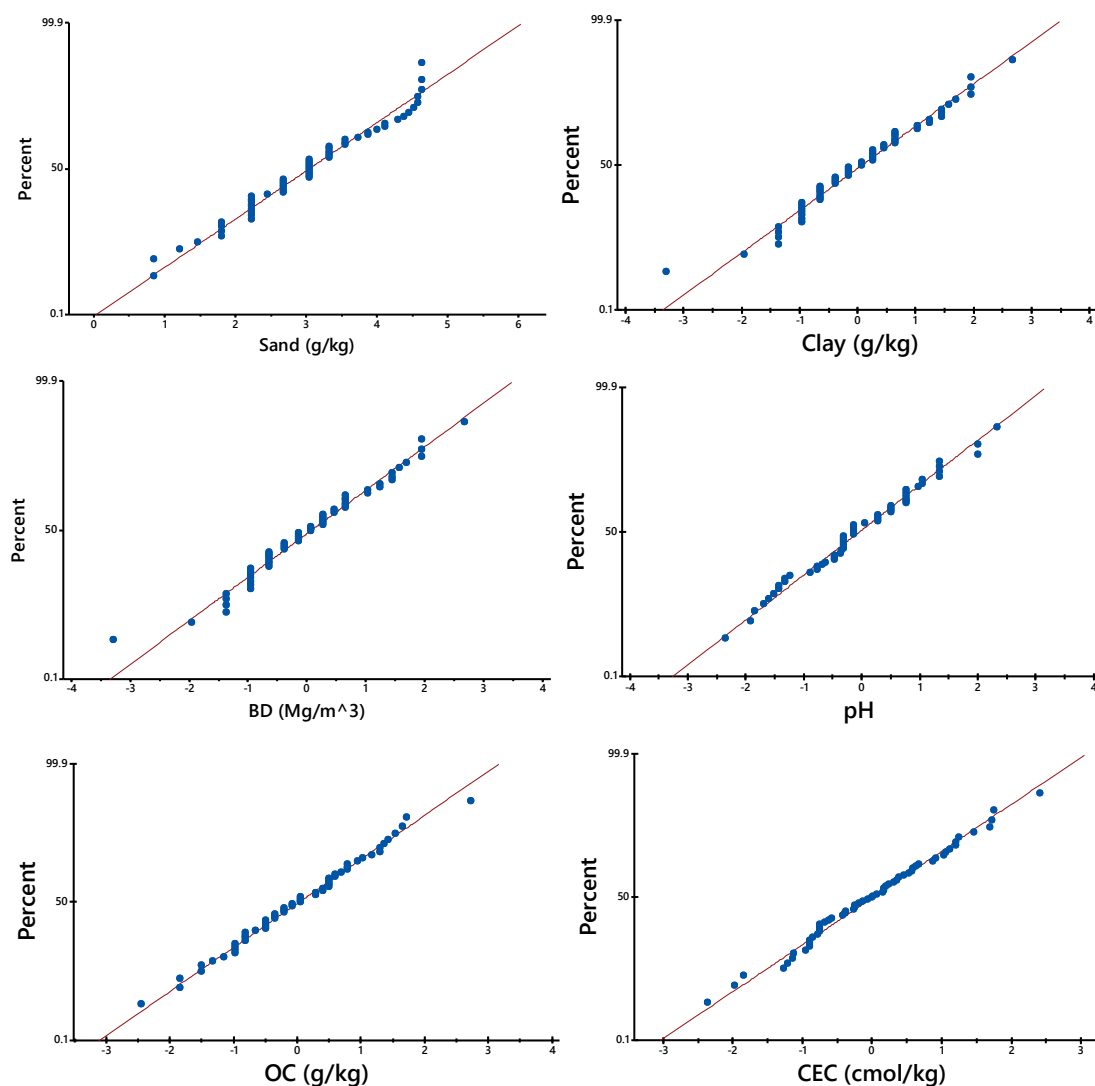


Fig. 2 (a-f). QQ Plots for the soil properties before (sand) and after normalization

Soil OM ranged from low (1.10 g kg^{-1}) to moderate (12.1 g kg^{-1}), which is typical in savanna soils [5, 49], while CEC ranged from moderate ($6.33 \text{ cmol kg}^{-1}$) on maize fields to high ($25.50 \text{ cmol kg}^{-1}$) on rice fields. Asides BD and pH which showed weak variability, other soil properties studied showed moderate to high variability, which is typical of soils formed in undulating planes of the savanna [50]. Sand and pH were left-skewed, while clay, OM and CEC were right-skewed. Clay and CEC exhibited flat distribution

from their negative kurtosis values. Close association between the two properties is expected due to high association between these properties around the study location as reported by [26].

Pearson coefficient of correlation was used to analyse the nature of relationship among the soil properties, and the values are presented in Table 3. Clay content positively correlated significantly with CEC ($r = 0.990^{***}$). Clay particles containing silicate minerals have a net negative charge due to the substi-

Table 2

Descriptive Statistics for Soil Properties							
	Min.	Max.	Mean	SD	CV	Skew.	Kurt.
Sand (g kg ⁻¹)	100.00	740.00	503.10	141.90	28.21	-0.49	0.08
Clay (g kg ⁻¹)	60.00	420.00	210.00	90.50	43.09	0.54	-0.68
BD (Mg m ⁻³)	1.22	1.40	1.31	0.053	4.02	0.00	-1.00
pH	5.20	8.40	7.39	0.65	8.84	-1.14	1.34
OC (g kg ⁻¹)	0.06	0.70	0.23	0.10	44.86	1.70	5.55
CEC (cmol kg ⁻¹)	6.33	25.50	13.27	5.10	38.45	0.66	-0.62

Note: OC: organic carbon; CEC: cation exchange capacity; CV: coefficient of variation (%); SD: standard deviation

tution of silica (Si⁴⁺) by aluminum (Al³⁺) in the mineral structure. This attracts positively charged ions such as calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺), and potassium (K⁺) held through weak electrostatic interactions. This allows the clay to retain and exchange cations with the surrounding soil solution [51]. Conversely, sand content negatively correlated with it CEC ($r = -0.650^{***}$). This may be due to the relatively poor surface charge nature of sand particles in soils [26]. Soil pH also positively correlated with clay particles ($r = 0.413^{**}$), implying that higher clay content were associated with higher pH, likely due to accumulation of basic cations on clay exchange sites [52, 53].

Geostatistical Analysis of Soil Properties

Exponential model was used to express semi-variogram of sand content, while spherical model was utilized for the other properties. The reason for this disparity was because sand content had a normal distribution, while the other properties were transformed [6]. Earlier researches also suggested the use of spherical models, especially for pH, clay [54], and

other chemical properties as it gave better results [13]. Nugget effect, sill, range and nugget-sill ratio were used to analyse the spatial distribution in this study. Nugget effect represents the variance at a lag distance of zero, capturing measurement error and spatial variation at distances smaller than the sampling interval [55, 56].

The nugget values were higher in sand (0.89) and clay (0.45) than in other soil properties, but were generally close to zero, suggesting that variances in soil properties were reasonably accounted for at the sampling distance used in this study [12]. The range refers to the distance over which spatial autocorrelation exists [57]. Beyond this distance, data points are considered spatially independent. The range for CEC, sand and clay were relatively large, ranging from 297.2 to 347.6 m, while pH, silt, and OM had lower ranges from 85.4 to 124.8 m, indicating that the optimum sampling interval varies greatly among different soil properties. The similar range for sand and clay is due to the inverse nature of their relationship,

Table 3

Pearson correlation analysis of soil properties					
	O.C	pH	Clay	BD	Sand
CEC	0.433	0.415**	0.990***	0.042	-0.650***
O.C		-0.053	0.035	-0.129	0.095
pH			0.413***	0.207	-0.395**
Clay				0.035	-0.774***
BD					-0.074

LOS: * = $P < 0.05$; ** = $P < 0.01$; *** = $P < 0.001$

Table 4

Semivariogram model types and parameters of soil properties						
Soil Properties	Model	Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)	Range (m)	Nugget/Sill (C ₀ /C ₀ +C)	Spatial Dependence
Sand (g kg ⁻¹)	Exponential	0.89	2.82	297.20	0.31	moderate
Clay (g kg ⁻¹)	Spherical	0.45	2.00	339.90	0.22	strong
BD (g kg ⁻¹)	Spherical	0.00	0.92	93.30	0.00	strong
pH	Spherical	0.17	1.17	85.40	0.14	strong
OC (g kg ⁻¹)	Spherical	0.00	1.20	124.80	0.00	strong
CEC (cmol kg ⁻¹)	Spherical	0.35	1.62	347.60	0.21	strong

whereby one increases as the other reduces as further buttressed by the significant negative correlation between them ($r = -0.774^{***}$). Also, the similarity between the range of clay and CEC is explained along same lines, since they are significant correlators.

The nugget to sill ratio or nugget ratio was used to evaluate the degree of spatial dependence of the properties [58]. A nugget ratio less than 0.25 indicates strong dependency, between 0.25 and 0.75 indicates moderate dependency, and there is said to be weak spatial dependency when nugget ratio is greater than 0.75 [59, 60]. Bulk density (0.00), clay (0.22), pH (0.14), OM (0.00) and CEC (0.21) were all strongly spatially dependent, suggesting that their spatial auto-correlation are affected by intrinsic properties such as parent material, mineralogy, climate, and other structural factors [61]. This is similar to the findings of Yakub et al. [14], whose research showed strong spatial correlation for OM (nugget ratio, 0.00). Gülser et al. [12] similarly reported strong autocorrelation with a nugget ratio of 0.13 for clay content in cultivated fields. Several researchers have linked soil properties like pH to parent material [53, 62] and leaching of basic cations [26] in the study area. Likewise, the strong spatial dependence of OM is attributed to climatic factors such as radiation and high temperature, which leads to high mineralization [26, 50] and frequent crop residue removal for feeding livestock, fuel, and building purposes [27, 49]. Sand content showed moderate spatial dependency (0.31),

reflecting the effect of the dominant local conditions in explaining its spatial dependence. This was similar to the findings of Kilic et al. [3] and Saleh [13] who also reported moderate spatial dependency for sand content. Kilic et al. [3] showed that continuous cultivation tends to reduce spatial autocorrelation of soil properties such as sand, silt and clay content when comparing native grassland to 20-year cultivated land.

Spatial Distribution Maps. The interpolation of spatial distribution maps using ordinary Kriging for the soil properties are presented in Figure 3 (a-f). Raster values were grouped into five classes using natural breaks for all soil properties. The map of sand content reveals a gradient from higher values in the north to lower values in the south, while the inverse gradient is observed for clay content map. Comparing the map of clay and CEC, it is evident that areas with higher clay contents also had higher CEC values as a result of the relationship between these properties. Map of pH distribution showed a similar trend of lower values in the north, which progressively increased towards the south. Lower pH values were recorded around northern areas with higher sand content, due to effect of leaching of exchangeable cations from the sandy soils. Organic carbon content is highly variable across the study area, with notably higher values in the center corner, likely due to the presence of fallow lands towards this area. The lack of nugget effect and a range of 124.80 m indicate strong spatial dependence and little measurement error.

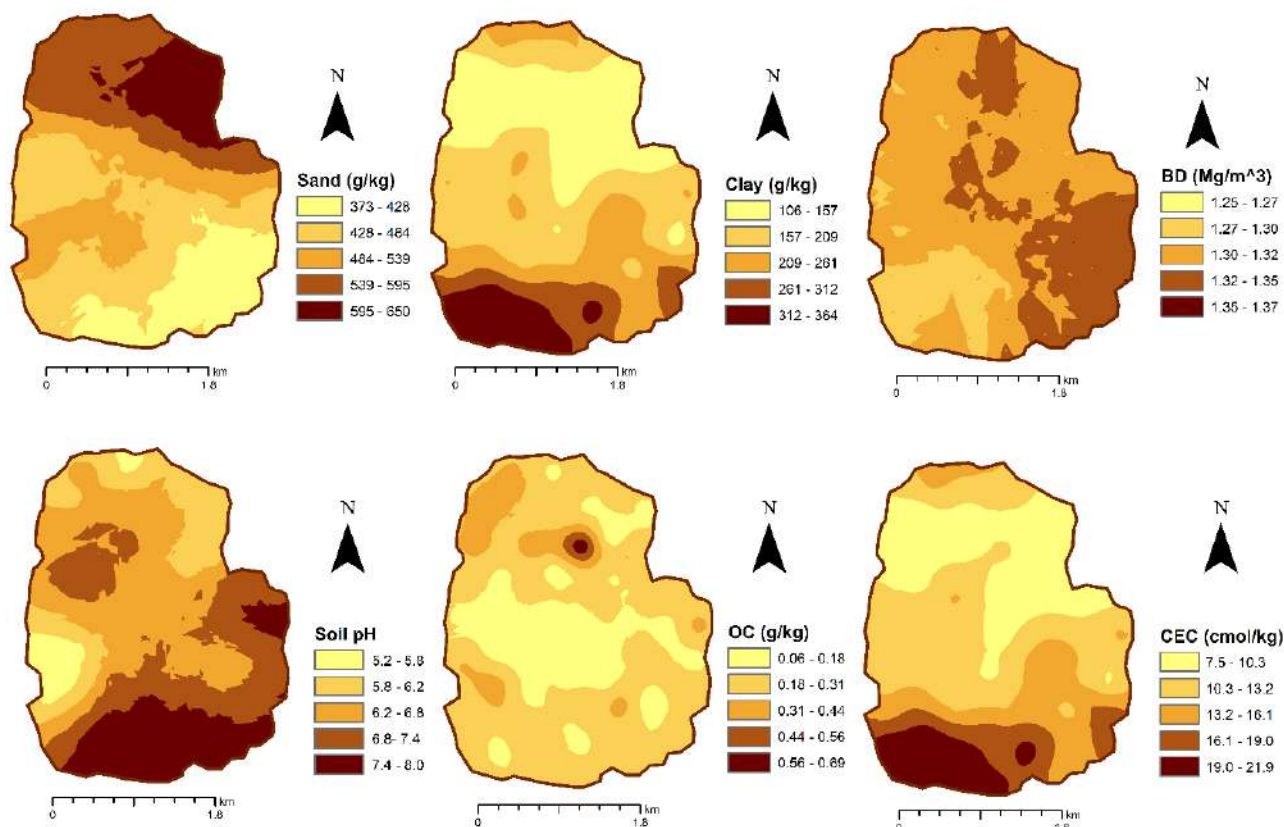


Fig. 3 (a-f). Spatial distribution of sand, clay, BD, pH, OM and CEC in the study area

Conclusion. The spatial distribution maps reveal distinct patterns for each soil property, influenced by a combination of geological, climatic, topographical and land use factors. Clay and CEC show the strongest spatial dependence over larger distances, while organic matter and pH content exhibits the weakest dependence over a very short distance. Land management practices should focus on impro-

ving soil properties with weak spatial dependence, like organic matter, as they are more susceptible to short-term changes. This can be achieved through planting of cover crops and residue incorporation. Heterogeneity of these soil properties should be considered for implementing successful site specific management, especially in selecting appropriate tillage practices.

References

1. Buol S.W., Hole F.D., McCracken R.J. and Southard R.J. (1997). *Soil Genesis and Classification*. Iowa State University Press, Ames, Fourth Edition, 527. ISBN-13: 978-0-8138-0769-0
2. Cambardella C.A., Karlen D.L. (1999). Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, 1: 5-14. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009925919134>
3. Kilic K., Kilic, S., Kocyigit, R. (2012). Assessment of spatial variability of soil properties in areas under different land use. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 18(5): 722-732.
4. Sigua G.C., Hudnall W.H. (2008). Kriging analysis of soil properties – implication to landscape management and productivity improvement. *Journal of Soils Sediments* 8: 193–202.
5. Awwal Y.A., Maniyunda L. M., Sadiq F. K. (2022). Distribution and Characteristics of Soils along a Toposequence in Northern Guinea Savanna of Nigeria. *Nigerian Journal of Soil & Environmental Research*. 21: 110–121.
6. Masood T.K., Salim, S.B. (2022). Spatial variability of hydro-related physical properties of Al-Rasheed loam. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences* 53(1): 164-172.
7. Ettema C.H., Wardle D.A. (2002). Spatial soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 17(4): 177-183. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(02\)02496-5](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(02)02496-5)
8. Saldana A., Stein A. Zinck J.A. (1998). Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain). *Catena*, 33: 139-153. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00090-3)
9. Zebarth B.J., Rees H., Walsh J., Chow L., Pennock D.J. (2002). Soil variation within hummocky podzolic landscape under intensive potato production. *Geoderma*, 110: 19-33. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00213-6)
10. Lark R.M. (2002). Optimized spatial sampling of soil for estimation of the variogram by maximum likelihood. *Geoderma*, 105: 49-80. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00092-1)
11. Dercon G., Deckers J., Govers G., Poesen J., Sanchez H., Vanegas R., Ramirez M., Loaiza G. (2003). Spatial variability in soil properties on slow-forming terraces in the Andes region of Ecuador. *Soil & Tillage Research*, 72: 31-41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00049-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00049-7)
12. Gülser C., Ekberli I., Candemir F., Demir Z. (2016). Spatial variability of soil physical properties in a cultivated field. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2016, 5(3): 192–200. DOI: <https://doi.org/10.18393/ejss.2016.3.192-200>
13. Saleh A.M. (2018). Spatial variability mapping of some soil properties in Jadwal Al Amir Project / Babil / Iraq. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/325288183>
14. Yakub W., Saddiq A.M., Solomon R.I., Bawa D.B., Abdullahi M. (2022). Spatial variability of soil organic carbon, total nitrogen and soil pH in soils of Wukari Local Government area Taraba state, Nigeria. *Asian Journal of Agriculture and Allied Sciences*. 5(1): 1-11. DOI: <https://doi.org/10.56557/ajaas/2022/v5i126>
15. Utset A., Lopez T., Diaz M. (2000). A comparison of soil maps, Kriging and a combined methods for spatial prediction of bulk density and field capacity of ferrosols in the Havana matanzas plain. *Geoderma*; 96: 199-213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00055-5)
16. Castrignanò A., Maiorana M., Fornaro F. (2003). Using regionalised variables to assess field-scale spatiotemporal variability of soil impedance for different tillage management. *Biosystems Engineering* 85 (3): 381–392. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00070-9](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00070-9)
17. Zhao Y., Xu X., Darilek J.L., Huang B., Sun W., Shi X. (2009). Spatial variability assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, a case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China. *Environmental Geology* 57(5): 1089–1102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1399-5>
18. Zhao C., Dong S., Liu S., Sylvie I., Li J., Liu Q., Wang C. (2015). Spatial distribution and environmental risk of major elements in surface sediments associated Manwan Dam in Lancang River, China. *Eurasian Journal of Soil Science* 4(1): 22–29. DOI: <https://doi.org/10.18393/ejss.37849>
19. Guo-Shun L., Xin-Zhong W., Zheng-Yang Z., Chun-Hua Z. (2008). Spatial variability of soil properties in a tobacco field of central China. *Soil Science*. 173(9): 659-667. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2931-3>
20. Gotway C.A., Ferguson R.B., Hergert G.W., Peterson T.A. (1996). Comparison of Kriging and Inverse-Distance Methods for Mapping Soil Parameters. *Soil Science Society America Journal* 60: 1237-1247. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040040x>
21. Ardahanlioglu I., Oztas T., Evren S., Yilmaz T., Yildirim, Z.N. (2003). Spatial variability of exchangeable sodium, electrical conductivity, soil pH and boron content in salt and sodium-affected areas of the Igdir plain (Turkey). *Journal of Arid Environment* 54: 495-503. DOI: <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1073>
22. Kravchenko A., Bullock D.G. (1999). A Comparative Study of Interpolation Methods for Mapping Soil Properties. *Agronomy Journal*. 91: 393-400. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1999.00021962009100030007x>

23. Han S., Schneider S.M., Evans R.G. (2003). Evaluating cokriging for improving soil nutrient sampling efficiency. *American Society of Agricultural Engineers*, 46(3): 845-849. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.13579>
24. Paz A., Taboada M.T., Gomez M.J. (1996). Spatial variability in topsoil micronutrients in a one-hectare cropland plot. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27(3/4): 479-503. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103629609369570>
25. Aminu Z., Jaiyeoba I. A. (2015). An Assessment of Soil Degradation in Zaria Area, Kaduna State, Nigeria. *Ife Research Publications in Geography* 13, 26–36
26. Awwal Y.A. (2021). Influence of toposequence on soil properties, genesis, suitability and degradation at Hayin Gada, Zaria Nigeria. MSc. Thesis. Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria. 93.
27. Maniyunda L.M. (2012). Pedogenesis of a Lithosequence in the Northern Guinea Savanna of Kaduna State, Nigeria. Ph.D Thesis. Ahmadu Bello University Zaria, Nigeria.
28. Jimoh I.A., Mbaya L.A., Akande D., Agaku T., Haruna S. (2020). Impact of toposequence on soil properties and classification. *International Journal of Environment Quality*, 38(4): 48-58. DOI: <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/10043>
29. Aminu Z. (2014). Assessment of soil degradation in Zaria area, Kaduna state, Nigeria. Ph.D Dissertation. Department of Geography, ABU Zaria. 49.
30. Oliver M.A., Webster R. (2015). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. SpringerBriefs in Agriculture. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15865-5>
31. Oliver M.A. (2010). *Geostatistical applications for precision agriculture*. Dordrecht: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>
32. Castrignanò A., Maiorana M., Fornaro F., Lopez N. (2002). 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a drum wheat field in southern Italy. *Soil and Tillage Research* 65(1): 95-108. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00288-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00288-4)
33. Burrough P.A. (1993). Fractals and Geostatistical methods in landscape studies. In: *Fractals in geography* Lam, N., de Cola, L., (Eds.). Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 87-112. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00418-10.x>
34. Yamusa A.M., and Abdulkadir A. (2020). Changing pattern of rainfall amount and rain day in Samaru and their implication on crop production. *World Journal of Agricultural Research*, 8(3): 131–141. DOI: <https://doi.org/10.12691/wjar-8-4-5>
35. Jaiyeoba I.A. (1995). Changes in soil properties related to different land uses in part of the Nigerian semi-arid Savannah. *Soil Use and Management*, 11: 84-89. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1995.tb00501.x>
36. National Bureau of Statistics, NBS (2009). Geological Survey of Nigeria. National Bureau of Statistics and Landuse Planning Publication.
37. Esri (2016). ArcGIS Desktop: Release 10.5 Software. Environmental Systems Research Institute, Inc.
38. Gee G.W., Or D. (2002). Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. SSSA, Inc., Madison, WI, 255-294. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
39. Nelson D.W., Sommers L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd ed. Agronomy. 9: 539-579.
40. Uyovbisere E.O., Ogunwole J.O., Ogunwole, J.O., Odigie, V.O., Abdu, N. (2013). Laboratory manual of routine soil, water, plant and fertilizer analyses. A compilation of the Depeartment of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 4.
41. Rhoades J.D. (1982). Cation exchange capacity. In Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agron 9. Madison WI. PP 149-157*. ISBN: 0-89118-072-9
42. R Core Team (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
43. George F., Ramachandran K.M. (2011). Estimation of Parameters of Johnson's System of Distributions. *Journal of Modern Applied Statistical Methods*: 10: Article 9. DOI: <https://doi.org/10.22237/jmasm/1320120480>
44. Yuan Y., Yang K., Cheng L., Bai Y., Wang Y., Hou Y., Ding A. (2022). Effect of Normalization Methods on Accuracy of Estimating Low- and High-Molecular Weight PAHs Distribution in the Soils of a Coking Plant. *International Journal of Environmental Research in Public Health*. 19, 15470. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192315470>
45. Bahri A., Berndtsson R., Jinno K. (1993). Spatial dependence of geochemical elements in a semiarid agricultural field: I. Scale properties. *Soil Science Society of American Journal*. 57(5): 1316-1322. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700050026x>
46. Trangmar B. B., Yost R. S., Uehara G. (1985). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agronomy*, 38: 45-94. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)
47. Mzuku M., Khosla R., Reich R., Inman D., Smith F., MacDonald L. (2005). Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. *Soil Science Society America Journal*. 69: 1572–1579. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0062>
48. Yan P., Peng H., Yan L., Lin K. (2019). Spatial Variability of Soil Physical Properties Based on GIS and Geo-Statistical Methods in the Red Beds of the Nanxiong Basin, China. *Poland Journal of Environmental Studies*. 28, 2961-2972. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/92245>

49. Odunze A.C. (2006). Soil properties and management strategies for some sub humid savanna zone Alfisols in Kaduna State, Nigeria. *Samaru Journal of Agricultural Resource*. 22: 3-14.
50. Jimoh I.A. (2021). Land use/cover effects on soil development, quality, properties, and carbon sequestration in Afaka Forest Reserve, Kaduna state, Nigeria. PhD. Research, Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria.
51. Weil R.R., and Brady N.C. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. 15th Edition. Pearson Education Publisher. ISBN: 978-0133254488.
52. Yaro D.T. (2005). The position of plinthite in a landscape and its effects on soil properties. Ph.D Thesis. Ahmadu Bello University, Zaria. Nigeria. 225.
53. Law-Ogbomo K.E., Nwachokor M.A. (2010). Variability in selected soil physicochemical properties of five soils formed on different parent materials in Southeastern Nigeria. *Research Journal of Agriculture and Biological Science*. 6(1): 14-19.
54. McBratney A.B., Pringle M.J. (1999). Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture* 1: 125–152. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1009995404447>
55. Cerri C.E.P., Bernoux M., Chaplot V., Volkoff B., Victoria R.L., Melillo J.M., Paustian K., Cerri C.C. (2004). Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma*, 123: 51-68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.027>
56. Aşkın T., Kızılkaya R. (2006). Assessing spatial variability of soil enzyme activities in pasture topsoils using geostatistics. *European Journal of Soil Biology*. 42(4): 230–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eisobi.2006.02.002>
57. Tabi F.O., Ogunkunle A.O. (2007). Spatial variation of some soil physicochemical properties of an alfisol in South-western Nigeria. *Nigerian Journal of Soil and Environmental Research*, 7: 82-91. DOI: <https://doi.org/10.4314/njserv7i1.28421>
58. Ersahin S., Brohi A.R. (2006). Spatial variation of soil water content in topsoil and subsoil of a Typic Ustifluvent. *Agriculture and Water Management*. 83(1): 79-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.09.002>
59. Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F., Konopka A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society America Journal*. 58(5): 1501–1511. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
60. Bo S., Shenglu Z., Qiguo Z. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma* 115(1-2): 85-99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00078-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00078-8)
61. Zheng H., Wu J., Zhang S. (2009). Study on the spatial variability of farmland soil nutrient based on the kriging interpolation. AICI, International conference on artificial intelligence and computational intelligence, November 7-8, Shanghai, China, (4), 550-555. DOI: <https://doi.org/10.1109/AICI.2009.137>
62. Aliyu J. (2023). Evaluation of the impact of continuous cultivation on soil development and quality at the Institute for Agricultural Research Farm, Samaru, Nigeria. PhD Thesis. Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria. 92.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Просторова мінливість деяких властивостей ґрунту навколо району Зарія, Штат Кадуна, Нігерія

Ясін Агоно Аввал ¹

викладач, науковий співробітник,

¹ Федеральний університет Вукарі, штат Тараба, Нігерія;

Рукая Мухаммад Фатіху ²

магістр, ² Університет Ахмаду Белло, штат Кадуна, Нігерія

Просторова мінливість властивостей ґрунту під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів відіграє ключову роль у продуктивності сільського господарства. Розуміння цієї мінливості має вирішальне значення для впровадження індивідуального управління, яке оптимізує розподіл ресурсів, одночасно зберігаючи здоров'я ґрунту. У цьому дослідженні вивчається просторова мінливість вибраних властивостей ґрунту на сільськогосподарських полях навколо Зарії, штат Кадуна, Нігерія, використовуючи геостатистичні методи, щоб надати пояснення для сталого управління земельними ресурсами. Дослідження проводилося на території площею 85 гектарів, розташованій у місті Зарія, штат Кадуна. Сімдесят зразків ґрунту було зібрано за допомогою відбору проб на 85 гектарах. Дотримуючись стандартних лабораторних процедур, зразки були проаналізовані на властивості, включаючи розподіл частинок за розміром, об'ємну щільність (BD), рН, органічний вуглець (OC) і ємність катіонного обміну (CEC). Для визначення просторової залежності використовувався геостатистичний аналіз з використанням інтерполяції Крігінга та моделювання варіограми. Моделювання варіограми виявило сильну просторову залежність для більшості властивостей ґрунту (відношення самородків < 0,25), включаючи BD, OC і рН, що

свідчить про внутрішні фактори, як ключові чинники. Просторові діапазони змінювалися залежно від властивостей, при цьому глина та СЕС досягали 339,9 м та 347,6 м відповідно, тоді як рН та BD показали коротші діапазони 85,4 м та 93,3 м. Просторові структури в піску та глині продемонстрували зворотні зв'язки, оскільки області з вищим вмістом глини демонстрували вищі рівні СЕС та рН. Інтерполяція Крігінга виявила чіткі просторові закономірності, такі як вищі концентрації глини та СЕС у певних зонах та нижчий рН у піщаних областях, що вказує на вплив вилугування. Карти показали, що на просторовий розподіл ОС і BD впливають короткочасні процеси, які вимагають локалізованих стратегій управління. Це дослідження демонструє необхідність звернення до просторової мінливості в планах управління ґрунтами. Сильні кореляції між глиною та СЕС підкреслюють критичну роль текстури у впливі на родючість ґрунту. Такі властивості, як ОС і BD, зі слабкою просторовою залежністю, вимагають негайної уваги за допомогою цілеспрямованих втручань, таких як органічні поправки та вдосконалені методи обробітку ґрунту.

Ключові слова: Крігінг, семіваріограма, просторова мінливість, властивості ґрунту.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Надійшла 18 вересня 2024 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 18 листопада 2024 р.

Формування біоценозів у придорожніх ландшафтах Черкаської області

Ірина Кравцова¹

к. геогр. н., доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності

¹ Уманського національного університету садівництва, Умань, Україна,
e-mail: irinakravzova@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-3431-473X>;

Сергій Сонько¹

д. геогр. н., професор кафедри екології та безпеки життєдіяльності,

e-mail: sp.sonko@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-7080-9564>;

Ольга Василенко¹

к. с.-г. н., доцент, завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності,

e-mail: vsolga05@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-2584-810X>;

Ігор Гурський¹

к. с.-г. н., доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності

e-mail: gurskiyvet@gmail.com,  <http://orcid.org/0000-0002-3822-3889>;

Станіслав Огілько¹

д. філософії (Науки про Землю), викладач кафедри екології та безпеки життєдіяльності,

e-mail: zrivola153@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0001-5133-8314>

У статті розглядається нагальна проблема, викликана зростанням щільності транспортних мереж, що призводить до постійної втрати природних середовищ існування для аборигенних представників рослинного та тваринного світу. Крім того, інтродукція немісцевих видів рослин, які витісняють аборигенну флору, має здатність формувати незалежні біоценози, демонструючи дивовижну здатність біосфери підтримувати життя. Дослідження зосереджено на основних параметрах придорожніх ландшафтів Черкаської області на основі попередньо розробленої програми. Ці параметри згруповано за трьома основними чинниками. Природно-географічні чинники, які включають геолокацію, параметри температури та вологості повітря, рівень природної радіації. Антропогенний вплив – вивчення рівнів шуму, запиленості, специфічних геохімічних показників, наближеності доріг до сільськогосподарських угідь. Індикатори зв'язку екосистем, а саме: різноманітність та повторюваність видів рослин; наявність інвазивних видів; рослини-індикатори засолення та заболочування; види, занесені до національного каталогу середовищ існування України, та індекс видового різноманіття Менхінка. Використовуючи методи пелюсткових діаграм та аналізу якісного фону, у межах Черкаської області виокремлено та обґрунтовано п'ять зон із різним рівнем формування екосистем. Дві основні зони (Уманська (помірного розвитку) та Черкаська (слабкого розвитку), характеризуються домінуючою рудеральною рослинністю. Три периферійні зони з показниками поширення рудеральної рослинності нижче середньої: Північна (Жашківська, початковий етап), Південна (Ладизинська, початковий етап) і Центральна (Звенигородсько-Шполянська, початковий етап). Зонування було зосереджено на ділянках доріг, які межують із сільськогосподарськими угіддями. Завдяки переважанню трав'янистих рослин у структурі рудеральних фітоценозів, ці території мають потенціал для майбутнього ґрунтоутворення та поступового покращення шляхом заміни рудеральних видів місцевою рослинністю.

Ключові слова: придорожні ландшафти, біоценози, Черкаська область, регіональне зонування, раціональне природокористування.

Як цитувати: Кравцова Ірина. Формування біоценозів у придорожніх ландшафтах Черкаської області / Ірина Кравцова, Сергій Сонько, Ольга Василенко, Ігор Гурський, Станіслав Огілько // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 313-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25>

In cites: Kravtsova Iryna, Sonko Sergiy, Vasylenko Olga, Gursky Ihor, Ogilko Stanislav (2024). Formation of biocenoses in roadside landscapes of Cherkasy Region. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 313-328. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-25> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Формування та функціонування антропогенних ландшафтів різних груп, класів і антропогенних типів є тим екзогенним чинником, який істотно, а в деяких випадках – кардинально, перебудовує як вертикальний профіль, так і горизонтальну структуру ландшафтних комплексів різних рівнів організації та ступеня складності. Парадоксально, але це є доведеним фактом, що в результаті господарської діяльності людини першими трансформуються і зазнають деструктивної дії ті компоненти ландшафтних

систем, які є фоновими ознаками і завершують формування повної вертикальної структури ландшафту. Це «дзеркало» ландшафтного комплексу, яке пише сучасну геологічну історію. Як зазначав В.І. Вернадський, їхнє збереження – основа для формування ноосфери. «Життя» – особлива властивість цього компоненту ландшафту. Він настільки тендітний, але й, водночас, настільки сильний і важливий, що забезпечує постійне переміщення речовини та енергії між різними компонентами та елементами ландшафтів як локального,

© Кравцова Ірина, Сонько Сергій, Василенко Ольга, Гурський Ігор, Огілько Станіслав, 2024

так і глобального рівнів організації. Біокомпонент – це компонент, що складається із речовини живої та неживої природи і визначає складну систему зворотних зв'язків, які здатні підтримувати її у стані динамічної рівноваги. Сформований такими складовими, за якими вчені читають геологічну історію розвитку території, шукають шляхи розв'язання сучасних проблем людства і не перестають дивуватися тим унікальним можливостям, які вони демонструють.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наукова проблематика дорожніх ландшафтів розкрита у наукових працях вінницької школи антропогенного ландшафтознавства. У наукових роботах розроблено теоретико-методологічні засади вивчення дорожніх ландшафтів; на прикладі території Поділля обґрунтовано етапи формування; досліджено структура, регіональні типи, геохімічні й екологічні особливості; розроблена типологічна та регіональна класифікації; окреслено основні проблеми дорожнього природокористування [1]. Українські географи-ландшафтознавці розуміють їх як каркасні ландшафти [2, 3, 4]; досліджують рух геохімічних елементів у їх горизонтальній структурі [5]; вказують на історико-географічні особливості «старих доріг» [6]; їхній вплив на формування антропогенного рельєфу [7].

Як зазначає В.П. Коржик, дорожні ландшафти – це різнорангові геокомплекси, основними компонентами та елементами яких є власне дорожнє покриття, узбіччя, насипи, зелені насадження. Для них специфічним є тваринний світ. Відмітною особливістю функціонального стану дорожнього ландшафту є формування особливого мікроклімату, що обумовлено, на нашу думку, формуванням антропогенної поверхні, яка створює своєрідну теплову смугу (особливо у теплий період року).

Також українські географи звертають увагу на прояви просторових відмін доступності автомобільних доріг у межах окремих адміністративно-територіальних областей України, виконують топологічний аналіз за показниками абсолютного індексу доступності, числа Кеніга, індексів Бавелаша, Бошана та показниками зв'язаності мережі [8]. Зумовленості розвитку туристичної галузі за рівнем транспортної доступності [9].

Аналіз наукових праць зарубіжних географів вказує на те, що науковці розкривають проблематику трансформацій, які відбулися в структурі сільських доріг, що обумовлена сучасними формами ведення сільського господарства. Порушують проблему зниження екологічної стабільності дорожнього ландшафту [10]; гармонізації дорожніх систем як просторового інструменту досягнення екологічного та соціального прогресу [11]; взаємозв'язку просторових структур мережі сіль-

ських доріг і морфологічних факторів рельєфу для формування регіональної мережі сільських дорожніх ландшафтів [12]; впливу дорожніх ландшафтів в структурі лісових масивів на середовище існування тварин [13]; досліджують просторову варіацію у взаємообумовленості та залежності мережі доріг та вмістом накопиченого вуглецю в біомасі [14]; впливу дорожніх ландшафтів Tahoe National Forest (TNF, California, USA) на навколишнє середовище [15]; визначення гарячих точок загибелі тварин на дорогах і тих факторів, що впливають на смертність [16]; вплив дорожніх ландшафтів і річкових на просторовий розподіл зв'язаності наносів [17]; методологічним основам вивчення доріг, побудованими цивільними та військовими інженерами як культурного історичного артефакту та спадщини, їхньої адаптації до автомобілів нових поколінь [18]; вплив дорожнього руху на цілісність екосистем і роботу, яку виконують зелені зони з поглинання карбону [19].

Тому дослідження еколого-географічних особливостей формування біоценозів у вертикальній структурі придорожніх ландшафтів є актуальною науковою проблемою.

Мета статті: дослідити формування біоценозів у вертикальній структурі придорожніх ландшафтів Черкаської області.

Матеріали та методи дослідження. Антропогенні ландшафти є просторовими елементами антропосфери, яка закономірно формує структуру сучасної ландшафтно-оболонки Землі. Існування антропосфери, створеної зусиллями людини з перетворення природного середовища, підкреслює «унікальну» роль нашого виду в еволюції біосфери в ноосферу.

З огляду на цю перспективу, усі класифікації та типології ландшафтів, екосистем, геосистем і людської діяльності повинні враховувати критичний критерій: підтримують вони або порушують здатність біосфери до самовідновлення. Цей загальний критерій застосовується до екосистем на різних видових і просторових рівнях.

Отже, основний теоретичний підхід до ідентифікації антропогенних ландшафтів, у тому числі лінійних, у цьому дослідженні ґрунтується на пріоритетах динаміки екосистем. Цей підхід наголошує на підтримці або збільшенні здатності екосистем підтримувати свої природні процеси та функції з часом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Оцінка впливу доріг на біорізноманіття є пріоритетом у найбільш автомобілізованій країні світу – США. Щороку по масштабній мережі американських доріг протяжністю 6,2 мільйона кілометрів проїжджає понад 200 мільйонів автотранспортних засобів. Враховуючи, що дороги впливають на навколишнє середовище далеко за межами асфальто-

ваних зон, оцінки показують, що близько 20% території США підпадають під їхній вплив [21].

У минулому дорожні ландшафти прокладалися відповідно до природних контурів території, часто тягнулись паралельно до напрямку річок і струмків. Однак післявоєнне планування змінило цей підхід: дороги стали більш прямими та симетричними, щоб забезпечити ефективне сполучення між населеними пунктами та важливими об'єктами. Через це сучасні дорожні ландшафти, представлені дорогами різних типів і магістралями, не тільки перерізають ландшафти за неприродними напрямками, але й порушують функціонуючі екосистеми та впливають на місцеві середовища існування різних живих організмів. Такі природні потоки речовини та енергії у сучасних екосистемах, як міграція дикої природи, рух підземних і поверхневих вод, а також прояви вітрової ерозії, можуть бути змінені або заблоковані.

Дорожні ландшафти виконують п'ять ключових екологічних ролей, які впливають на складові природного середовища:

1. *Дорожні ландшафти – це середовище проживання.* Дорожні коридори можуть підтримувати популяції рослин і тварин, іноді навіть виконуючи роль важливих для збереження видів.
2. *Дорожні ландшафти – це джерело енергії та ресурсів.* Якщо популяції дикої природи процвітають у межах дорожніх коридорів більше, ніж у навколишніх середовищах, ці дороги стають джерелами життєвих ресурсів.
3. *Дорожні ландшафти як поглинач речовини та енергії.* Дороги, на яких смертність серед тварин значно вища, ніж у сусідніх зонах, виступають як поглиначі для місцевих популяцій.
4. *Дорожні ландшафти як антропогенний бар'єр.* Коли дороги заважають міграції чи переміщенню між середовищами існування, вони стають бар'єрами, обмежуючи обмін особинами й генами між популяціями.
5. *Дорожні ландшафти як канали.* Дороги також можуть виконувати функцію коридорів, уздовж яких деякі види рослин і тварин мігрують, з'єднуючи ізольовані популяції та забезпечуючи транспортну мережу для дикої природи.

Таким чином, в залежності від особливостей дороги та інтенсивності трафіку, ці функції можуть мати значний екологічний вплив (рис. 1).

Екологічні дослідження доріг часто концентруються на їхньому негативному впливі, що ускладнює повну оцінку їхніх екологічних функцій. Дороги мають специфічні риси: вони є вузькими і безперервними смугами з високою частотою країв, які формують унікальні екосистеми,

відмінні від прилеглих територій. Ці характеристики мають схожість із природними потоками або інфраструктурою, наприклад річищно-заплавними ландшафтами або залізницями чи каналами, але крайові впливи доріг є більш значними через їхню щільність, непроникність, наявність вуличного освітлення, шум, забруднення та перешкоди від транспорту.

Загалом, екологічний вплив узбіччя доріг часто є постійним і багатоаспектним. Загалом, його ефекти на середовище проживання та біорізноманіття можуть бути недооцінені з ряду причин:

- Кумулятивні наслідки, наприклад, накопичення забруднень від транспорту та хімічних речовин для обслуговування (гербіцидів).
- Наростання впливу через створення нових доріг і відсутність видалення старих, що сприяє втраті цілісності екосистем і фрагментації.
- Деякі негативні ефекти проявляються з часом, такі як фрагментація середовищ існування, яка перешкоджає відновленню популяцій видів, або збільшення бур'янів уздовж коридорів, які з часом поширюються на прилеглі території.

Черкаська область – модельна територія дослідження, яка географічно розташована в межах природного екотону [23]. Адміністративно-територіальна структура в центральній частині України. Її природні умови й ресурси обумовлені географічним розміщенням у межах Дністерсько-Дніпровського та Лівобережно-Дніпровського лісостепових країв Лісостепової зони Східно-Європейської рівнинної ландшафтної країни [24]. Геологічні та геоморфологічні особливості регіону визначають поширення та специфічний вигляд антропогенних ландшафтів, які формують сучасну ландшафтну структуру.

Натуральну ландшафтну структуру формують:

- лесові височини з антропогенним покривом на докембрійських і палеозойських породах, покриті палеоген-неогеновими відкладами та розчленовані ярами і балками, мають опідзолені ґрунти і дубово-грабові ліси;
- сильно розчленовані ярами височини з чорноземами типового малогумусного та опідзоленого типу;
- височини з середньогумусними чорноземами, вкриті дубовими дібровами;
- еродовані лесові височини на юрсько-крейдових породах із зсувами та темно-сірими ґрунтами;
- лесові низовини з луговими та болотними ґрунтами, а також піщані тераси з бореальними та суббореальними ґрунтами.

Такий ландшафтний склад сприяє формуванню різноманітних екосистем із властивими їм

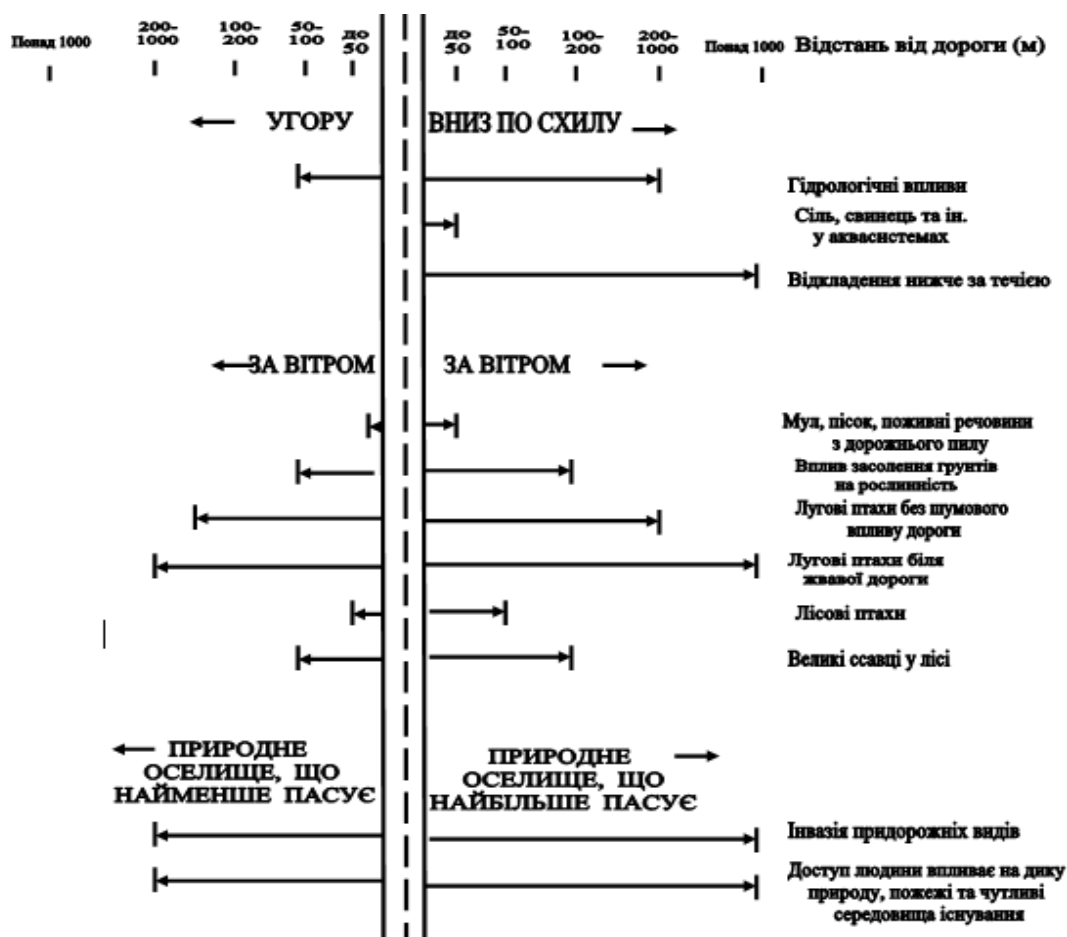


Рис. 1. Зона впливу дороги, визначена екологічними впливами, що поширюються на різні відстані від дороги [22] /

Fig. 1. Road impact zone defined by environmental impacts extending at different distances from the road [22]

біоценозами та забезпечує основу для подальших досліджень територіального планування та екологічного управління в області.

Відповідно до сучасної міжнародної класифікації місць існування, дороги поділяються на такі категорії:

І4 Транспортні мережі та інші побудовані ділянки з твердим покриттям:

І4.2 Дорожні мережі, включаючи місця для паркування транспортних засобів. Ґрунтові дороги відносять до категорії витоптаних ділянок (Н5.6) [25].

Відповідно до Національного каталогу біотопів України [26] вздовж доріг розвиваються біотопи:

С1.1: С1.1.1: 1.1.2 із такими екологічними характеристиками. Ці ранні рослинні угруповання виникають уздовж доріг, на краях полів і в урбанізованих районах. Вони зазвичай утворюються невеликими ділянками або смугами на механічно пошкоджених, злегка нітрифікованих ґрунтах, таких як піщані, суглинні або гравійні субстрати. Ці спільноти стабілізують порушені ґрунти та беруть участь у біогеохімічних циклах, відзначаючи початкові етапи екологічної сукцесії.

С1.2.2: І:2.22 – сформовані переважно з представників родин *Brassicaceae* або *Asteraceae*, ці біотопи зустрічаються поблизу населених пунктів, узбіччя доріг і порушених територій, таких як звалища чи водойми. Вони розвиваються на багатих поживними речовинами, вологих або сухих ґрунтах і відіграють значну роль у відновленні екосистем, стабілізуючи субстрати та сприяючи екологічній спадкоємності. За вертикальною структурою – однорусні. У видовому складі багато археофітів.

С1.2.2: І:2.22 – рудеральні рослинні угруповання, що складаються переважно з високорослих видів, зазвичай зустрічаються на територіях поблизу населених пунктів, узбіччя доріг, звалищ, сміттєзвалищ та порушених зон навколо водойм або вздовж стін і огорож в умовах часткового затінення. Ці спільноти створюються на відкритих або злегка затінених, добре дренованих субстратах, включаючи вологі або сухі ґрунти, багаті поживними речовинами та високо нітрифіковані.

Рудеральні фітоценози, що виникають в урбанізованих і техногенних середовищах, можуть слугувати екологічними нішами для численних видів фауни і суттєво сприяти відновленню еко-

систем. В умовах екстенсивної експлуатації на- вколишнього середовища та широкомасштабних перетворень природних ландшафтів корінні рослини угруповання зазнають глибоких змін, перетворюючись на рудеральні фітоценози. Ці нові спільноти пристосовані до зростаючого антропо- генного тиску та стійкі до постійних руйнівних чинників.

Незважаючи на своє походження, ці групи рослин відіграють важливу функціональну та екологічну роль в екосистемах. З'являючись у структурі порушених людиною середовищ існу- вання, вони стабілізують зруйновані субстрати, беруть участь у біогеохімічних циклах, ініціюють процеси сукцесії під час екологічного віднов- лення та сприяють відновленню природної рос- линності після повної деградації. Крім того, ці ро- слини поглинають промислові забруднювачі та накопичують важкі метали та інші шкідливі спо- луки, функціонуючи як невід'ємні компоненти «природних систем», які допомагають очищати повітря та ґрунт.

Як зазначено [27, 28], водночас, рудеральні угруповання виступають як первинні центри по- ширення чужорідних видів, особливо тих, що ма- ють високий інвазійний потенціал, і видів-транс- формерів, які становлять значну загрозу для біо- різноманіття природних екосистем. Ці види мо- жуть змінювати екосистеми, витісняючи місцеву флору та фауну, що призводить до зменшення біо- різноманіття та порушення екологічної рівноваги.

У межах території дослідження було обрано 19 натурних ділянок: 11 – вздовж меридіональ- ного напрямку простягання дорожніх ландшафтів (м. Жашків – м. Умань) та 8 – широтного на- прямку (с. Сичівка, Уманський район – м. Умань – м. Черкаси).

Для демонстрації авторського методу органі- зації первинних експедиційних даних нижче ми наводимо таблиці (1 та 2) разом з фото загального плану (рис. 2,3), та аналіз однієї ділянки з кожного з двох маршрутів. Суцільне подання даних за- йняло б не одну сторінку, тим більше, що воно ви- кладене в попередніх авторських публікаціях [29]. Однак, задля необхідності порівняння даних, отриманих нами з різних ділянок ці дані було зве- дено у таблицю 3.

Спостереження на першому полігоні ми про- водили між 9 та 10 годинами ранку. Температура придорожного шару атмосфери складала 24,9°C, вологість 65,0%, радіаційний фон 0,14 msv/h. Зна- чення географічних координат: 48°45'12,131" N; 30°15'29,042"E. Перший полігон локалізований в міських кордонах Умані у точці перетині головної автомагістралі і другорядної дороги поблизу авто- ринку. На цій ділянці (згідно правил ПДР) можна розвивати швидкість легкових автомобілів до 110

км/год, вантажних до 80 км/год. Попри локацію першого полігону в міських межах, фіторізно- маніття досліджуваного полігону, який прилягає до автозаправної станції можна вважати значним.

При дослідженні ділянки, що прилягає до ав- тозаправної станції нами було ідентифіковано по- над 45 представників флори. Найбільша повторю- ваність була у таких видів: *Grindelia squarrosa* (Pursh) Dunal.(i)(3), *Acer negundo* L.(i)(3), *Rumex confertus* Willd.(3), *Onopordum acanthium* L.(3), *Daucus carota* L. (3), *Acer negundo* L.(i)(3), *Cirsium arvense* (L.) Scop.(5), *Artemisia vulgaris* L.(6), *Erigeron annuus* (L.) Pers.(i)(7). Визначним фактом є той, що на цьому полігоні представлена максима- льна (серед інших полігонів) кількість представ- ників інвазійної флори, зокрема, *Erigeron annuus* (L.) Pers.(7).

Найскоріше доволі високу повторюваність інвазійної флори на цьому полігоні можна пояс- нити специфікою розповсюдження генетичного матеріалу цих рослин. Зокрема, насіння інвазій- ної рослини зачепившись за вантажний автотран- спорт (в т.ч. і з вітром) при гальмуванні відчепля- ється, а надалі тим же вітром «транспортується» на прилеглі до автошляхів ділянки, де відбува- ється його подальше проростання. Наразі, пер- ший полігон є складною транспортною розв'яз- кою, повз яку щоразу проїжджає значний ванта- жопотік і вантажівки (згідно ПДР) гальмують, щоб пропустити транспортні засоби на головній дорозі.

Присутність же таких галофітів як *Artemisia vulgaris* L. та *Rumex confertus* Willd і які є індика- торними щодо засолення ґрунтів, констатує пе- вну активність дорожніх служб взимку, які розси- панням NaCl запобігають наслідкам ожеледиці.

Порівнюючі наявний склад флори у придо- рожніх смугах з [26] (Каталог...) ми констату- вали наступні випадки збігання видового складу рослин: *Arctium lappa* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., *Artemisia vulgaris* L., *Ambrosia artemisiifo- lia* L., *Carduus acanthoides* L., *Carduus crispus* L., *Conium maculatum* L., *Echium vulgare* L., *Onopor- dum acanthium* L., *Poa compressa* L., *Poa trivialis* L., *Rumex crispus* L.

Спостереження на другому полігоні автош- ляху Черкаси-Вінниця ми проводили між 9 та 10 годинами ранку. Температура придорожного шару атмосфери складала 19,8°C, вологість 54,4%, радіаційний фон 0,15 msv/h. Значення географічних координат: 48°51'21,778" N; 30°39'18,832"E. Другий полігон локалізований в точці перетину другорядного шляху до автотраси Черкаси-Умань (недалеко від м. Тальне), на якій (за ПДР) не можна перевищувати швидкість лег- ковиків більше ніж 110 км/год, вантажівок – більше ніж 80 км/год. Фіторізноманіття полігону

Результати вимірів деяких параметрів на натурній ділянці №1 траси Київ-Одеса /
Results of measurements of some parameters on the full-scale research site № 1 of the Kyiv-Odesa highway

Відстань від дорожнього полотна до напівприродних екосистем (сільгоспугіддя, лісосмуги (м))		Полігон знаходиться в межах міста поруч с АЗС. Придорожня смуга має ширину близько 30 м	
Індекс Менхінка (видового різноманіття, або багатства) $M = A / \sqrt{N}$		A = 46; N = 81; M = 5,111	
Найбільш розповсюджені рослини та тварини на узбіччях доріг			
Рослини за кількістю повторюваностей	Дивина звичайна (<i>Verbascum phlomoides</i> L.) (2), татарник звичайний (<i>Onopordum acanthium</i> L.)(3), осот (<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.) (5), злинка однорічна (<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.) (i) (7), деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.) (3), скереда покривельна (<i>Crepis tectorum</i> L.) (1), щавель кінський (<i>Rumex confertus</i> Willd.) (6) звіробій звичайний (<i>Hypericum perforatum</i> L.) (1), пижмо звичайне (<i>Tanacetum vulgare</i> L.) (2), полин звичайний (<i>Artemisia vulgaris</i> L.) (6), молочай прутяний (<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.) (1), цикорій дикий (<i>Cichorium intybus</i> L.) (1), морква дика (<i>Daucus carota</i> L.) (3), берізка польова (<i>Convolvulus arvensis</i> L.) (2), лядвенець рогатий (<i>Lotus corniculatus</i> L.)(1), гринделія розчепірена(<i>Grindelia squarrosa</i> (Pursh) Dunal.) (i) (3), синяк звичайний(<i>Echium vulgare</i> L.)(1), мильнянка(<i>Saponaria officinalis</i> L.) (2), люцерна посівна(<i>Medicago sativa</i> L.)(1), подорожник ланцетолистий(<i>Plantago lanceolata</i> L.) (1), портулак городній (<i>Portulaca oleracea</i> L.)(1), мишій сизий(<i>Setaria pumila</i> (Poir.) Roem. & Schult.) (1), в'яз гладкий (<i>Ulmus laevis</i> Pall.)(i) (2), тонконіг звичайний (<i>Poa trivialis</i> L.) (1), вівсяниця лучна (<i>Festuca pratensis</i> Huds.) (1), клен ясенелистий (<i>Acer negundo</i> L.) (i)(3), смілка звичайна (<i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke.) (1), шипшина звичайна (<i>Rosa canina</i> L.) (2), перстач темний (<i>Potentilla obscura</i> Willd.) (1), болиголов плямистий(<i>Conium maculatum</i> L.) (1), лопух великий (<i>Arctium lappa</i> L.) (2), якобея звичайна (<i>Jacobaea vulgaris</i> Gaertn.) (1), повій звичайний (<i>Lycium barbarum</i> L.) (1), клен польовий (<i>Acer campestre</i> L.) (1), нечуйвітер звичайний (<i>Pilosella officinarum</i> L.) (1) райграс високий (<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J.Presl & C.Presl) (1), пирій повзучий (<i>Elymus repens</i> (L.) Gould) (1), куничник звичайний (<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth.)(1), бугиля лісова (<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.) (1), хміль звичайний (<i>Humulus lupulus</i> L.) (1), льонок звичайний (<i>Linaria vulgaris</i> Mill.) (1), золотушник канадський (<i>Solidago canadensis</i> L.) (i)(1), амброзія полинолиста (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.) (i) (1), шандра звичайна (<i>Marrubium vulgare</i> L.) (1).		
Інвазійні рослини	злинка однорічна (<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.) (i) (7), гринделія розчепірена(<i>Grindelia squarrosa</i> (Pursh) Dunal.) (i) (3), в'яз гладкий (<i>Ulmus laevis</i> Pall.) (i) (2), клен ясенелистий(<i>Acer negundo</i> L.) (i)(3), золотушник канадський(<i>Solidago canadensis</i> L.)(i)(1), амброзія полинолиста (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)(i)(1).		
Рослини галофіти	*щавель кінський (<i>Rumex confertus</i> Willd.) (6), полин звичайний (<i>Artemisia vulgaris</i> L.) (6)		
Рослини гідрофіти	Не виявлено		
Тварини	Ознаки життєдіяльності птахів, польовок, мурах, павуків, дощових черв'яків, різних комах.		

можна вважати доволі значним.

В результаті дослідження натурної ділянки було ідентифіковано 46 видів флори, серед яких найчастіше зустрічались: *Sonchus arvensis* L. (3), *Acer negundo* L. (i) (4), *Ambrosia artemisiifolia* L. (i) (4), *Artemisia vulgaris* L. (4), *Erigeron annuus* (L.) Desf. (i) (4), *Acer campestre* L. (5), *Cirsium arvense* (L.) Scop. (5), *Carduus acanthoides* L. (6), *Fraxinus excelsior* L. (6), *Achillea millefolium* L. (9), *Ballota nigra* L. (11), *Linaria vulgaris* Mill. (15). Крім того були виявлені наочні факти наднормового внесення пестицидів на сільськогосподарських

угіддях, які близько підходять до лісозахисних смуг (всохлі чагарники та дерева). Але, залишки на усохлих деревах омели також можуть бути причиною загибелі дерев. Визначним фактом є той, що на цій натурній ділянці ідентифікована найбільша (серед інших натурних ділянок траси Вінниця-Черкаси) кількість видів інвазійної флори: *Erigeron canadensis* L. (i) (1), *Heracleum sosnowskyi* Manden. (i) (1), *Robinia pseudoacacia* L. (i) (1), *Acer negundo* L. (i) (4), *Ambrosia artemisiifolia* L. (i) (4), *Erigeron annuus* (L.) Desf. (i) (4).

Можливо, така велика кількість інвазійних



Рис. 2. Фото загальної локації полігону №1 автошляху Одеса-Київ /
Fig. 2. Photo of the general location of the landfill No. 1 of the Odesa-Kyiv highway

рослин пояснюється тим фактом, що за зовнішніми ознаками не було помітно слідів боротьби дорожніх служб з інвазійними видами флори. Ми припускаємо, що крім названих вище шляхів розповсюдження інвазій автотранспортом, відсутність боротьби з ними є чи не найголовнішою причиною їхнього розповсюдження.

В той же час розповсюдження таких галофітних рослин як *Rumex confertus* Willd.(3), *Artemisia vulgaris* L.(4), *Artemisia absinthium* L.)(1), *Artemisia austriaca* Jacq.(1) дає право стверджувати, що дорожні служби у зимовий період регулярно проводять посипання дорожньої смуги NaCl з метою запобігання ожеледі.

Порівнюючі наявний склад флори у придорожніх смугах з [26] (Каталог...) ми констатували наступні випадки збігання видового складу рослин: *Artemisia absinthium* L.(1), *Chenopodium album* L.(1), *Dactylis glomerata* L.(1), *Heracleum sosnowskyi* Manden.(i)(1), *Erigeron canadensis* L.(i)(1), *Leonurus* L.(1), *Polygonum convolvulus* L.(1), *Raphanus raphanistrum* L.(1), *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch.Bip.(1), *Lactuca muralis* (L.) Gaertn.(2), *Poa pratensis* L.(2), *Rumex confertus* Willd.(2), *Ambrosia artemisiifolia* L(i)(4), *Artemisia vulgaris* L.(4), *Erigeron annuus* (L.)Desf(i)(4), *Carduus acanthoides* L.(6), *Ballota nigra* L. (11).

Найбільш адекватною інтерпретацією такого інтенсивного «просування» рудеральної флори є доволі значне дистанціювання цієї ділянки транспортної магістралі від потужних осередків промисловості, а, отже, доволі низька інтенсивність

транспортних потоків. Крім того розповсюдженню рудеральної флори «сприяє» низька активність Укравтодору щодо боротьби з інвазіями. Відтак, «відповіддю» на це є активний розвиток екосистем на основі рудеральної флори, що зовсім не суперечить принципу компенсації Ле-Шательє-Брауна.

Для зручності опрацювання первинних даних усі вони (дані) були сгруповані в кілька груп чинників:

- Природно-географічний: геопозиціювання (координати згідно даним GPS), T°C, вологість повітря, іонізуюче випромінювання;

- Антропогенний вплив: шум від автотранспорту, концентрація пилу, окремі геохімічні характеристики ґрунтів, наближеність дорожньої смуги до полів;

- Екосистемні відносини: кількість видів флори та їх повторюваність, кількість інвазійної флори, та тієї флори, яка є індикаторною щодо засолення та зволоження ґрунтів, збігання (або незбігання) ідентифікованих рослин з Національним каталогом біотопів України (Національний..., 2018), значення індексу видового різноманіття (Менхініка).

Вказана вище дослідницька процедура дала змогу в першому наближенні зробити оцінку ступеня завершеності формування придорожніх екосистем [30]. При цьому у термін «екосистема» ми вкладаємо більш широкий зміст порівняно з біоценозом, який певною мірою свідчить про майбутній стан сучасного біоценозу. При цьому ми не

Результати вимірів деяких параметрів на натурній ділянці №2
автошляхів широтного напрямку Сичівка-Черкаси /
Results of measurements of some parameters on the full-scale research site № 2
Sychivka-Cherkasy latitudinal highways

Відстань від дорожнього полотна до напівприродних екосистем (сільгоспугіддя, лісосмуги (м))		3-5 м
Індекс Менхініка (видового різноманіття, або багатства) $M = A / \sqrt{N}$		$A = 46; N = 118; M = 4,234$
Найбільш розповсюджені рослини та тварини на узбіччях доріг		
Рослини за кількістю повторюваностей	Льоник звичайний (<i>Linaria vulgaris</i> Mill.)(15), м'яточник чорний (<i>Ballota nigra</i> L.)(11), деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.)(9), ясень звичайний (<i>Fraxinus excelsior</i> L.)(6), будяк звичайний (<i>Carduus acanthoides</i> L.)(6), осот рожевий (<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.)(5), клен польовий (<i>Acer campestre</i> L.)(5), полин звичайний (чорнобил) (<i>Artemisia vulgaris</i> L.)(4), амброзія полинолиста (<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)(i)(4), стенокис однорічний (злінка однорічна) (<i>Erigeron annuus</i> (L.) Desf) (i)(4), клен ясенolistий (<i>Acer negundo</i> L.) (i) (4), осот жовтий польовий (<i>Sonchus arvensis</i> L.)(3), райграс високий (<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) P.Beauv. ex J.Presl & C.Presl) (2), пирій повзучий (<i>Elymus repens</i> (L.) Gould)(2), щавель кінський (<i>Rumex confertus</i> Willd.)(2), цикорій дикий (<i>Cichorium intybus</i> L.)(2), конюшина лучна(<i>Trifolium pratense</i> L.)(2), скерда покривельна (<i>Crepis tectorum</i> L.)(2), салатник лісовий (<i>Lactuca muralis</i> (L.) Gaertn.)(2), анізанта покривельна (<i>Bromus tectorum</i> L.), кунічник звичайний(<i>Calamagrostis epigejos</i> (L.) Roth), редька дика (<i>Raphanus raphanistrum</i> L.), гірчак березковидний (<i>Polygonum convolvulus</i> L.), резеда жовта (<i>Reseda lutea</i> L.), мак самосійка(<i>Papaver rhoeas</i> L.), берізка польова (<i>Convolvulus arvensis</i> L.), гравілат міський(<i>Geum urbanum</i> L.), шипшина звичайна (<i>Rosa canina</i> L.), триреберник непахучий (<i>Tripleurospermum inodorum</i> (L.) Sch.Bip.), хміль звичайний (<i>Humulus lupulus</i> L.), полин гіркий (<i>Artemisia absinthium</i> L.), осот рожевий (<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.), гростія збірна (<i>Dactylis glomerata</i> L.), акація біла (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) (i), щириця загнута (<i>Amaranthus retroflexus</i> L.), полин австрійський (<i>Artemisia austriaca</i> Jacq.), кардарія крупковидна (<i>Lepidium draba</i> L.), борщівник сосновського (<i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden.) (i), тонконіг лучний (<i>Poa pratensis</i> L.)(2), злінка канадська (<i>Erigeron canadensis</i> L.) (i), лобода біла (<i>Chenopodium album</i> L.), собача кропива (пустирник) (<i>Leonurus</i> L.), лутига (<i>Atriplex</i> L.), пастернак звичайний (<i>Pastinaca sativa</i> L.), звіробій звичайний (<i>Hypericum Tourn. ex L.</i>), лутига розлога (<i>Atriplex patula</i> L.).	
Інвазійні рослини	амброзія(<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)(i)(4), стенокис однорічний (злінка однорічна) (<i>Erigeron annuus</i> (L.) Desf) (i)(4), клен ясенolistий (<i>Acer negundo</i> L.) (i) (4), акація біла (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) (i), борщівник сосновського (<i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden.) (i), злінка канадська (<i>Erigeron canadensis</i> L.) (i).	
Рослини галофіти	*щавель кінський (<i>Rumex confertus</i> Willd.) (3), полин звичайний (чорнобил) (<i>Artemisia vulgaris</i> L.)(4), полин гіркий (<i>Artemisia absinthium</i> L.) (1), полин австрійський (<i>Artemisia austriaca</i> Jacq.) (1)	
Рослини гідрофіти	Не виявлено	
Тварини	Ознаки життєдіяльності птахів, польової миші, мурах, павуків, дощових черв'яків, різних комах	

прагнули знайти математичний вираз такої завершеності, тому «розмірність» цього показника була визначена наступним чином: *високий ступінь*; *середній ступінь*; *низький ступінь*; *початковий ступінь*.

Головні показники, які характеризують виділені райони, були зведені в відповідну таблицю (табл. 3).

Для кращого наочного сприйняття і порівняння значень окремих показників було застосо-

вано метод пелюсткових діаграм (рис. 4).

В цих діаграмах ми використали показники, які характеризують, зокрема деякі умови зовнішнього середовища (1-й та 2-й параметри); показники техногенного впливу (3-й та 4-й параметри); показники, що можуть характеризувати ступінь повноти формування екосистемних відносин (з 5-го по 8-й параметри).

В центрі кола позначені порядкові номери, які збігаються з номерами натурних ділянок в



Рис. 3. Загальний план натурної ділянки №2 автошляхів широтного напрямку «Сичівка-Черкаси» /
Fig. 3. General plan of the full-scale research site No. 2 of the Sychivka-Cherkasy latitudinal highway

табл. 3. Коло, позначене червоним кольором, відповідає вісі середніх значень усіх показників по усіх полігонах. Цифри по осях відповідають порядковому номеру показника (рис.4):

- 1 – Придорожня смуга (м);
- 2 – Вологість повітря (%);
- 3 – Шум від автотранспорту (db);
- 4 – Забруднення придорожного шару повітря пилом (розмір часток 10 мкм, мкг/м³);
- 5 – Рудеральні рослини (шт);
- 6 – Повторюваність видів флори понад 3 (шт);
- 7 – Повторюваність інвазійних видів флори (шт);
- 8 – Збігання рудеральних видів флори з «Національним каталогом біотопів» (шт).

Зокрема, на пелюсткових діаграмах (рис.5) можна бачити відхилення значень від середніх по усьому масиву даних.

Здійснення традиційних дослідницьких процедур з наведеними даними та їх відповідне погруповання дозволило виконати районування автошляхів Черкаської області за ступенем завершеності формування екосистемних відносин у придорожніх ландшафтах (рис. 6).

Висновки. 1. На дослідженій площі Черкащини було виконане районування за ступенем формування екосистемних відносин. Виокремлено 5 районів, з яких провідну роль відіграють осередково-ядерні райони – Уманський (з середнім ступенем завершеності) та Черкаський (з низьким ступенем завершеності).

В цих районах провідними є різноманітні показники рудеральної флори. Також виділено три периферійних райони, в яких різноманітні показники рудеральної флори нижче середніх значень. Всі вони мають початковий ступінь завершеності формування екосистемних відносин. Це – Північно-периферійний, Південно-периферійний та Центральний-периферійний. Назва останнього району пояснюється тим, що Черкаська область має широтне простягання і два певною мірою автономізованих центри – Черкаси та Умань. Саме по відношенню до цих центрів Звенигородка та Шпола займають периферійне положення. А назва «центрально-периферійний» свідчить про те, що географічно цей район знаходиться в центрі області.

2. На загал, здійснене районування включає ті ділянки автошляхів, що безпосередньо приналежать до сільськогосподарських угідь. Але завдяки переважанню в таких рудеральних фітоценозах переважно трав'янистої флори, вони можуть бути основою майбутнього ґрунтоутворення з подальшим поступовим окультуренням шляхом заміщення рудеральних рослин аборигенними. Значна ж частина придорожніх ландшафтів досліджених нами автотрас вкрита лісосмугами і екосистемна динаміка в них суттєво відрізняється від більш широко представлених трав'янистих фітоценозів. Відтак, завершеність формування в них екосистемних відносин буде вимагати додаткових досліджень.

Таблиця 3 / Table 3

Характеристика біоценозів, що формуються вздовж головних автошляхів Черкаської області*

Characteristics of biocenoses forming along the main highways of Cherkasy Region*

№	Назва натурної ділянки (найближчий населений пункт та її номер)	Ширина придорожньої смуги (м)	Координати центральної точки натурної ділянки (широта, довгота)	Температура повітря С°	Вологість повітря (%)	Радіаційний фон (m/sv)	Найвищий рівень шуму від транспорту (db)	Запиленість (Запиленість з розміром часток 10 мкм (мкг/м³))	Загальна кількість видів рудеральних рослин (шт)	Кількість видів рослин за повторювані- стю понад 3 (шт)	Загальна кількість повторюваності інвазійних рослин (шт)	Відповідність видів рудеральних рослин «Національному каталогу біотопів» (шт)	Ступінь завершеності формування екосистемних відносин**
1	Авторинок м. Умань (№1)	30	48°45'12,133" N; 30°15'29,041"E	25	65	0,15	89,5	42	44	10	17	12	5,1
2	Відгалуження у бік с. Полянецьке (№2)	60	48°41'16,566" N; 30°14'30,468"E	25	64	0,16	98,0	40	40	2	6	8	5,1
3	Автозаправка «SOCAR» (№3)	40	48°36'22,057" N; 30°14'03,162"E	24	66	0,16	96,1	44	32	5	9	15	4,2
4	Відгалуження дороги у бік с. Рижавка (№4)	35	48°32'39,535" N; 30°13'43,212"E	26	62	0,15	98,7	44	24	3	4	9	3,7
5	«Батьківська хата» (№5)	7	48°28'54,172" N; 30°13'49,073"E	25	62	0,16	95,9	29	9	0	2	3	2,4
6	м. Жашків (№13)	10	48°15'35,494" N; 30°05'28,055"E	24	62	0,14	94,0	13	20	2	6	6	3,5
7	Автобусна зупинка «Вільшанка» (№14)	15	49°10'23,531" N; 30°04'54,357"E	23	60	0,16	94,6	7	12	1	3	6	2,8
8	Автобусна зупинка «Нестерівка» (№15)	25	48°58'38,295" N; 30°10'20,396"E	25	57	0,14	94,1	8	27	5	2	8	3,6
9	Придорожній базар с. Подібна (№16)	10	48°55'26,212" N; 30°14'21,412"E	23	62	0,15	95,8	10	25	2	2	8	3,1
10	АЗС Укрнафта с. Краснопілка (№17)	12	48°52'13,070" N; 30°15'35,177"E	24	60	0,16	97,5	9	14	1	2	2	2,9
11	«Застава» (№18)	15	48°48'43,568" N; 30°15'21,170"E	24	61	0,14	97,0	9	21	5	6	6	2,5
12	с. Сичівка (№1)	12	48°47'35,830" N; 29°50'41,975"E	20	48	0,18	91,6	18	17	6	5	7	2,6
13	с. Білашки (№2)	4	48°51'21,780" N; 30°39'18,828"E	20	54	0,16	91,4	22	45	13	15	17	4,2
14	с. Ротмістрівка (№3)	5	49°08'46,370" N; 31°43'36,602"E	26	40	0,17	93,6	15	43	13	15	15	4,1
15	Транспортна розв'язка за м. Сміла (№4)	5	49°16'04,340" N; 31°52'29,786"E	27	42	0,13	89,1	20	19	3	17	9	3,1
16	Газозаправна станція м. Черкаси (№5)	6	49°23'40,469" N; 32°00'18,440"E	29	39	0,15	87,6	29	19	2	11	5	1,2
17	Географічний центр України (№6)	3	49°02'17,473" N; 31°27'07,639"E	28	34	0,14	93,3	21	14	1	1	5	3,2
18	с. Соколівочка (№7)	3	48°56'34,709" N; 30°44'46,682"E	30	33	0,12	90,6	15	17	5	2	6	2,6
19	с. Піківець (№8)	4	48°45'17,195" N; 30°16'20,555"E	29	33	0,21	91,2	8	19	5	3	4	3,3

*При оцінці ступеня завершеності формування екосистемних відносин оцінювалось лише фіторізноманіття, оскільки систематичне дослідження зоорізноманіття потребує тривалих стаціонарних спостережень, які автори сподівається провести незабаром.

**Значення індексу Менхініка

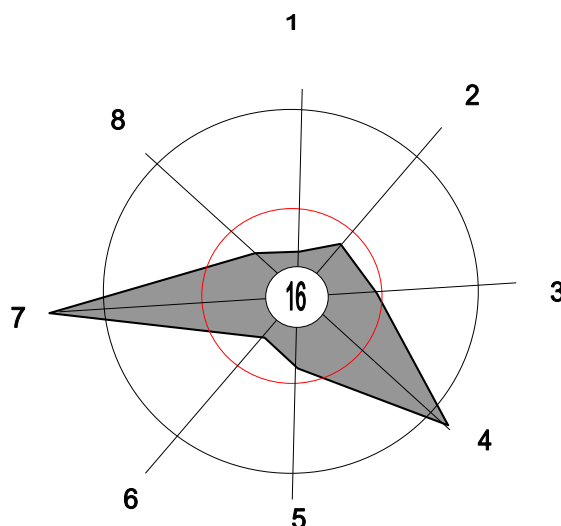


Рис. 4. Зразок пелюсткової діаграми розподілу параметрів на натурних ділянках /
Fig. 4. Sample of a petal diagram of the distribution of parameters on natural areas

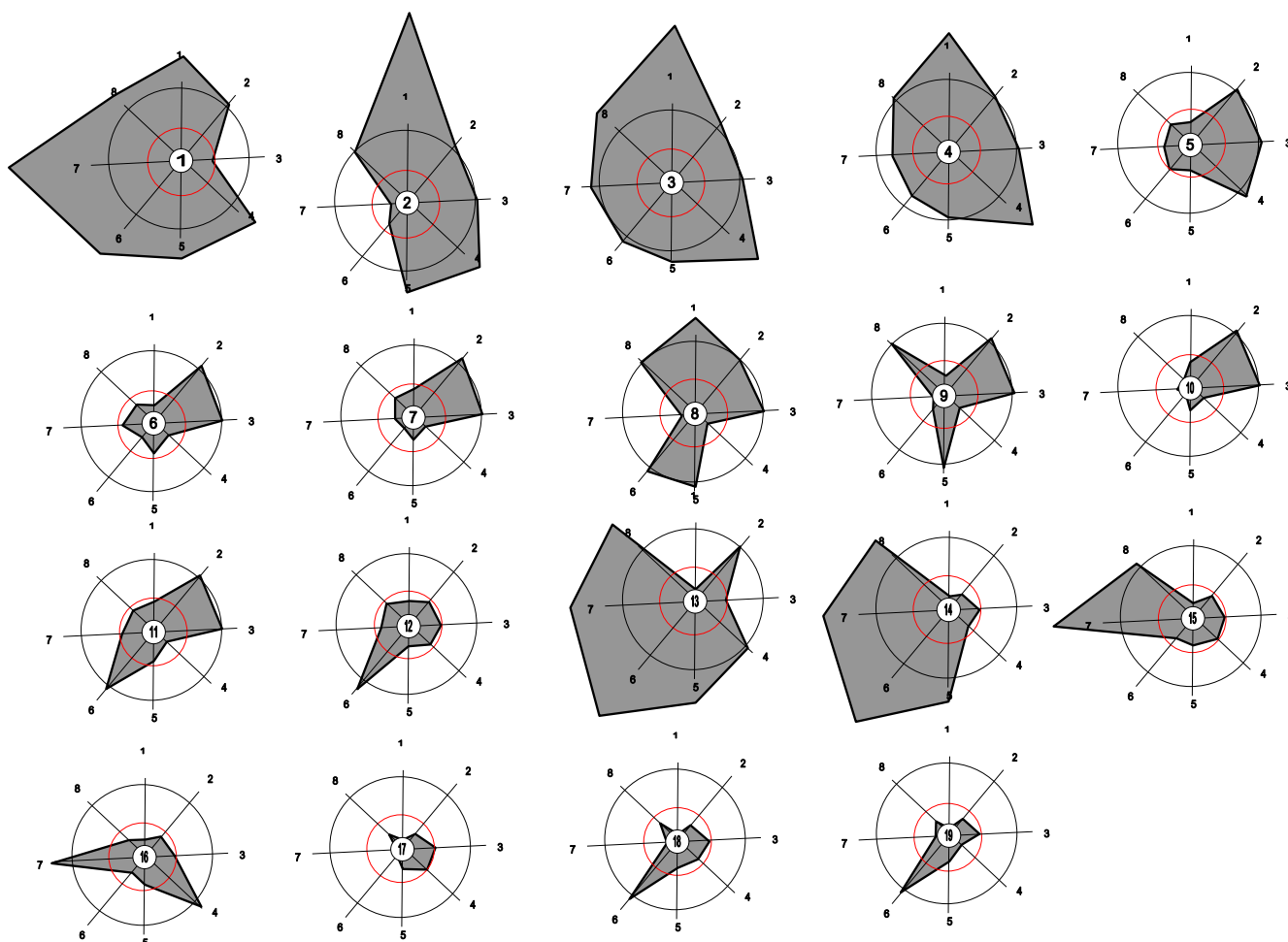
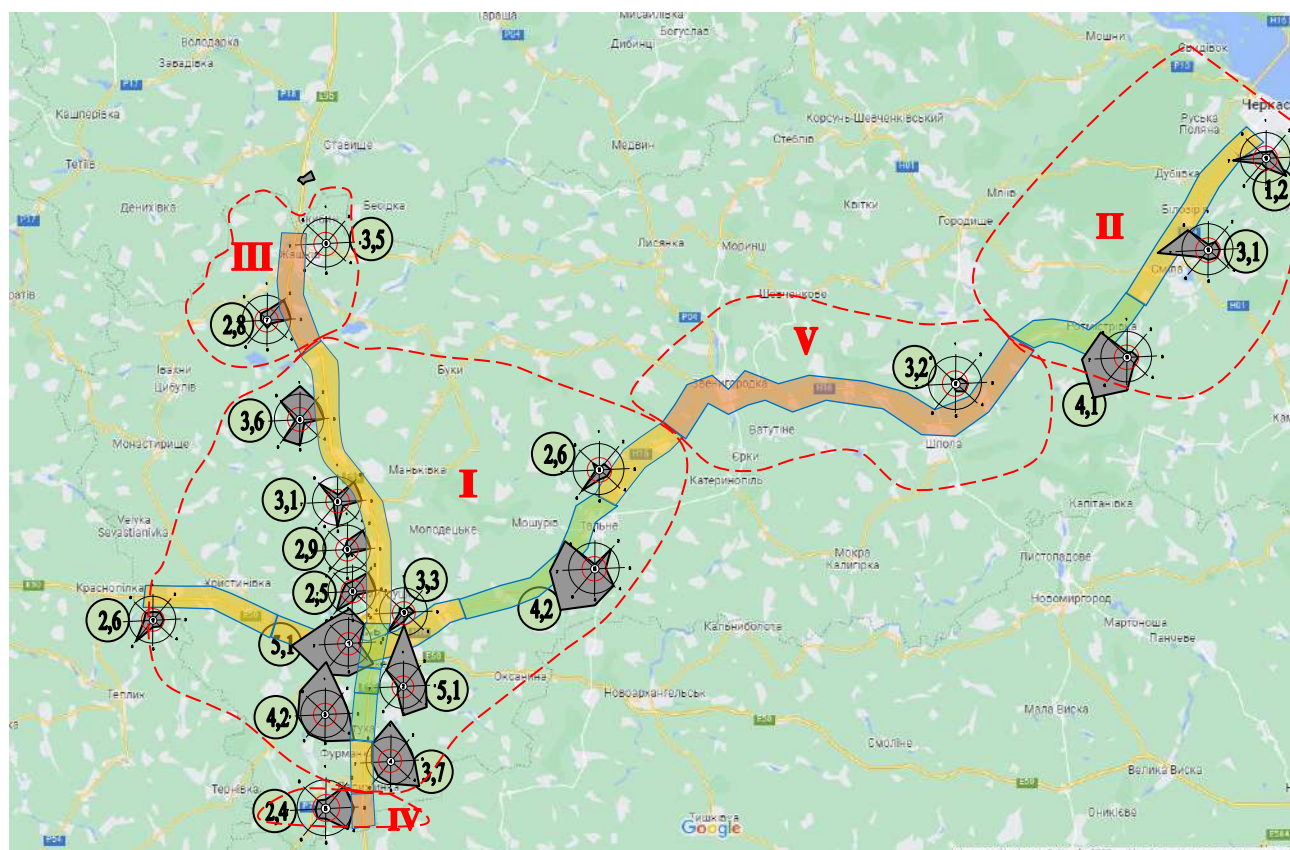


Рис. 5. Пелюсткові діаграми розподілу параметрів на натурних ділянках
(номери в середині кола діаграми відповідають номерам натурних ділянок з таблиці 3) /
Fig. 5. Petal diagrams of the distribution of parameters on natural sites
(the numbers in the middle of the circle of the diagram correspond to the numbers of natural sites from Table 3)

3. Основні параметри навколишнього середовища, що застосовуються в моніторингу дорожніх ландшафтів (геосистем), використовуються однаково ефективно як у закордонних, так і в українських дослідженнях. Вони включають такі показ-

ники, як біорізноманіття, водні потоки, седиментація, запиленість, шум та інші, які дозволяють оцінювати окремі характеристики середовища, що піддаються впливу автомобільних шляхів. Крім того, ці показники часто є частиною складніших



Легенда:

- I. Високий ступінь завершеності формування придорожніх екосистем (не виявлено) -
 II. Середній ступінь завершеності формування придорожніх екосистем -
 III. Низький ступінь завершеності формування придорожніх екосистем -
 IV. Початковий ступінь завершеності формування придорожніх екосистем -

3,7 - значення індексу Менхініка. Райони: **I** - Уманський осередково-ядерний район; **II** - Черкаський осередково-ядерний район; **III** - Жашківський північно-периферійний район; **IV** - Ладижинський південно-периферійний район; **V** - Звенигородсько-Шполянський центрально-периферійний район; ----- - межі районів.

Рис. 6. Районування автошляхів Черкаської області за ступенем завершеності формування придорожніх екосистем (згідно таблиці 3) /

Fig. 6. Zoning of roads in Cherkasy Region by the degree of completion of the formation of roadside ecosystems (according to Table 3)

дослідницьких підходів.

4. Згідно з результатів дослідження біорізноманіття Черкаської області, на територіях, що охоплюють біоценози, що формуються уздовж ав-

тотрас Київ-Одеса (М 05) та Вінниця-Черкаси (М 12 та Н 16), майже не зберіглося аборигенної рослинності. Натомість придорожні біоценози переважно складаються з рудеральних видів рослин.

Список використаної літератури

1. Денисик Г.І., Браславська О.В., Воловик В.М., Вальчук-Оркуша О.М., Буряк-Габрись І.О., Стефанков Л.Л. Каркасні антропогенні ландшафти: монографія. Вінниця: ТВОРИ, 2021. 316 с.
2. Воловик В.М. Каркасні ландшафти: етимологія та визначення. Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 6–12.
3. Воронка В.П. Морські порти як каркасні ландшафти (на прикладі північного узбережжя Азовського моря). Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 55–59.
4. Кравцова І.В. Селитебно-дорожній каркас садово-паркових ландшафтів. Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 39–42.

5. Дідура Р.В. Аналіз геохімічних елементів у дорожніх ландшафтно-інженерних системах. Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 60–63.
6. Коржик В.П. Старі дороги. Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 63–69.
7. Ситник О.І., Вальчук-Оркуша О.М. Транспортна мережа Гайворонського району як чинник формування антропогенного рельєфу. Каркасні (селитебні і дорожні) антропогенні ландшафти: теоретичні та прикладні аспекти: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (з міжнар. участю), м. Вінниця, 24–25 квіт. 2019 р. Вінниця, 2019. С. 70–75.
8. Байтеряков О., Воронова В. Топологічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. Вип. 60. С. 137–158. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10>
9. Grytsevych V.S., Podvirna K.Y., Senkiv M.I. Motor transport network in the Western region of Ukraine as a factor of tourism industry development. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2019. Вип. 50. С. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-07>
10. Pauwels F., Gulink H. Changing minor road networks in relation to landscape sustainability and farming practices in West Europe. Agriculture Ecosystems & Environment. 2000. Vol. 77. Issue: 1–2. Pp. 95–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00095-X)
11. Cheng B., Lv Y., Zhan Y., Su D., Cao S. Constructing China's Roads as Works of Art: a Case Study of "Esthetic Greenway" Construction in the Shennongjia Region of China. Land Degradation & Development. 2015. Vol. 26. Issue: 4. Pp. 324–330. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2210>
12. Zhang SC., Wei CF., Shang H., Shao JA. Coupling of Rural Road Network's Spatial Pattern and Landform Morphological Factors by Multilayer Perception Neural Network. Sensor Letters. 2012. Vol. 10. Issue: 1–2. Pp. 168–176. DOI: <https://doi.org/10.1166/sl.2012.1892>
13. Li YH., Wu W., Xiong ZP., Hu YM., Chang Y., Xiao DN. Effects of forest roads on habitat pattern for sables in Da Hingan Mountains, northeastern China. Chinese Geographical Science. 2014. Vol. 24. Issue: 5. Pp. 587–598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-014-0674-5>
14. Hu XS., Zhang LY., Ye LM., Lin YH., Qiu RZ. Locating spatial variation in the association between road network and forest biomass carbon accumulation. Ecological Indicators. 2017. Vol. 73. Pp. 214–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.042>
15. Girvetz E., Shilling F. Decision support for road system analysis and modification on the Tahoe National Forest. Environmental Management. 2003. Vol. 32. Issue 2. Pp. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-2970-1>
16. Warner RB., Brune CR., Popescu VD. Snakes on a lane: Road type and edge habitat predict hotspots of snake road mortality. Journal for Nature Conservation. 2021. Vol. 61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.125978>
17. Jing YR., Zhao QH., Lu MW., Wang A., Yu JH., Liu Y., Ding SY. Effects of road and river networks on sediment connectivity in mountainous watersheds. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154189>
18. Ruiz R., Rodriguez FJ., Coronado JM. Identification and assessment of engineered road heritage: A methodological approach. Journal of Cultural Heritage. 2014. Vol. 15. Issue: 1. Pp. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.01.001>
19. Song J., Hao ZZ., He JX., Le QL., Ma JY. Influence of nature reserve road traffic disturbance on soil carbon. Global Ecology and Conservation. 2024. Vol. 54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03103>
20. Wildlife Crossing Structure Handbook Design and Evaluation in North America. FHWA. URL: https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/wildlife_crossing_structures/ch_2.aspx
21. Дубина Д.В., Смельянова С.М., Дзюба Т.П. Рудеральна рослинність України: синтаксономічна різноманітність і територіальна диференціація. Чорноморський ботанічний журнал. 2021. 17 (3). С. 253–275. DOI: [10.32999/ksu1990-553X/2021-17-3-5](https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-3-5)
22. Forman R. T., Sperling D., Bissonette J.A. Road ecology: Science and solutions. Island Press. 2003. 284 p. https://www.researchgate.net/publication/37717562_Road_Ecology_Science_And_Solutions
23. Denysyk Hr.I., Kyselov Yu.O., Sonko S.P., Shlapak V.P., Maksymenko N.V. Ecotons in landscape's organization of the dry land surface. Ландшафтознавство. Науково-теоретичний журнал. №2, 2022. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-102-111>
24. Маринич О. М., Шищенко П. Г. Фізична географія України: підруч. Київ: Знання, 2005. 511 с.
25. Онищенко В. А. Оселища України за класифікацією EUNIS. К.: Фітосоціоцентр, 2016. 56 с.
26. Куземко А. А., Дідух Я. П., Онищенко В. А., Шеффер Я. Національний каталог біотопів України. К.: ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с.
27. Warner RB., Brune CR., Popescu VD. Snakes on a lane: Road type and edge habitat predict hotspots of snake road mortality. Journal for Nature Conservation. 2021. Vol. 61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.125978>
28. Сонько С., Мамчур Т., Кравцова І., Мостов'як І., Кисельов Ю. Геоботанічне вивчення рудеральної рослинності у програмі геоecологічного моніторингу придорожніх екосистем Черкаської області. Науковий вісник Чернівецького університету: Географія, 2023. (842). С. 103–111. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.842.103-111>

29. Parakhnenko V. G. Economic losses of phytopollution of the ecosystems of the territory around railways by adventitious plants in the city of Znamyanka, Kirovohrad region. *Economic Horizons*. 2022. No. 1(19). P. 64–72. DOI: [https://doi.org/10.31499/2616-5236.1\(19\).2022.264989](https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(19).2022.264989)
30. Ogilko S. P. Zoning of highways of the Cherkasy region according to the degree of formation of ecosystem relations. *Man and Environment. Issues of Neocology*. 2023. (40). P. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-03>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Formation of biocenoses in roadside landscapes of Cherkasy Region

*Iryna Kravtsova*¹

PhD (Geography), Associate Professor of the Department of Ecology and Life Safety

¹ Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine;

*Sergiy Sonko*¹

DSc (Geography), Professor of the Department of Ecology and Life Safety,

*Olga Vasylenko*¹

PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Ecology and Life Safety;

*Ihor Gursky*¹

PhD (Agriculture), Associate Professor of the Department of Ecology and Life Safety

*Stanislav Ogilko*¹

PhD (Earth Sciences), Lecturer of the Department of Ecology and Life Safety

ABSTRACT

Formulation of the problem. The problem solved in the article is relevant primarily due to the constant growth of the density of the transport network, and, therefore, the ever-increasing "theft" of natural ecosystems by humans from aboriginal plants and animals. However, new alien plants, which are gradually displacing local species, are able to form completely independent biocenoses, which proves the extraordinary ability of the biosphere to support life.

The purpose of the article to investigate the formation of biocenoses in the vertical structure of roadside landscapes of Cherkasy Region.

Methods. The main theoretical approach to identifying human-made landscapes, including linear ones, in this study is based on the prioritization of ecosystem dynamics. This approach emphasizes the maintenance or enhancement of the ability of ecosystems to maintain their natural processes and functions over time. General scientific and specific scientific methods of geographical research were applied. Especially important for the implementation of the tasks are the methods of geobotanical research.

Results. The study of the main parameters of the roadside landscapes of the Cherkasy Region was carried out by us in accordance with the pre-developed program. All parameters were combined into the following groups of factors: natural-geographic factor (geolocation, air temperature and humidity, natural radiation background); the degree of anthropogenic impact (noise level, dustiness, some geochemical indicators, proximity/distance of the roadway from agricultural land); the degree of manifestation of ecosystem relations (the number of plant species and their recurrence, the presence of invasive species and those that are indicators of salinization and waterlogging, the presence of species included in the National Catalog of Biotopes of Ukraine, the value of the Menkhinik index (species diversity). Using the method of petal diagrams, as well as the method of qualitative background, an analysis of the entire set of parameters for each polygon was performed, which made it possible to identify 5 districts of different degrees of completeness of the formation of ecosystem relations in the territory of the Cherkasy Region. Two core regions - Umansky (medium degree) and Cherkasy (low degree), the main characteristics of which are dominated by different parameters of ruderal vegetation, and three peripheral areas, in which the parameters of ruderal vegetation are below the average level - North-peripheral (Zhashkivskiyi, initial degree), South-peripheral (Ladyzhynskiyi, elementary level), and Central-peripheral (Zvenigorodsko-Shpolianskyi, elementary level). In general, the conducted zoning covers only those sections of highways that directly border agricultural lands. But due to the presence of mainly herbaceous vegetation in such ruderal phytocenoses, they can be the basis of future soil formation with further gradual cultivation by replacing ruderal plants with aboriginal ones.

Scientific novelty and practical significance. Studies of the biodiversity of Cherkasy Region in the territories covering biocenoses formed along the Kyiv-Odesa (M 05) and Vinnytsia-Cherkasy (M 12 and H 16) highways showed that there is almost no native vegetation. Instead, roadside biocenoses mainly consist of ruderal plant species. The scientific novelty lies in the fact that the zoning of highways in the Cherkasy Region has been carried out according to the degree of completion of the formation of ecosystem relations in roadside landscapes.

Keywords: roadside landscapes, biocenoses, Cherkasy Region, regional zoning, rational use of nature.

References

1. Denisyk, G.I., Braslavska, O.V., Volovyk, V.M., Valchuk-Orkusha, O.M., Buryak-Gabrys, I.O., Stefankov, L.L. (2021). *Framework anthropogenic landscapes: monograph*. Vinnytsia: TVORY, 316 [in Ukrainian]
2. Volovyk, V.M. (2009). *Framework landscapes: etymology and definition*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials Vseukr. science and practice Internet Conf. (with international participation), m. Vinnytsia, April 24–25. Vinnytsia, 6–12. [in Ukrainian]
3. Vorovka, V.P. (2019). *Sea ports as framework landscapes (on the example of the northern coast of the Sea of Azov)*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials of the All-Ukrainian scientific-practical internet conference (with international participation), Vinnytsia, April 24–25, Vinnytsia. 55–59. [in Ukrainian]
4. Kravtsova, I.V. (2019). *Residential and road frame of garden and park landscapes*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials Vseukr. science and practice Internet Conf. (with international participation), m. Vinnytsia, April 24–25. Vinnytsia. 39–42. [in Ukrainian]
5. Didura, R.V. (2019). *Analysis of geochemical elements in road landscape engineering systems*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials Vseukr. science and practice Internet Conf. (with international participation), m. Vinnytsia, April 24–25. Vinnytsia. 60–63. [in Ukrainian]
6. Korzyk, V.P. (2019). *Old roads*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials Vseukr. science and practice Internet Conf. (with international participation), Vinnytsia, April 24–25. Vinnytsia. 63–69. [in Ukrainian]
7. Sytnyk, O.I., Valchuk-Orkusha, O.M. (2019). *The transport network of the Hayvoron district as a factor in the formation of anthropogenic relief*. Framework (residential and road) anthropogenic landscapes: theoretical and applied aspects: materials Vseukr. science and practice Internet Conf. (with international participation), m. Vinnytsia, April 24–25. Vinnytsia. 70–75. [in Ukrainian]
8. Baiteryakov, O., Voronova, V. (2024). *Topological analysis of the automobile transport network of the Zaporizhzhia region*. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology". (60), 137–158. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10> [in Ukrainian]
9. Grytsevych, V.S., Podvirna, K.Y., Senkiv, M.I. (2019). *Motor transport network in the Western region of Ukraine as a factor of tourism industry development*. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology". (50), 91–100. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-07>
10. Pauwels, F., Gulinc, H. (2000). *Changing minor road networks in relation to landscape sustainability and farming practices in West Europe*. Agriculture Ecosystems & Environment. 77. 1–2. 95–99. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00095-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00095-X)
11. Cheng, B., Lv, Y., Zhan, Y., Su, D., Cao, S. (2015). *Constructing China's Roads as Works of Art: a Case Study of "Esthetic Greenway" Construction in the Shennongjia Region of China*. Land Degradation & Development. 26. 4. 324–330. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2210>
12. Zhang, SC., Wie, CF., Shang, H., Shao, JA. (2012). *Coupling of Rural Road Network's Spatial Pattern and Landform Morphological Factors by Multilayer Perception Neural Network*. Sensor Letters. 10. 1–2. 168–176. DOI: <https://doi.org/10.1166/sl.2012.1892>
13. Li, YH., Wu, W., Xiong, ZP., Hu, YM., Chang, Y., Xiao, DN. (2014). *Effects of forest roads on habitat pattern for sables in Da Hinggan Mountains, northeastern China*. Chinese Geographical Science. 24. 5. 587–598. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-014-0674-5>
14. Hu, XS., Zhang, LY., Ye, LM., Lin, YH., Qiu, RZ. (2017). *Locating spatial variation in the association between road network and forest biomass carbon accumulation*. Ecological Indicators. 73. 214–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.042>
15. Girvetz, E., Shilling, F. (2003). *Decision support for road system analysis and modification on the Tahoe National Forest*. Environmental Management. 32. 2. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-003-2970-1>
16. Warner, RB., Brune, CR., Popescu, VD. (2021). *Snakes on a lane: Road type and edge habitat predict hotspots of snake road mortality*. Journal for Nature Conservation. 61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.125978>
17. Jing, YR., Zhao, QH., Lu, MW., Wang, A., Yu, JH., Liu, Y., Ding, SY. (2022). *Effects of road and river networks on sediment connectivity in mountainous watersheds*. Science of the Total Environment. 826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154189>
18. Ruiz, R., Rodriguez, FJ., Coronado, JM. (2014). *Identification and assessment of engineered road heritage: A methodological approach*. Journal of Cultural Heritage. 15. 1. 36–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.01.001>
19. Song, J., Hao, ZZ., He, JX., Le, QL., Ma, JY. (2024). *Influence of nature reserve road traffic disturbance on soil carbon*. Global Ecology and Conservation. 54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03103>
20. *Wildlife Crossing Structure Handbook Design and Evaluation in North America*. FHWA. URL: https://www.fhwa.dot.gov/clas/ctip/wildlife_crossing_structures/ch_2.aspx
21. Dubina, D. V., Yemelyanova, S. M., Dzyuba, T.P. (2021). *Ruderal vegetation of Ukraine: syntaxonomic diversity and territorial differentiation*. Black Sea Botanical Journal. 17 (3). 253–275. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2021-17-3-5> [in Ukrainian].
22. Forman, R. T., Sperling, D., Bissonette, J.A. (2003). *Road ecology: Science and solutions*. Island Press. 284. https://www.researchgate.net/publication/37717562_Road_Ecology_Science_And_Solutions

23. Denysyk, Hr.I., Kyselov, Yu.O., Sonko, S.P., Shlapak, V.P., Maksymenko, N.V. (2022). Ecotons in landscape's organization of the dry land surface. *Landscape science. Scientific and theoretical magazine.* 2, 102–112. DOI: <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-102-111>
24. Marynich, O. M., Shishchenko, P. G. (2005). *Physical geography of Ukraine: textbook.* Kyiv: Znannia, 511 [in Ukrainian]
25. Onishchenko, V. A. (2016). *Dwellings of Ukraine according to the EUNIS classification.* K.: Fitosociotsentr, 56.
26. Kuzemko, A. A., Didukh, Y. P., Onyshchenko, V. A., Sheffer, Ya. (2018). *National catalog of biotopes of Ukraine.* K.: FOP Klymenko Yu.Ya., 442.
27. Warner, RB., Brune, CR., Popesku, VD. (2021). Snakes on a lane: Road type and edge habitat predict hotspots of snake road mortality. *Journal for Nature Conservation.* 61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.125978>
28. Sonko, S., Mamchur, T., Kravtsova, I., Mostoviyak, I., Kiselyov, Yu. (2023). Geobotanical study of ruderal vegetation in the program of geoecological monitoring of roadside ecosystems of Cherkasy region. *Scientific Bulletin of Cherkivsi University: Geography,* (842). 103-111. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.842.103-111> [in Ukrainian]
29. Parakhnenko, V. G. (2022). Economic losses of phytopollution of the ecosystems of the territory around railways by adventitious plants in the city of Znamyanka, Kirovohrad region. *Economic Horizons.* No. 1(19). 64–72. DOI: [https://doi.org/10.31499/2616-5236.1\(19\).2022.264989](https://doi.org/10.31499/2616-5236.1(19).2022.264989)
30. Ogilko, S. P. (2023). Zoning of highways of the Cherkasy region according to the degree of formation of ecosystem relations. *Man and Environment. Issues of Neoecology.* (40). 33–41. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-03>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 2 October 2024

Accepted 12 November 2024

Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз

Олена Крайнюк¹

к. техн. н., доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності,

¹ Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,

e-mail: alenuvarova@ukr.net, [id https://orcid.org/0000-0001-9524-040X](https://orcid.org/0000-0001-9524-040X);

Юрій Буц²

д. техн. н., професор, зав. кафедри охорони праці та навколишнього середовища,

² Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,

e-mail: butsyura@ukr.net, [id https://orcid.org/0000-0003-0450-2617](https://orcid.org/0000-0003-0450-2617);

Віталій Барбашин³

к. техн. н., доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності,

³ Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, Харків, Україна,

e-mail: barbachyn@ukr.net, [id https://orcid.org/0000-0003-3262-8305](https://orcid.org/0000-0003-3262-8305);

Ольга Нікітченко³

к. техн. н., доцент кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності,

e-mail: olganikitchenko369@gmail.com, [id https://orcid.org/0009-0007-1313-2191](https://orcid.org/0009-0007-1313-2191);

Валерій Сухов⁴

к. геол. н., завідувач кафедри фундаментальної та прикладної геології,

⁴ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: donsanchos77@gmail.com, [id https://orcid.org/0000-0001-5784-5248](https://orcid.org/0000-0001-5784-5248)

Військові дії на сході України, зокрема в Харківській області, призвели до значних екологічних наслідків. Зокрема, зміни в екосистемах, спричинені бойовими діями та пожежами, вимагають ретельного моніторингу для оцінки ступеня деградації та планування заходів щодо відновлення. Важливо розробити методи оцінки змін в екосистемах регіону для формування стратегії екологічної реабілітації. Дослідження спрямоване на комплексний аналіз впливу військових дій на екосистеми Харківської області, зокрема в Куп'янському та Ізюмському районах. Основною метою є оцінка змін у рослинному покриві за допомогою супутникових даних та індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI), що дозволить виявити найбільш постраждалі території та оцінити потенціал їх відновлення. Результати базуються на використанні супутникових знімків платформи Copernicus Sentinel-2 для аналізу NDVI. Середні та максимальні значення індексу були використані для виявлення змін у рослинному покриві в період з 2021 по 2024 роки. Методологія включає побудову карт змін вегетації, порівняння середніх значень NDVI між роками та використання географічних інформаційних систем (ГІС) для візуалізації даних. В ході дослідження виявлено значне зниження показників NDVI у Куп'янському та Ізюмському районах у 2022 році, що свідчить про серйозні екологічні наслідки бойових дій. Зокрема, NDVI у 2022 році показав падіння на 48% порівняно з 2021 роком, що вказує на деградацію рослинного покриву. У 2024 році спостерігається часткове відновлення, проте рівень NDVI залишається нижчим за довоєнний час. Результати дослідження показують суттєву деградацію екосистем через військові дії, зокрема через лісові пожежі та руйнування природних ландшафтів. Це надає критично важливу інформацію для планування подальших заходів з відновлення та реабілітації природних територій. Рекомендується продовжити моніторинг стану екосистем із використанням супутникових технологій та розробити програму екологічного відновлення, що включатиме заліснення та очищення постраждалих земель.

Ключові слова: екологічні наслідки війни, NDVI, супутниковий моніторинг, деградація рослинного покриву, супутникові знімки Sentinel-2, геоінформаційні системи (ГІС), екологічна реабілітація.

Як цитувати: Крайнюк Олена. Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз / Олена Крайнюк, Юрій Буц, Віталій Барбашин, Ольга Нікітченко, Валерій Сухов // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 329-343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26>

In cites: Krainiuk Olena, Buts Yuriy, Barbashyn Vitalii, Nikitchenko Olga, Sukhov Valerii (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 329-343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Війна в Україні, яка розпочалася в 2014 році та загострилася з початком повномасштабного вторгнення у 2022 році, має серйозні наслідки не лише для людського населення, а й для довкілля. Військові дії супроводжуються руйнуванням інфраструктури, масштабними пожежами, забрудненням ґрунтів і вод, а

також знищенням рослинного покриву. Екосистеми регіонів, де ведуться бойові дії, піддаються значним навантаженням, що може призвести до довгострокових змін у їх структурі та функціонуванні.

Особливо важливою є оцінка впливу війни на довкілля у східних та південно-східних регіонах

України, зокрема в Харківській області, яка стала ареною активних бойових дій. З огляду на стратегічне розташування та наявність значних лісових масивів, Харківська область зазнала суттєвих змін, які вплинули на її екосистеми.

Актуальність даного дослідження полягає у необхідності моніторингу екологічного стану регіону, оскільки такі зміни можуть мати довготривалі наслідки для біорізноманіття, стану ґрунтів, водних ресурсів та можливостей відновлення рослинного покриву. Використання сучасних супутникових технологій, зокрема аналізу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), дозволяє оцінити масштаб і характер змін в екосистемах Харківської області під час війни.

Мета дослідження. Метою наукового дослідження є комплексна оцінка впливу військових дій на екосистеми Харківської області на основі супутникових даних та аналізу змін у рослинному покриві, зокрема на прикладі земель поблизу м. Ізюм та м. Куп'янськ. Це дозволить не лише зафіксувати ступінь деградації, а й оцінити потенціал для майбутнього відновлення природних екосистем регіону.

Предметом дослідження є зміни в екосистемах Харківської області, зокрема у рослинному покриві, під впливом військових дій. Дослідження зосереджується на використанні супутникових даних та індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI) для оцінки ступеня деградації та потенціалу відновлення природних територій в околицях міст Ізюм та Куп'янськ Харківського регіону.

Матеріали і методи досліджень. Для вивчення впливу військових дій на екосистеми Харківської області було використано комплексний підхід, який включає застосування сучасних методів супутникового моніторингу та аналізу даних, дослідження індексу нормалізованої різниці вегетації (NDVI) та аналіз геопросторових даних.

Використаний супутниковий моніторинг як один з найефективніших методів аналізу забруднення навколишнього природного середовища, особливо в контексті оцінки впливу лісових пожеж. Основними джерелами для моніторингу є супутники програм Sentinel (Copernicus), Landsat (NASA/USGS) та MODIS (NASA). Ці супутники оснащені спеціальними датчиками, що дозволяють вимірювати різні спектральні характеристики, включаючи інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове випромінювання. Супутник Sentinel-2 – це частина програми Європейського Союзу Copernicus, яка спрямована на моніторинг Землі та навколишнього середовища. Sentinel-2 складається з двох супутників (Sentinel-2A та Sentinel-2B), які працюють у тандемі, забезпечуючи отримання високоякісних зображень з частотою 5

днів. Супутники обладнані оптичними сенсорами MultiSpectral Instrument (MSI), які збирають дані в 13 спектральних діапазонах – від видимого світла до ближнього інфрачервоного. Супутники Sentinel-2 характеризуються високою просторово-часовою роздільною здатністю (10–60 м в залежності від каналу); постійним і безкоштовним доступом до даних через відкриті платформи, такі як Copernicus Open Access Hub та EO Browser; можливістю моніторингу різних аспектів екосистеми, включаючи рослинний покрив, водні ресурси, ґрунти та атмосферні явища. Платформа Copernicus EO Browser надає доступ до великого обсягу супутникових знімків, які дозволяють аналізувати зміни у землекористуванні, вегетаційному покриві та стані екосистеми. За допомогою супутникових даних Sentinel-2, які знімають у видимому та інфрачервоному спектрі, виявлено зміни в рослинному покриві та ідентифіковано ділянки, які зазнали значних ушкоджень внаслідок військових дій.

Для аналізу знімків і моніторингу рослинного покриву використано нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) – один із найпоширеніших вегетаційних індексів, що застосовується для оцінки стану рослинності. Це один з основних інструментів для оцінки змін у рослинному покриві. Використовуючи NDVI, можна проаналізувати стан рослинності, порівнюючи зображення до і після лісових пожеж або впливу іншого фактору. Високі значення NDVI вказують на густу, активну рослинність, тоді як низькі свідчать про пошкодження або її відсутність. Дистанційне зондування дозволяє відстежувати зміни у типах земельного покриву, таких як перетворення лісів на спалені ділянки. Це допомагає оцінити загальні екологічні втрати та відновлювальні процеси. За допомогою супутникового моніторингу є можливість збирати дані на регулярній основі, що дозволяє створювати динамічні карти змін навколишнього природного середовища та відстежувати відновлення після лісових пожеж.

NDVI розраховується на основі різниці між відбиттям світла в червоному спектрі (Red) та ближньому інфрачервоному спектрі (NIR):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

де NIR (near-infrared) – відбиття ближнього інфрачервоного світла, яке рослини активно відбивають;

Red – відбиття червоного світла, яке рослини переважно поглинають для фотосинтезу.

NDVI дозволяє кількісно оцінити стан рослинності на великих територіях і в різні часові періоди. Значення NDVI змінюються від -1 до +1:

- високі значення NDVI (0,6–0,9) свідчать про густий і здоровий рослинний покрив;

- низькі значення NDVI (0,2–0,4) вказують на деградовану або пошкоджену рослинність;

- значення, близькі до нуля або негативні, вказують на відсутність рослинного покриву (водні об'єкти, не засаджені ґрунти або міські території).

Індекс NDVI застосовується для оцінки впливу різних факторів на рослинність, а саме для вивчення впливу лісових пожеж. NDVI може виявити пошкодження рослинного покриву, спричинені пожежами. Порівняння NDVI до і після пожежі дає змогу оцінити площу пошкоджених ділянок і ступінь відновлення.

В умовах воєнних дій на території України, зокрема в Харківській області, моніторинг стану рослинного покриву є критично важливим для оцінки екологічних наслідків. Лісові пожежі, вирубка лісів та інші руйнівні фактори можуть значно вплинути на екосистему. Використання супутникових зображень Sentinel-2 разом із NDVI дозволяє:

- виявляти знищення рослинного покриву через бойові дії або інші техногенні чинники;
- стежити за відновленням екосистеми після військових конфліктів;
- проводити регулярний моніторинг земель, що зазнали впливу лісових пожеж або інших екологічних катастроф.

Таким чином, супутникові дані Sentinel-2 та індекс NDVI є важливими інструментами для оцінки стану рослинності та виявлення змін у довкіллі внаслідок як природних чи антропогенних факторів, так і при дослідженні впливу бойових дій на екосистему. Перевагами вибраного методу є значне охоплення території, що дозволяє аналізувати навіть важкодоступні місця; можливість швидко отримати актуальні дані; отримання кількісної інформації (площа ушкодженої рослинності), оцінка змін у часі, тощо.

Для аналізу та візуалізації зібраних даних використовувалися географічні інформаційні системи (ГІС). ГІС допомагають інтегрувати різні типи даних, включаючи супутникові знімки, топографічні карти та інші джерела геопросторової інформації. Це дозволяє створити комплексну картину змін у екосистемі та виявити найбільш постраждалі райони.

Ця методологія забезпечує комплексний підхід до оцінки впливу військових дій на екосистему та дозволяє розробити ефективні стратегії для відновлення постраждалих територій.

Опис регіону дослідження. Дослідження проводилося у Куп'янському та Ізюмському районах Харківської області. Ці райони були обрані через значні пошкодження інфраструктури та природних комплексів внаслідок військових дій. Географічні та екологічні особливості цих райо-

нів було враховано при аналізі зібраних даних. Куп'янський та Ізюмський райони розташовані в Харківській області, на сході України. Цей регіон характеризується помірно-континентальним кліматом із чітко вираженими сезонами: теплим літом та холодною зимою. Середньорічна температура коливається від +7 до +8°C, а середньорічна кількість опадів становить близько 500-600 мм. Куп'янський район має переважно рівнинний рельєф із невеликими пагорбами та долинами, тоді як Ізюмський район характеризується більш вираженим рельєфом із великою кількістю ярів та височин. Регіон перетинається численними річками, серед яких найбільшими є Оскіл та Сіверський Донець. Ці водні артерії відіграють важливу роль у підтримці місцевих екосистем і забезпеченні водними ресурсами. Ці райони багаті на лісові масиви та сільськогосподарські угіддя. Основні типи рослинності включають широколистяні та мішані ліси, степи, а також культурні ландшафти з полями зернових та олійних культур. Лісові масиви забезпечують притулок для різноманітних видів флори та фауни, багато з яких є ендемічними для цього регіону. Проте війна суттєво вплинула на природні комплекси, зокрема на ліси, які постраждали від пожеж та військових дій.

Куп'янський район Харківської області зазнав значних руйнувань та втрат внаслідок військових дій. Російські війська неодноразово обстрілювали цей район, завдаючи шкоди інфраструктурі та житловим будинкам. Внаслідок обстрілів постраждали як цивільні особи, так і об'єкти критичної інфраструктури. Військові дії в Куп'янському районі призвели до значних екологічних наслідків. Лісові масиви, які раніше були важливими екосистемами, зазнали серйозних ушкоджень через пожежі, спричинені обстрілами. Це призвело до втрати біорізноманіття та деградації ґрунтів. Відновлення цих територій вимагатиме значних зусиль та часу.

Ізюмський район також зазнав значних втрат і руйнувань. Місто Ізюм було окуповане російськими військами з квітня 2022 року до вересня 2022 року. За цей час місто зазнало численних авіаударів та артилерійських обстрілів, що призвело до значних руйнувань інфраструктури та житлових будинків. Внаслідок обстрілів касетними боеприпасами загинули цивільні особи та було поранено багато людей. Ці події мали значний вплив на екосистему регіону, зокрема на лісові масиви, які постраждали від пожеж та руйнувань. Окрім руйнувань інфраструктури, військові дії спричинили значні екологічні проблеми. Лісові пожежі, викликані обстрілами, знищили значні площі лісів, що призвело до втрати середовища існування для багатьох видів тварин та рослин. Крім того, забруднення ґрунтів та водних ресурсів

через використання важкої техніки та боєприпасів створило додаткові виклики для відновлення екосистеми.

Ці події підкреслюють важливість використання сучасних методів моніторингу та аналізу для оцінки впливу військових дій на екосистему. Супутникові дані та індекс NDVI є важливими інструментами для виявлення та оцінки ушкоджень, а також для планування заходів з відновлення постраждалих територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Війна в Україні, розпочата росією, має значні екологічні наслідки, які впливають на природне середовище, здоров'я людей та глобальну екологічну безпеку. Ці наслідки включають забруднення води, ґрунту, повітря, руйнування екосистем та загрозу біорізноманіттю.

Ліси України пошкоджуються пожежами, вибухами, порушенням ґрунту та пересуванням техніки. Понад 3 мільйони гектарів українських лісів постраждали, найбільше - Чернігівська, Сумська, Луганська, Київська, Житомирська та Харківська області [1]. Кількість пожеж потроїлася порівняно з минулими роками, часто через обстріли. Відновлення цих лісів займе десятиліття. Ключові виклики включають адаптацію до зміни клімату, боротьбу з інвазивними видами та управління ризиком пожеж. Війна загострила існуючі виклики, такі як зміна клімату, що підвищило ризик посух, шкідників та лісових пожеж. Ретельне планування та пріоритизація відновлення природних екосистем будуть вирішальними для повонесних зусиль України з відновлення цих земель.

Військові дії призвели до значного забруднення водних ресурсів та ґрунтів, що становить небезпеку для здоров'я людей та екосистем [2, 3].

Війна спричинила масштабні зміни та руйнування природних ландшафтів, включаючи ліси, степи та інші природні зони, що загрожує біорізноманіттю [4, 5].

Постійні пожежі, вибухи на промислових об'єктах та витіки шкідливих речовин у повітря призвели до значного забруднення атмосфери [6].

Захоплення та порушення правил експлуатації радіаційних об'єктів створюють серйозну загрозу радіаційної безпеки [3].

Дії окупантів кваліфікуються як екоцид, що включає забруднення водних об'єктів, руйнування екосистем та інші екологічні злочини [7].

Війна призвела до зменшення обсягів виробництва сільськогосподарської продукції, що вплинуло на продовольчу безпеку як в Україні, так і в інших країнах [8, 9].

Війна в Україні має серйозні екологічні наслідки [10-13], які включають забруднення води, ґрунту та повітря, руйнування природних ландшафтів та загрозу біорізноманіттю. Ці наслідки

впливають не лише на Україну, але й на глобальну екологічну безпеку. Важливо вживати заходів для оцінки та мінімізації цих наслідків, а також залучати міжнародну спільноту до відновлення екологічної безпеки.

Військові дії призводять до руйнування лісів, степів і природних ландшафтів, що загрожує рідкісним видам рослин і тварин, а також порушує екосистеми [21]. Військові дії призводять до руйнування лісових ландшафтів, включно з вирубною дерев, руйнуванням ґрунтового покриву і зміною рельєфу для будівництва укріплень. Унаслідок бойових дій у Донецькій і Харківській областях постраждали значні площі лісів і заповідників, що підтверджується даними дистанційного зондування [22, 23].

Унаслідок бойових дій постраждали об'єкти природно-заповідного фонду, такі як Чорноморський біосферний заповідник і Національний природний парк «Білобережжя Святослава» [19, 21].

Існує загроза ядерної катастрофи та підйом радіоактивного пилу внаслідок руху важкої техніки в зоні Чорнобиля та ударів по ядерних об'єктах [17]. Руйнування хімічних підприємств і складів нафтопродуктів призводить до викиду токсичних речовин у навколишнє середовище [18].

Відновлення природних екосистем займе десятиліття, а наслідки воєнних дій відчуватимуться ще довго після їх завершення [19, 20]. Збитки від екологічних злочинів росіян в Україні становлять понад 56 млрд. дол. [24].

Інтеграція правового захисту довкілля в доктрину збройних сил і спрямування ресурсів і досвіду на підтримку постраждалих громад можуть допомогти знизити шкоду, яку завдають довкіллю під час збройних конфліктів [14]. Для ефективнішого захисту навколишнього природного середовища під час збройних конфліктів необхідний новий правовий підхід, що визнає неподільність здорового довкілля та його важливість для виживання нинішнього і майбутніх поколінь [15].

У міжнародному праві передбачено спеціальні норми щодо захисту довкілля під час збройних конфліктів, однак для посилення захисту та забезпечення виживання цивільного населення необхідні більша ясність і розробка договірних правил [16].

Військові дії в Україні завдають значної шкоди навколишньому середовищу, зачіпаючи екосистеми, біорізноманіття, якість повітря і води, а також ґрунтові ресурси. Ці наслідки вимагають комплексного підходу до оцінки та відновлення, а також міжнародного співробітництва для мінімізації екологічних ризиків і забезпечення сталого розвитку в поствоєнний період.

Порівняння NDVI у різні періоди для оцінки змін у стані рослинності (район м.

Куп'янськ). Дослідження гістограм NDVI для району Куп'янська за 2021, 2022 і 2024 роки, отримані за допомогою супутникових знімків (рис. 1), підтверджують вплив бойових дій на екосистеми. Розраховано середні значення NDVI і стандартні відхилення для кожного року на основі даних і побудовано графік, що показує зміну NDVI в часі (рис. 2). На наведених графіках зображені розподіли індексу NDVI для регіону поблизу міста Куп'янськ у Харківській області, отримані на основі супутникових знімків за три різні дати: 15 вересня 2021 року, 15 вересня 2022 року та 19 вересня 2024 року.

По горизонтальній осі (рис. 1) відображені значення індексу NDVI, який коливається в межах від -1 до +1. Вищі значення NDVI (ближче до 1) свідчать про наявність густої і здорової рослинності, тоді як нижчі значення (ближче до -1) свідчать про відсутність рослинності або сильні пошкодження. По вертикальній осі (Frequency) відображено кількість пікселів на знімку, які мають відповідне значення NDVI. Чим вища частота (кількість), тим більше площа території з відповідним рівнем рослинного покриття.

На графіку за 2021 рік (15.09.2021) максимум частоти спостерігається для значень NDVI в межах від 0.2 до 0.5. Це свідчить про помірний рівень рослинності, з переважно здоровим покриттям, що типово для кінця літа – початку осені.

На графіку за 2022 рік (15.09.2022) видно значний зсув до нижчих значень NDVI. Пік розподілу розташований в районі значень 0.1–0.4, що свідчить про ослаблення або деградацію рослинного покриття. Вірогідно це пов'язано із бойовими діями, що призвели до пошкодження екосистеми.

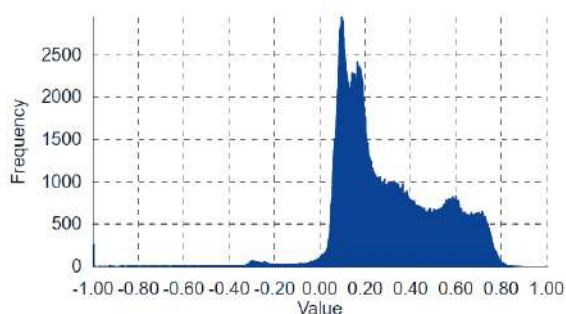
На графіку за 2024 рік (19.09.2024) відмічено відновлення, хоча пік NDVI знаходиться в діапазоні 0.2–0.5. Проте загальний рівень NDVI залишається нижчим порівняно з показниками 2021 року, що може свідчити про поступове відновлення рослинності після бойових дій, але ще не достатнє.

Діаграма розсіювання показує зміну середнього значення NDVI для району Куп'янська з 2021 по 2024 роки. Середні значення NDVI за 2021, 2022 та 2024 відповідно становлять: 0.35, 0.10 та 0.20 (рис. 2). Стандартні відхилення за ці ж роки: 0.15, 0.18 та 0.17. Аналіз відсоткової зміни NDVI показує:

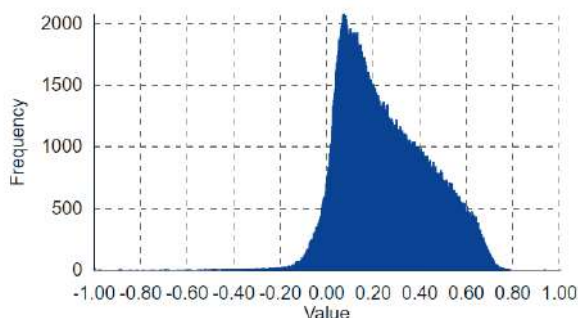
- Зниження NDVI з 2021 до 2022 року становить -71.43%. Це значне падіння, яке вказує на сильне пошкодження рослинності внаслідок військових дій і пожеж.

- Зміни з 2021 до 2024 року: -42.86%. Незважаючи на деяке зростання після 2022 року, рівень NDVI залишається нижчим за значення 2021 року, що свідчить про триваючий вплив на екологічну систему.

Sentinel-2 L1C - NDVI 15.09.2021



Sentinel-2 L1C - NDVI 15.09.2022



Sentinel-2 L1C - NDVI 19.09.2024

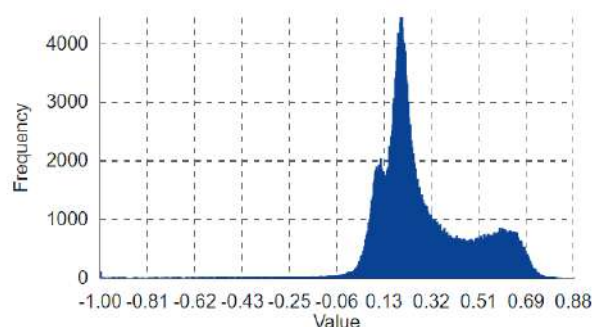


Рис. 1. Дослідження індексу NDVI за космічними знімками у районі Куп'янську Харківській області /
Fig. 1. Investigation of the NDVI index using satellite images in Kupiansk district of Kharkiv region

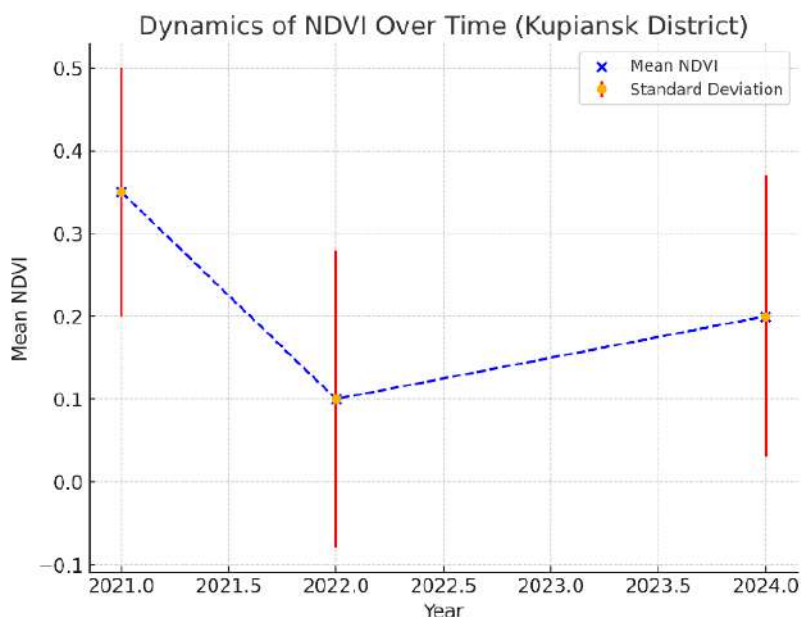


Рис. 2. Динаміка зміни середнього значення NDVI у часі (район Купянська, Харківська область) /
Fig. 2. Dynamics of changes in the average NDVI value over time (Kupiansk district, Kharkiv region)

Яскраво демонструє зменшення рослинності порівняльна гістограма розподілу NDVI (рис. 3): NDVI 2021 року має більший пік ближче до позитивних значень, тоді як розподіли за 2022 і 2024 роки зміщені ближче до 0, що свідчить про менший вегетативний покрив у ці роки. Цей графік відображає порівняння розподілу значень індексу NDVI для трьох різних років: 2021, 2022 та 2024. Його можна використовувати для аналізу змін у рослинному покриві за цей період. По горизонталі відкладено значення NDVI, які коливаються від -0.4 до 0.8. Значення NDVI є числовим показником густоти рослинного покриву. Вищі значення NDVI (ближче до 0.8) свідчать про густіший та життєздатний рослинний покрив, де рослини здорові та активно фотосинтезують.

Нижчі значення NDVI (ближче до 0 або навіть негативних значень) вказують на деградацію або відсутність рослинності. Це може свідчити про мертву рослинність або вплив негативних факторів, таких як лісові пожежі, бойові дії або засуха. По вертикалі (вісь Y) представлена частота значень (Density), тобто скільки разів певне значення NDVI зустрічається у відповідному році. Чим вище стовпчик, тим частіше зустрічаються ці значення NDVI у вибраний рік.

Аналіз гістограми дає можливість зробити такі висновки (рис. 3):

- Зелений розподіл NDVI (2021 рік) – більшість значень NDVI знаходяться у діапазоні від 0.2 до 0.6. Це свідчить про стабільний рослинний покрив, що був життєздатним у цей рік.

- Червоний розподіл NDVI (2022 рік) – розподіл зміщений вліво, з найбільшою частотою значень NDVI ближче до 0. Це свідчить про знач-

не зниження густоти рослинного покриву в порівнянні з 2021 роком. Можливо, це результат бойових дій чи інших екологічних катастроф.

- Синій розподіл NDVI (2024 рік) – продовжується тенденція зниження NDVI. Більшість значень знаходиться в діапазоні від 0 до 0.3, що свідчить про пошкоджений або навіть відсутній рослинний покрив. Це може бути наслідком тривалого впливу бойових дій та погіршення екологічної ситуації в регіоні.

Таким чином, на графіку чітко видно, як NDVI зменшується з 2021 по 2024 роки. Це може вказувати на значне погіршення стану рослинного покриву в регіоні, ймовірно, через вплив бойових дій. У 2021 році рослинність була в більш життєздатному стані, але у 2022 і 2024 роках спостерігається різке зниження кількості здорових рослин, що може бути пов'язано з лісовими пожежами, військовими діями або іншими екологічними факторами. Ці дані є корисними для моніторингу екологічних наслідків війни та планування заходів із відновлення екосистем.

Порівняння NDVI у різні періоди для оцінки змін у стані рослинності (район м. Ізюм). Аналогічним чином досліджуємо супутникові знімки району міста Ізюм (рис. 4). На графіках (рис. 5) показано розподіл NDVI за 2021, 2022 і 2024 роки.

Діаграма розсіювання показує динаміку середнього значення NDVI з 2021 по 2024 роки, яке становить для 2021, 2022 та 2024 року: 0.39, 0.20 та 0.29 відповідно (рис. 6). Стандартне відхилення: 0.15, 0.19 та 0.17. Гістограми дають можливість проаналізувати відсоткову зміну середнього значення NDVI:

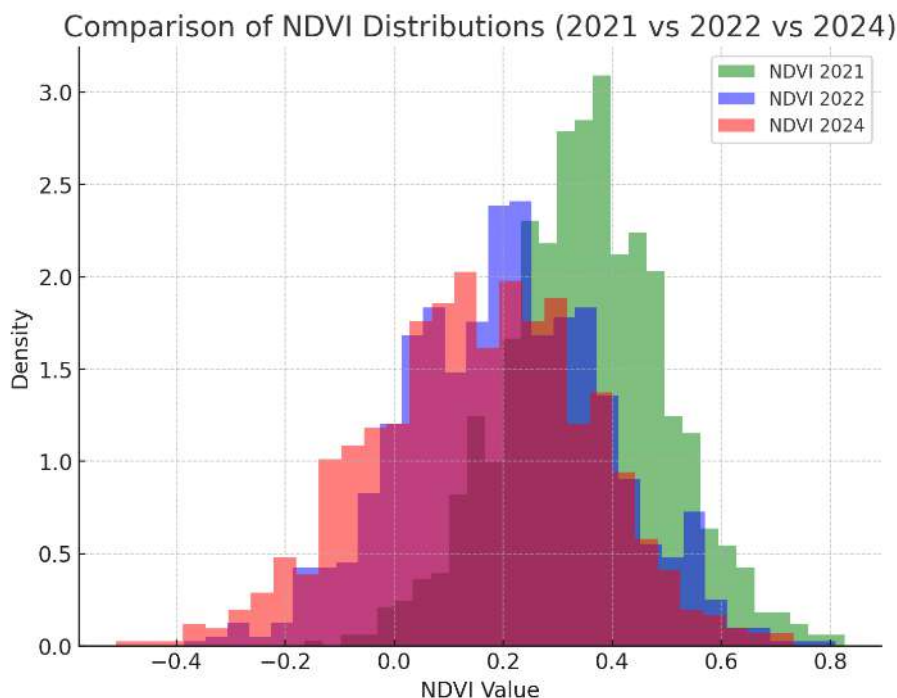


Рис. 3. Порівняння розподілу індексу NDVI для 2021, 2022 та 2024 років у районі Купянську Харківської області /
Fig. 3. Comparison of the distribution of the NDVI index for 2021, 2022 and 2024 in the Kupiansk district of Kharkiv region

- Падіння з 2021 до 2022 року становить - 48.44%. Це значне зниження, що вказує на серйозні пошкодження рослинності, ймовірно, спричинені воєнними діями та пожежами.

- Відновлення з 2021 до 2024 року - 26.05%. Незважаючи на часткове відновлення, рівень NDVI залишається нижчим, ніж 2021 року, що вказує на триваючий вплив на екологічну систему.

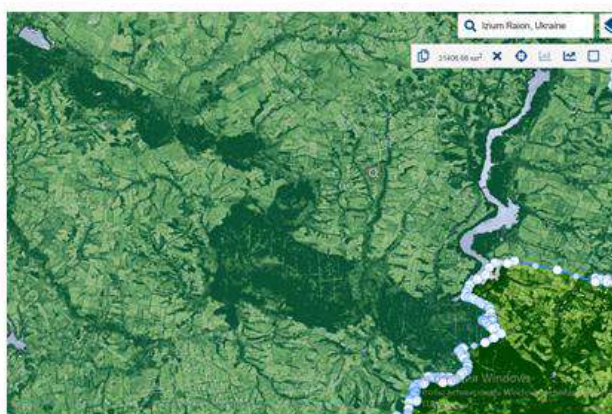
Порівняльна гістограма (рис. 7) дає підстави для наступного аналізу:

- 2021 рік (зелений). Цього року значення NDVI здебільшого перебувають у позитивному діапазоні (від 0.2 до 0.6), що вказує на життєздатну рослинність. Це контрольний стан

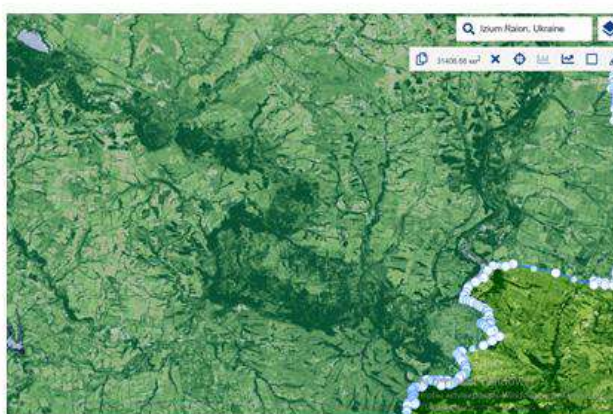
до початку інтенсивних військових дій.

- 2022 рік (синій). Видно, що значення NDVI зміщуються в бік менших значень і мають більше від'ємних значень порівняно з 2021 роком. Це може вказувати на пошкодження рослинності, спричинене військовими діями або пожежами.

2024 рік (червоний). Значення NDVI залишаються нижчими, ніж у 2021 році, але дещо вищими, ніж у 2022 році, що може свідчити про часткове відновлення рослинності. Проте щільність у діапазоні від 0 до 0.2 залишається високою, що вказує на пошкодження, що залишилися або наслідки пожеж.



2021



2024

Рис. 4. Супутникові знімки в районі міста Ізюм Харківської області за 2021 та 2024 роки /
Fig. 4. Satellite imagery of the Izyum district of Kharkiv region for 2021 and 2024

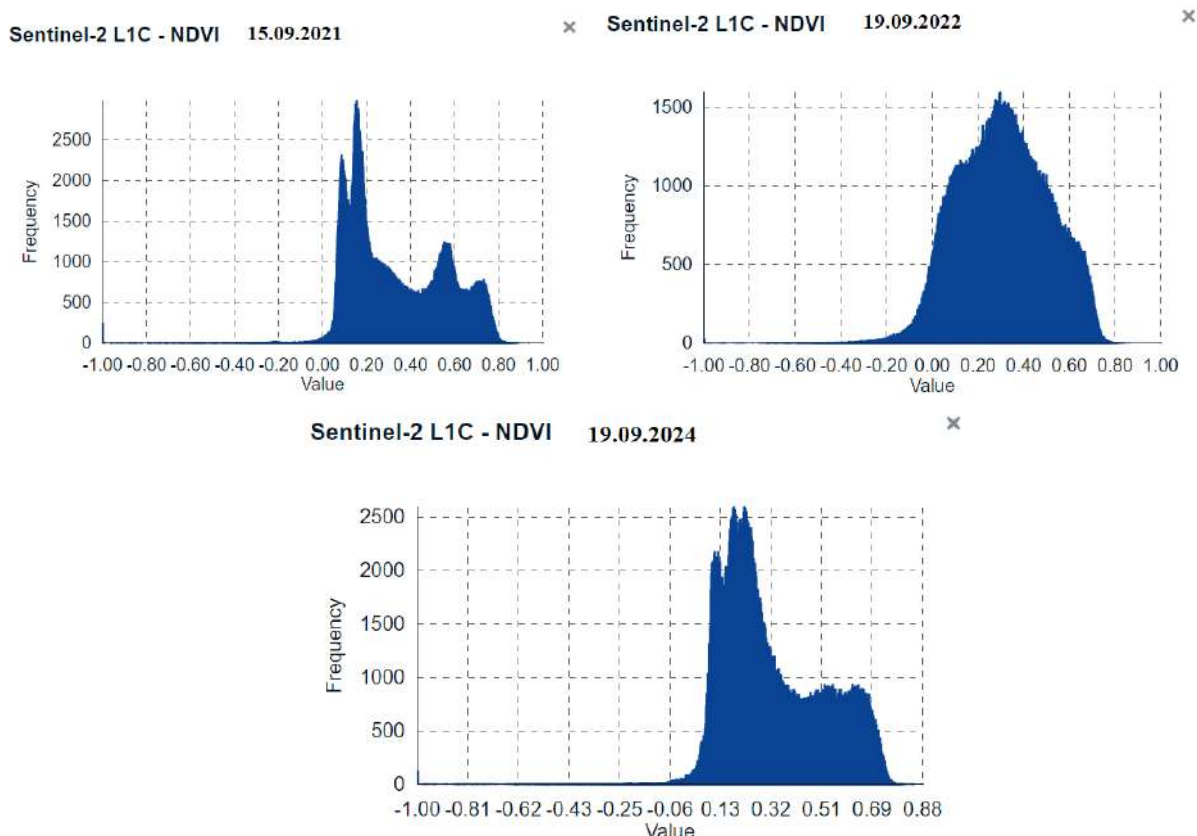


Рис. 5. Дослідження індексу NDVI за супутниковими знімками у районі Ізюму Харківській області /
Fig. 5. Investigation of the NDVI index using satellite images in the Izyum district of Kharkiv region

Таким чином, аналіз показує погіршення стану рослинності у 2022 році з частковим відновленням до 2024 року, але до рівня 2021 року вона ще не відновилася. Це вказує на довгострокові екологічні наслідки військових дій.

Обговорення. Результати аналізу змін NDVI у Харківській області, зокрема у районах Куп'янська та Ізюма, показують суттєве зниження рівня рослинного покриву під час активних військових дій. Порівняння з іншими дослідженнями, прове-

деними в Україні, демонструє аналогічні тенденції: у Донецькій та Луганській областях, де бойові дії тривали з 2014 року, було зафіксовано значне зниження NDVI, що свідчить про деградацію рослинного покриву внаслідок військових дій, пожеж, вирубування та забруднення. Військові дії призводять до пошкодження рослинного покриву через вибухи, пересування військової техніки та пожежі, спричинені обстрілами. Пожежі, спричинені воєнними діями, завдають значної шкоди при-

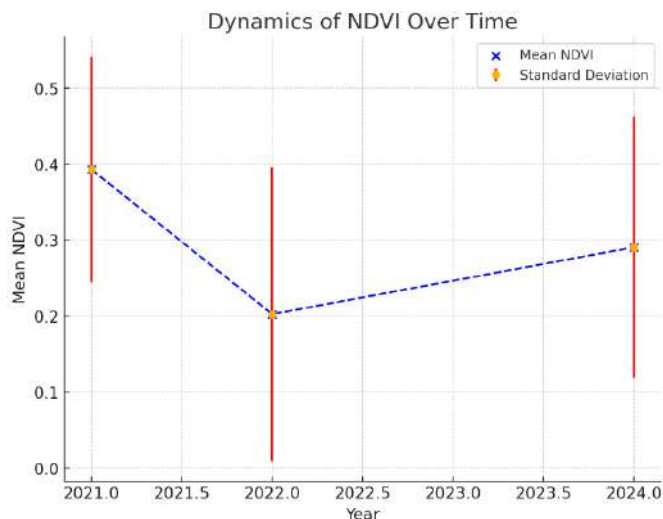


Рис. 6. Динаміка зміни середнього значення NDVI у часі (район Ізюма, Харківська область) /
Fig. 6. Dynamics of changes in the average NDVI value over time (Izyum district, Kharkiv region)

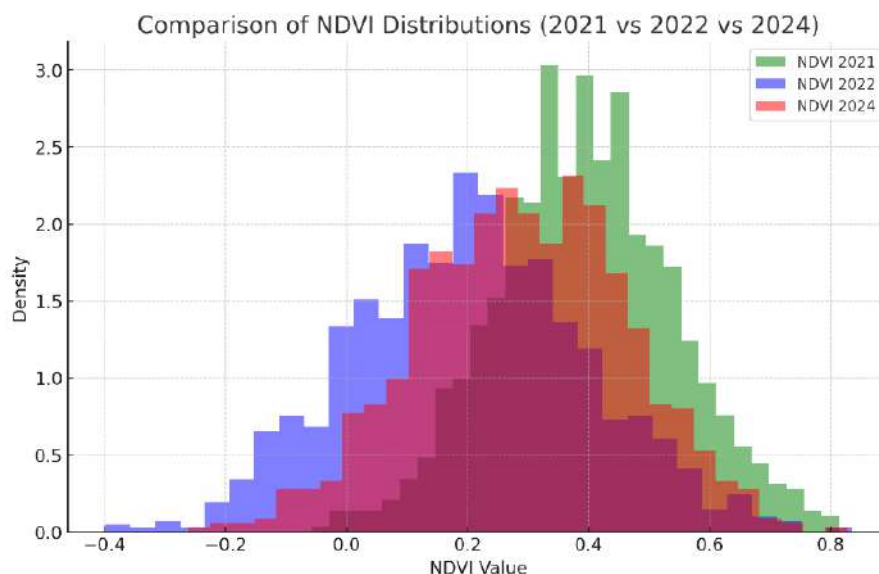


Рис. 7. Порівняння розподілу індексу NDVI для 2021, 2022 та 2024 років у районі м. Ізюм Харківської області/

Fig. 7. Comparison of the distribution of the NDVI index for 2021, 2022 and 2024 in the area of Izyum, Kharkiv region

родним територіям, включно із заповідниками та національними парками. Унаслідок бойових дій спостерігаються суттєві втрати сільськогосподарських угідь, особливо на землях, що не контролюються українським урядом, і в буферній зоні вздовж лінії конфлікту. Сільськогосподарські угіддя в цих регіонах скоротилися на 22% у неконтрольованих зонах і на 46% у буферній зоні [25].

Пошкодження критично важливих об'єктів інфраструктури, таких як фільтрувальні станції, може призвести до значних екологічних наслідків, включно з викидами небезпечних речовин [26].

Дослідження в інших постконфліктних зонах, таких як Ірак, Сирія та Афганістан, також вказують на подібні екологічні наслідки – втрата рослинності, ерозія ґрунтів та забруднення, що призводить до довготривалих змін в екосистемах [27].

Отриманий набір супутникових даних місії Sentinel-2 L2A містить інформацію щодо: дата збору даних, $NDVI_{min}$, $NDVI_{max}$, $NDVI_{mean}$ – мінімальне, максимальне та середнє значення NDVI, стандартне відхилення значень NDVI, $NDVI_{median}$ – медіанне значення NDVI.

Медіанний індекс $NDVI_{median}$ – це центральне значення в наборі вимірювань NDVI, яке ділить всі значення на дві рівні частини: 50% значень знаходяться вище, і 50% – нижче цього значення. Медіана є важливим показником, особливо в ситуаціях, коли набір даних може містити екстремальні або аномальні значення (наприклад, надмірно високі або низькі значення NDVI). Медіана менш чутлива до цих крайніх значень, ніж середнє (mean), і тому часто краще відображає "типове" значення для розподілу даних. У контексті

дослідження екосистем за допомогою NDVI медіана дозволяє отримати більш стійку оцінку стану рослинності в регіоні, оскільки вона не піддається впливу аномалій, таких як поодинокі випадки відсутності рослинності або поганих погодних умов. Такі індекси NDVI використані для графічного представлення результатів аналізу (рис. 8):

- $NDVI_{mean}$ – середній NDVI враховує всі значення в наборі даних і обчислює їх середнє арифметичне. Він може бути зміщений в бік аномально високих або низьких значень.

- $NDVI_{max}$ – максимальний NDVI представляє найвище значення індексу рослинності в даному регіоні або часовому інтервалі, але може бути відображенням лише поодиноких, локалізованих зон густої рослинності.

- $NDVI_{median}$ на відміну від середнього, дає більш надійний показник, який відображає загальний стан рослинності без впливу екстремальних значень, і є важливим для оцінки здоров'я рослинності в умовах, коли екосистеми можуть бути нерівномірно розподілені.

Використання медіани NDVI дозволяє більш точно оцінити стан екосистеми на основі супутникових даних, надаючи стабільнішу картину, особливо в умовах з аномальними факторами, такими як бойові дії. Після початку війни можна помітити зниження NDVI, що може свідчити про початковий вплив бойових дій на екосистему. Це стосується як середніх, так і максимальних значень NDVI. У 2023 році рослинність частково відновилася, однак середні значення NDVI все ще нижчі, ніж до війни, що може свідчити про тривалий вплив бойових дій на певні регіони. У 2024

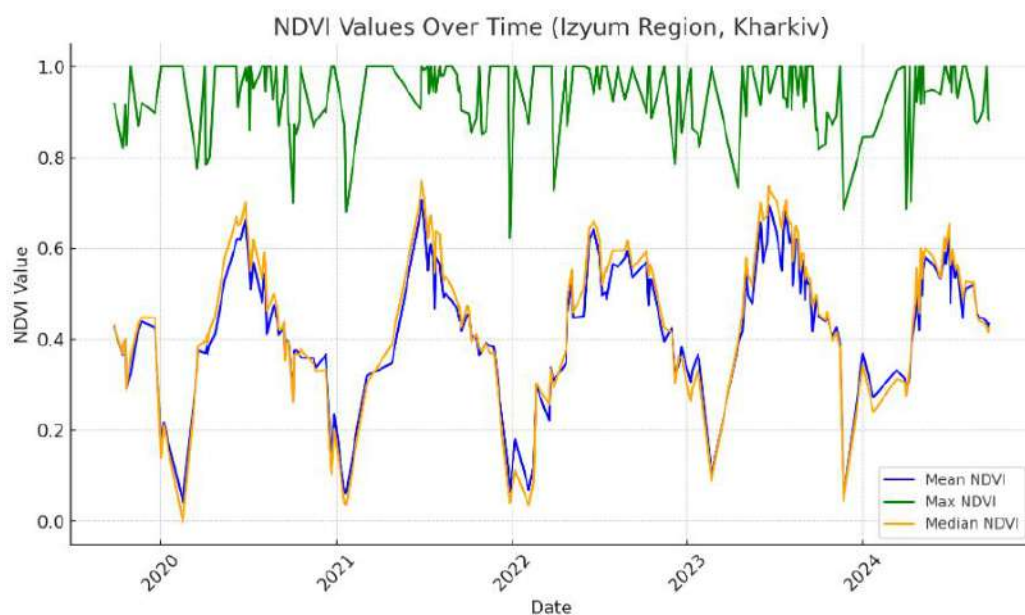


Рис. 8. Динаміка середніх, максимальних і медіанних значень NDVI у районі м. Ізюм Харківської області/

Fig. 8. Dynamics of average, maximum and median NDVI values in the area of Izyum, Kharkiv region

році NDVI залишається нижчим, ніж до війни, особливо в ранні місяці, є ознаки поступового відновлення, хоча максимумами ще не досягли рівня до 2022 року.

Для візуального представлення результатів впливу бойових дій для дослідженого району побудовано теплову карту значень NDVI, яка показує тенденції змін рослинності протягом певного періоду (рис. 9).

Теплова карта була створена шляхом побудови матриці, де по горизонтальній осі розташовані роки, а по вертикальній – місяці. Значення всередині матриці – це середні значення NDVI для кожного місяця та року. Для візуалізації використовувалась колірна шкала: світліші кольори вказують на нижчі значення NDVI, темніші – на вищі. Для побудови карти використовувався алгоритм візуалізації heatmap з бібліотеки Seaborn (модуль Python для наукових візуалізацій). Колірна палітра підкреслює варіації NDVI (від світло-жовтого до темно-зеленого/синього).

Теплова карта наочно відображає середні значення NDVI для кожного місяця з 2020 до 2024 року. Кольори варіюються від більш світлих (менше значення NDVI) до темніших (вищі значення), що допомагає візуалізувати зміни в рослинності протягом різних місяців і років. Як видно з рисунку 9, можна легко ідентифікувати періоди з підвищеною або зниженою рослинністю, що, ймовірно, відповідає сезонним змінам або наслідкам бойових дій у регіоні. На тепловій карті чітко видно циклічні зміни, пов'язані з сезонами. Весняно-літні місяці традиційно мають вищі значення NDVI (темніші кольори), що відповідає

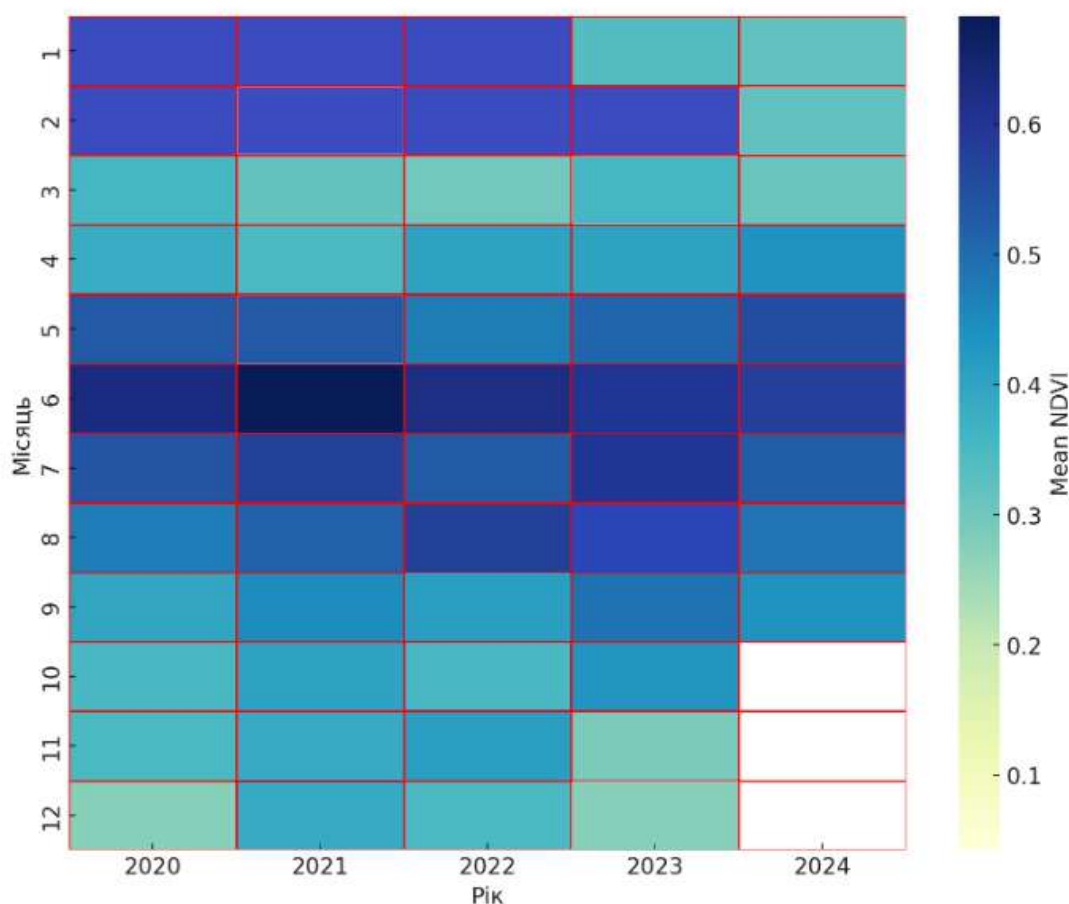
періодам активного росту рослинності. Осінньо-зимові місяці мають нижчі значення NDVI (світліші кольори), що очікувано для холодного сезону з меншою біологічною активністю. До лютого 2022 року, тобто до початку бойових дій, екосистема демонструвала регулярні сезонні коливання. Після початку бойових дій на тепловій карті можна помітити різке зниження значень NDVI навесні та влітку 2022 року. Це вказує на те, що рослинність у регіоні зазнала негативного впливу, ймовірно, через бойові дії, такі як обстріли, пожежі, руйнування інфраструктури та забруднення ґрунтів і води. Це зниження може бути наслідком прямих пошкоджень екосистеми або порушень аграрних і лісових систем.

Таким чином зниження NDVI у весняно-літній період 2024 року може свідчити про серйозний негативний вплив бойових дій на рослинність та загальний екологічний стан регіону. У нормальних умовах ці місяці мали б демонструвати підвищення NDVI через активний ріст рослин, але цього не відбулося, що вказує на погіршення екологічної ситуації. Це також може свідчити про зміну використання земель через бойові дії, що призвело до деградації екосистеми.

Обговорення можливих причин змін NDVI.

Зниження NDVI у районі Куп'янська та Ізюма можна пояснити кількома ключовими факторами:

1. Активні бойові дії призводять до руйнування природних ландшафтів, збільшення кількості порушень ґрунту і винищення рослинного покриву. Бомбардування, мінування та рух важкої техніки знищують рослинні угруповання і сприяють ерозії ґрунтів, що унеможливорює швидке від-



NDVI

Рис. 9. Динаміка середніх, максимальних і медіанних значень NDVI у районі м. Ізюм Харківської області (Теплова карта середніх NDVI по місяцях) / Fig. 9. Dynamics of average, maximum and median NDVI values in the area of Izyum, Kharkiv region

новлення рослинності.

2. Військові дії часто супроводжуються масштабними пожежами, які охоплюють значні території. Пожежі в районі Куп'янську та Ізюму, зафіксовані супутниковими знімками, призвели до знищення великих площ лісових масивів та заплавлених лук, що відображається в зниженні показників NDVI. Після таких пожеж екосистеми потребують тривалого періоду для відновлення, оскільки змінюється склад ґрунтів, а насіння і коріння рослин гинуть.

3. Інтенсивне використання вибухівки, пального і хімічних речовин забруднює ґрунти і води. Токсичні речовини можуть знижувати родючість ґрунтів та впливати на здатність рослинного покриву до регенерації. Відповідно, зниження NDVI може бути пов'язане не лише зі знищенням рослинності, але й з погіршенням умов для її відновлення.

Аналіз супутникових даних за період з 2020 до 2024 року показує, що після активних військових дій рослинний покрив у районі Куп'янську та Ізюму починає поступово відновлюватися. Однак темпи цього процесу залишаються повільними,

що можна пояснити значним забрудненням ґрунтів та частими пожежами. Порівняння з іншими постконфліктними регіонами свідчить про те, що природні екосистеми можуть відновлюватися протягом десятиліть, особливо якщо не буде реалізовано заходів щодо очищення територій та рекультивації.

Прогнозування подальшого розвитку ситуації передбачає, що без активних заходів з екологічної реабілітації цих територій відновлення рослинності буде обмеженим. На основі аналізу NDVI можна зробити висновок, що райони, які зазнали меншого впливу або не були охоплені пожежами, мають вищий потенціал для відновлення, тоді як зони, де відбулися масштабні пожежі та забруднення, потребуватимуть значного втручання для реабілітації.

Таким чином, необхідно розробити стратегію екологічного відновлення для Харківської області, яка враховуватиме як очищення територій від забруднень, так і заходи зі сприяння відновленню рослинного покриву.

Висновки. 1. Дослідження виявило значну деградацію екосистем Куп'янського району вна-

лідок військових дій. Аналіз NDVI показав істотне зменшення рослинного покриву протягом 2022–2024 років. Постраждали ліси та сільськогосподарські угіддя, де виявлено зниження біопродуктивності і пошкодження значних площ земель.

2. Війна спричинила масштабне знищення природних територій через військові дії, пожежі та руйнування інфраструктури. Це призвело до довготривалих змін у біорізноманітті та стабільності екосистем. Отримані дані є критично важливими для розробки стратегій відновлення та подальшого моніторингу постраждалих територій, адже дозво-

ляють точно оцінити ступінь пошкоджень.

3. Подальші дослідження повинні зосередитися на деталізації оцінки ступеня деградації ґрунтів, водних ресурсів та лісових масивів. Необхідно розробити комплексну програму екологічного відновлення, що включатиме заходи зі заліснення, відновлення ґрунтів, та очищення водою. Важливо інтегрувати супутникові методи моніторингу у довгострокові програми для контролю за прогресом відновлення екосистем.

This project was supported by Documenting Ukraine, a project of the Institute for Human Sciences, IWM Vienna.

Список використаної літератури

1. Пацев І. С. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини / Пацев І. С.; Барабаш, О. В.; Пацева, І. Г. // Науково-практичний журнал «Екологічні науки», 2023. - 5(50). - С. 114-118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16>
2. Скакун В. Економічні підходи до оцінювання екологічних наслідків війни в Україні / Скакун В., Чинчик А., Страхов А. // Шляхи підвищення ефективності будівництва, 2023. - 2(50). - С. 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280)
3. Khrushch O. Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine / Khrushch O., Moskalets V., Fedyk O., Karpiuk Y., Hasiuk M., Ivantsev N., Ivantsev L., Arjjumend H. // Grassroots Journal of Natural Resources, 2023. - Vol. 6, No. 1 (April 2023). - P. 37-84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
4. Sobol S. The influence of the Russian invasion on the territory of Ukraine on the environmental and general social situation // World-Ger Conference proceedings, 2023. - 1(gec28-01). - P. 58–60. <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-28-01-010>
5. Гнедіна К. Загрози екологічній безпеці: реалії воєнного часу та економічне стимулювання повоєнного екологічного відновлення України / Гнедіна К., Нагорний П. // Проблеми і перспективи економіки та управління, 2023. - (4 (32)). - С. 39–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4\(32\)-39-52](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4(32)-39-52)
6. Gardashuk T. Environmental Threats of War in Ukraine // Envigogika, 2022. - 17(1) <https://doi.org/10.14712/18023061.639>
7. Латишева О. В. Дослідження соціальних та екологічних втрат від війни в Україні / Латишева О. В., Ровенська В. В., Смирнова І. І., Міхеев О. Ю. // Економічний вісник Донбасу, 2023. - 2 (68). - С. 199–205. [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2\(68\)-199-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2(68)-199-205)
8. Brankov T., Armed conflict in Ukraine: food security and environmental implications / Brankov, T., Puškarić, A. // Ekonomika poljoprivrede, 2023. - 70(3). <https://doi.org/10.59267/ekoPolj2303773B>
9. Kapelista I. The Impact of the Russian-Ukrainian War on Global Food and Environmental Security / Kapelista, I., Korniyenko, G., Skliar, V., Voitsitska, K., Derman, V. // WSEAS transactions on environment and development, 2023. - Vol. 19. - P. 808-819. <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.76>
10. Krainiuk O. V. Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine / Krainiuk O. V., Buts Y. V., Didenko N. V., Barbashyn V. V. // European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov. 2023, Volume 2023. - P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
11. Буц Ю. В. Постпірогенна трансформація біогеохімічних властивостей сірих лісових ґрунтів при техногенному навантаженні / Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Лоцман П. І., Сенчихін Ю. М. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Екологія», 2022. - Вип. 27. - С. 63-71. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-05>
12. Buts Yuriy. Техногенно-екологічні аспекти пірогенного впливу на довкілля / Buts Yuriy, Krainiuk Olena // International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia 2023. – P. 238-259. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7825520>, <http://www.ndekc.lviv.ua/pdf/267.pdf>
13. Буц Ю. В. Вплив небезпечних токсичних факторів пожеж при військових діях на екосистеми і життєдіяльність населення / Буц Ю. В., Крайнюк О. В., Сенчихін Ю. М., Барабаш В. В., Трішина О. О. // Комунальне господарство міст. Науково-технічний збірник. Серія: Технічні науки та архітектура, 2023. Том 6 випуск 180'2023. - С. 196-202. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201>
14. Maurer P. Protecting the Natural Environment in Armed Conflict. Environmental Policy and Law, 2021. - Vol. 51, No. 1-2. - Pp. 21-24. <https://doi.org/10.3233/EPL-219003>
15. Loets A. Protection of the Environment in Times of Armed Conflict: In Search of a New Legal Perspective // Leiden Journal of International Law, 2020. - 8. - P. 7-40. <https://doi.org/10.1017/S0922156500003083>
16. Соколова Н. А. Международная защита окружающей среды в период вооруженных конфликтов: традиции правового регулирования и новеллы толкования // Lex Russica, 2021. - 74(12). - С. 84-95 <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.181.12.084-095>

17. Skakun, V. Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine / Skakun V., Chynchyk A., Strakhov A. // Ways to Improve Construction Efficiency, 2023. 2(50), 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280)
18. Paranjak R. Problems of environmental protection as an aspect of military confrontation / Paranjak, R., Gutyj, B., Lytvyn, N., Didorenko, Y. // Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences, 2023.- 25(98), 200-207. <https://doi.org/10.32718/nvvet-a9832>
19. Blahopoluchna A. Environmental and economic damage from the full-scale military invasion of Russia in Ukraine / Blahopoluchna A., Liakhovska N., Parakhnenko V. // Economies' Horizons, 2022. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.3\(21\).2022.263572](https://doi.org/10.31499/2616-5236.3(21).2022.263572)
20. Padányi J. The Effects of Armed Conflicts on the Environment / Padányi J., Földi L. // Contemporary military challenges. Sodobni vojaški izzivi, 2023. - 25. - P. 37-52. <https://doi.org/10.2478/cmc-2023-0004>
21. Makarenko N. The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies / Makarenko, N., Strokal, V., Berezhniak, Y., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovska, O., Ladyka, M., Kovpak, A. // Naukovi Dopovidi Natsional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni, 2022. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003>
22. Nahorna N. The impact of hostilities on the conservation areas of Donetsk region // Physical Geography and Geomorphology, 2023. - 46(1). - P. 47–53. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05>
23. Trofymchuk O. Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods / Trofymchuk O., Vishnyakov V., Sheviakina N., Klymenko V., Zahorodnia S. // SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings, 2023. – 23(2.1) <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20>
24. Нальотов. Д. Екологічне спустошення від війни: проблеми, які будуть вирішуватись поколіннями, 2024 <https://www.pravda.com.ua/columns/2024/09/26/7476908/>
25. Skakun S. Satellite Data Reveal Cropland Losses in South-Eastern Ukraine Under Military Conflict / Skakun S., Justice C., Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M. // Frontiers in Earth Science, 2019. - 7. - P. 305. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00305>
26. Ulytsky O. Risk of man-made and ecological disasters at the filter stations in the Donetsk and Luhansk regions / Ulytsky, O., Yermakov, V., Buglak, O., Lunova, O. // Journal of Geology, Geography and Geoecology, 2018. - 27(1), 138-147. <https://doi.org/10.15421/111839>
27. Bildirici M. The impact of terrorism and FDI on environmental pollution: Evidence from Afghanistan, Iraq, Nigeria, Pakistan, Philippines, Syria, Somalia, Thailand and Yemen / Bildirici, M., & Gokmenoglu, S. // Environmental Impact Assessment Review, 2020. - 81. - 106340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106340>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis

Olena Krainiuk¹

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Metrology and Life Safety,

¹ Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;

Yuriy Buts²

DSc (Technical), Professor of the Department of Metrology and Life Safety,

² Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

Vitalii Barbashyn³

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Occupational Health and Safety,

³ O.M. Beketov Kharkiv National University of Urban Economy, Kharkiv, Ukraine;

Olga Nikitchenko³

PhD (Technology), Associate Professor of the Department of Occupational Health and Safety;

Valerii Sukhov⁴

PhD, Head of the Department of Fundamental and Applied Geology,

⁴ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. The article investigates the degradation of ecosystems in the Kharkiv region due to military actions, specifically in Kupiansk and Izyum districts. The destruction of plant cover and natural landscapes, exacerbated by fires and other war-related damages, poses long-term ecological challenges. The purpose of the study is to assess these impacts through satellite monitoring using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to identify the most affected areas and plan for their ecological restoration.

Materials and Methods of Research. The research utilizes satellite images from the Copernicus Sentinel-2 platform to analyze changes in NDVI values between 2021 and 2024. This methodology allows for the detection of vegetation degradation in the studied areas and employs Geographic Information Systems (GIS) to map and visualize the extent of environmental damage. NDVI indices are analyzed for variations over time, providing insights into the effects of military actions on the region's vegetation.

Results. The results of the study indicate a dramatic reduction in NDVI values in the Kupiansk and Izyum districts, particularly in 2022, which coincided with the height of military activities in the region. NDVI values in 2022 showed a 48% decrease compared to 2021, reflecting the extensive loss of vegetation due to forest fires, bombings, and the movement of heavy military equipment, which caused both direct destruction and secondary effects such as soil compaction and erosion. In 2024, some recovery in NDVI values was observed, but these remained significantly lower than pre-war levels, indicating that full ecological recovery has not yet been achieved. The study further identified key ecological hotspots where vegetation loss was most severe, particularly in areas close to conflict zones, such as military bases and frontlines. The analysis showed that forested areas suffered the greatest damage, with significant portions of these ecosystems either destroyed or severely degraded. The GIS-based analysis also revealed a correlation between the intensity of military actions and the degree of vegetation loss, with the most severely affected areas being those that experienced sustained bombardment and heavy combat. The data suggest that the recovery of these areas will require substantial effort, including reforestation, soil remediation, and the implementation of erosion control measures to prevent further degradation.

Conclusions. 1). The war has led to significant environmental damage in the Kharkiv region, with substantial loss of vegetation cover and ecosystem services. 2). The NDVI analysis highlights the most affected areas, showing both the immediate and lingering effects of war on plant cover. 3). Continued monitoring and a comprehensive ecological restoration strategy are necessary to restore the region's natural landscapes, with reforestation and soil recovery being critical components. This study provides a crucial foundation for further research on the ecological impacts of warfare and offers practical recommendations for the restoration of war-torn ecosystems in Ukraine. The findings can be applied to other conflict-affected regions, emphasizing the need for a proactive approach to environmental recovery in post-war scenarios.

Keywords: *Kharkiv region, military impact, ecosystem degradation, NDVI, satellite monitoring, vegetation cover, ecological restoration, forest fires, GIS, post-war recovery.*

References

1. Patsev, I.S.; Barabash, O.V.; Patseva, I.G. (2023) *Impact of military actions on forest ecosystems of Zhytomyr region. Scientific and Practical Journal 'Ecological Sciences'*, 5(50). 114-118. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16> [in Ukrainian]
2. Skakun V. Chynchyk, A., Strakhov, A. (2023) *Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine. Improve Construction Efficiency*, 2(50). 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280) [in Ukrainian]
3. Khrushch, O., Moskalets, V., Fedyk, O., Karpiuk, Y., Hasiuk, M., Ivantsev, N., Ivantsev, L., & Arjjumend, H. (2023). *Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. Grassroots Journal of Natural Resources*. 6, 1 (April 2023), 37-84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
4. Sobol, S. (2023). *The influence of the russian invasion on the territory of ukraine on the environmental and general social situation. World-Ger Conference proceedings*, 1(gec28-01). 58–60 <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2023-28-01-010>
5. Hnedina, K., Nahorni, P. (2022). *Threatsto ecological safety: realities of wartime and economic stimulation of post-war ecological restoration of Ukraine. Problems and prospects of economics and management*, (4 (32). 39–52. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4\(32\)-39-52](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2022-4(32)-39-52) [in Ukrainian]
6. Gardashuk, T. (2022). *Environmental Threats of War in Ukraine. Envigogika*, 17(1). <https://doi.org/10.14712/18023061.639>
7. Latysheva, O., Rovenska, V., Smirnova, I., Mikheev, O. (2022). *Research of Social and Ecological Losses from the War in Ukraine. Economic Herald of the Donbas*, 2 (68). 199–205 [https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2\(68\)-199-205](https://doi.org/10.12958/1817-3772-2022-2(68)-199-205) [in Ukrainian]
8. Brankov, T., Puškarić, A. (2023). *Armed conflict in ukraine: food security and environmental implications. Ekonomika poljoprivrede*, 70(3). <https://doi.org/10.59267/ekopolj2303773b>
9. Kapelista, I., Korniyenko, G., Skliar, V., Voitsitska, K., & Derman, V. (2023). *The Impact of the Russian-Ukrainian War on Global Food and Environmental Security. WSEAS transactions on environment and development*, 19. P. 808-819 <https://doi.org/10.37394/232015.2023.19.76>
10. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Didenko N. V., Barbashyn V. V. (2023). *Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine. // European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov. 2023, 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
11. Buts Y.V., Krainiuk O.V., Lotsman P.I., Senchikhin Y.M. (2022). *Post-pyrogenic transformation of biogeochemical properties of grey forest soils under anthropogenic load Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University and V.N.*

- Karazin Moscow State University, Series «Ecology», 27. 63-71. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-05> [in Ukrainian]
12. Buts Yuriy, Krainiuk Olena (2023). Technogenic and ecological aspects of pyrogenic impact on the environment. *International security studios: managerial, economic, technical, legal, environmental, informative and psychological aspects. International collective monograph. Georgian Aviation University. Tbilisi, Georgia.* 238-259. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7825520>, ISSN 1512-4916, <http://www.ndekc.lviv.ua/pdf/267.pdf>
 13. Buts Y.V., Krainiuk O.V., Senchikhin Y.M., Barbashyn V.V., Trishina O.O. (2023) The impact of dangerous toxic factors of fires during military operations on ecosystems and human activity. *Municipal Economy of Cities. Scientific and technical collection. Series: Technical sciences and architecture*, 6, 180. 196-202. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-6-180-196-201> [in Ukrainian]
 14. Maurer, P. (2021). Protecting the Natural Environment in Armed Conflict. *Environmental Policy and Law*. 51, 1-2, 21-24. <https://doi.org/10.3233/EPL-219003>
 15. Loets A. (2020). Protection of the Environment in Times of Armed Conflict: In Search of a New Legal Perspective. *Leiden Journal of International Law*, 8, 7-40. <https://doi.org/10.1017/S0922156500003083>.
 16. Sokolova, N. (2021). International Environmental Protection in Armed Conflicts: Traditional Legal Regulation and Interpretation Novelties. *Lex Russica*, 74(12). 84-95 <https://doi.org/10.17803/1729-5920.2021.181.12.084-095>. [in Ukrainian]
 17. Skakun, V., Chynchyk, A., & Strakhov, A. (2023). Economic approaches to assessing the environmental consequences of the war in Ukraine. *Ways to Improve Construction Efficiency*, 2(50), 266–280. [https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50\(2\).266-280](https://doi.org/10.32347/2707-501x.2022.50(2).266-280).
 18. Paranjak, R., Gutty, B., Lytvyn, N., Didorenko, Y. (2023). Problems of environmental protection as an aspect of military confrontation. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 25(98), 200-207. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-a9832>.
 19. Blahopoluchna, A., Liakhovska, N., & Parakhnenko, V. (2022). Environmental and economic damage from the full-scale military invasion of russia in Ukraine. *Economies' Horizons*. [https://doi.org/10.31499/2616-5236.3\(21\).2022.263572](https://doi.org/10.31499/2616-5236.3(21).2022.263572)
 20. Padányi, J., & Földi, L. (2023). The Effects of Armed Conflicts on the Environment. *Contemporary military challenges/sodobni vojaški izzivi*, 25, 37-52. <https://doi.org/10.2478/cmc-2023-0004>
 21. Makarenko, N., Stokal, V., Berezhniak, Y., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovska, O., Ladyka, M., & Kopyak, A. (2022). The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies. *Naukovì Dopovidì Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni*. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003>
 22. Nahorna, N. (2023). The impact of hostilities on the conservation areas of Donetsk region. *Physical Geography and Geomorphology*. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.05>
 23. Trofymchuk, O., Vishnyakov, V., Sheviakina, N., Klymenko, V., Zahorodnia, S. (2023). Detection of surface soil disturbance areas as a result of military actions in Ukraine by remote sensing methods. *sgem International Multidisciplinary Scientific GeoConference. EXPO Proceedings*, 23(2.1). <https://doi.org/10.5593/sgem2023/2.1/s08.20>
 24. Nalitov, D. Environmental devastation from war: problems that will be solved for generations, 2024 <https://www.pravda.com.ua/columns/2024/09/26/7476908/> [in Ukrainian]
 25. Skakun, S., Justice, C., Kussul, N., Shelestov, A., Lavreniuk, M. (2019). Satellite Data Reveal Cropland Losses in South-Eastern Ukraine Under Military Conflict. *Frontiers in Earth Science*, 7, 305. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00305>.
 26. Ulytsky, O., Yermakov, V., Buglak, O., Lunova, O. (2018). Risk of man-made and ecological disasters at the filter stations in the Donetsk and Luhansk regions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(1), 138-147. <https://doi.org/10.15421/111839>.
 27. Bildirici, M., & Gokmenoglu, S. (2020). The impact of terrorism and FDI on environmental pollution: Evidence from Afghanistan, Iraq, Nigeria, Pakistan, Philippines, Syria, Somalia, Thailand and Yemen. *Environmental Impact Assessment Review*, 81, 106340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106340>.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 October 2024

Accepted 9 November 2024

Econometric modeling and forecasting of environmental conditions of cities and population health problems: case study of Navoi and Zarafshan cities

*Normurod Latipov*¹

PhD, Department Basics of Geography and Economic Knowledge,

¹ Navoi State University, Navoi, Uzbekistan,

e-mail: latipovnormurod@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5372-2320>;

*Nilufar Komilova*²

DSc, Professor, Department of Economic and Social Geography,

² National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent, Uzbekistan,

e-mail: n.komilova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-0848-717X>;

*Bakhodirjon Makhmudov*²

PhD student, Department of Economic and Social Geography,

e-mail: bi.makhxmudov@nuu.uz, <https://orcid.org/0000-0001-6128-4500>;

*Khayriddin Berdiev*³

PhD, Associate Professor, Department of History,

³ Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan,

e-mail: khayriddinberdiev26@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7790-9912>;

*Mehrdad Moslemzadeh*⁴

PhD, Associate Professor, Department of Environmental Health, School of Health,

⁴ Guilan University of Medical Sciences, Rasht, Iran,

e-mail: mehrdadmoslemzadehbk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2835-8886>;

*Suhrob Chulliyev*¹

PhD, Associate Professor, Department Basics of Geography and Economic Knowledge,

e-mail: sukhrobrchulliev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6442-410X>;

*Isabek Murtazayev*²

PhD, Senior Lecturer, Department of Economic Theory,

e-mail: isabekmurtazayev2@nuu.uz, <https://orcid.org/0009-0005-9012-1918>;

*Mukhtor Hamroyev*⁵

Department of Geodesy, Cartography and Geography,

⁵ Urgench State University, Urgench, Uzbekistan,

e-mail: mukhtorkhamraev@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-4178-3590>

ABSTRACT

This study explores the connection between atmospheric emissions of harmful substances and population morbidity indicators in Navoi and Zarafshan, two highly industrialized cities in Uzbekistan's arid climate. With industrialization in arid environments presenting unique health risks, the research seeks to deepen scientific understanding of pollution-related health impacts specific to these cities. Identifying the health effects of air pollution in urbanized, dry regions not only advances scientific knowledge but also informs public health policies, contributing to the UN Sustainable Development Goal (SDG) 11.

A review of recent studies shows extensive evidence linking industrial air pollution to adverse health effects, such as respiratory, cardiovascular, and immune system issues. However, few studies focus specifically on the unique challenges faced by industrial cities in arid regions like Navoi and Zarafshan, where pollutant types and environmental interactions may differ significantly. Existing research associates industrial emissions with general morbidity rates, yet it lacks detailed analyses of how pollutants specifically affect health outcomes in arid climates.

Unresolved aspects of the problem include a generalized approach in correlating air pollution with health deterioration without considering how pollutants impact health differently across various climatic and environmental contexts. The effects of pollution in arid regions, with distinct pollutant composition and dispersal patterns, remain underexamined in current environmental health research.

The primary goal of this research is to quantify and evaluate the relationships between industrial air pollutants and morbidity indicators, particularly focusing on respiratory, immune, neurological, and digestive health in Navoi and Zarafshan. By providing actionable data on these connections, the study intends to guide health interventions to reduce health risks associated with industrial emissions in these areas. The purpose is to offer empirical evidence that supports policymakers and public health professionals in developing effective strategies to mitigate pollution-related health challenges in industrialized arid regions.

The findings of this research indicate a strong correlation in Navoi between annual pollutant emissions and increased rates of respiratory, immune, and neurological conditions, suggesting these health issues are particularly sensitive to pollution in the city. In Zarafshan, however, a different pattern is observed, with pollutants more closely associated with digestive diseases. This regional variation suggests that pollution's health impacts may vary significantly depending on local environmental conditions.

© Latipov Normurod, Komilova Nilufar, Makhmudov Bakhodirjon, Berdiev Khayriddin, Moslemzadeh Mehrdad, Chulliyev Suhrob, Murtazayev Isabek, Hamroyev Mukhtor, 2024

In conclusion, the study confirms a significant relationship between environmental conditions and public health, demonstrating that industrial emissions notably impact morbidity rates in arid, urban settings. By establishing these connections, the research supports SDG 11's mission to create sustainable and healthy urban environments, presenting evidence-based recommendations to minimize the health impact of industrial pollution. The proposed measures focus on addressing the primary health challenges—respiratory, immune, neurological, and digestive issues—identified in the Navoi region, promoting healthier urban environments through targeted interventions.

Keywords: *Econometric modeling, Air pollution, Navoi and Zarafshan, ARIMA, SDG's, environmental condition, forecasting, diseases.*

In cites: Latipov Normurod, Komilova Nilufar, Makhmudov Bakhodirjon, Berdiev Khayriddin, Moslemzadeh Mehrdad, Chulliyev Suhrob, Mur-tazayev Isabek, Hamroyev Mukhtor (2024). Econometric modeling and forecasting of environmental conditions of cities and population health problems: case study of Navoi and Zarafshan cities. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 344-357. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-27>

Introduction. In today's globalized world, the rapid development of industry has led to numerous public health challenges, making it increasingly important to address these issues seriously [3]. The 11th item of the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs) is dedicated to the sustainable development of cities. It emphasizes that the chances of breathing clean air for people living in Asian cities are particularly low. Consequently, the need for a comprehensive analysis of the situation, efforts to improve environmental conditions, a swift transition to a green economy, and measures to strengthen public health have become increasingly significant [1; 2].

Monitoring and modeling the current environmental situation are key components of sustainable environmental management. In recent years, researchers such as Muñiz and Sánchez [8], Lakner et al. [6], and Odekanle et al. [9] have underscored the importance of these factors. Uzbekistan, a country located in Central Asia, predominantly features an arid climate. The majority of its landscape consists of plains and lowlands with an elevation ranging from 200 to 400 meters [10]. As a result, the environmental conditions of the cities in this region and the associated public health concerns of their populations are of particular relevance.

This research focuses on the ecological conditions of the industrialized cities of Navoi and Zarafshan in the Navoi region, which is situated in the arid center of Uzbekistan. It also provides forecasts based on econometric modeling of public health problems.

Methodology. Study Area. The Navoi region, as an administrative unit, ranks second in size among the administrative divisions of Uzbekistan (after the Republic of Karakalpakstan). However, the region is

of great significance due to its substantial economic potential. Notably, more than 80% of the region's territory is classified as desert, with a total area of 111,000 square kilometers (Figure 1). The region includes seven cities and 58 towns. Among these, the city of Navoi, founded in 1958 and serving as the administrative center, and the city of Zarafshan, established in 1972 around the Muruntov gold mine and specializing in non-ferrous metallurgy, stand out (Table 1).

Data Analysis. In this study, various methods were employed, including statistical data analysis, sociological surveys, and econometric modeling using R Studio software, to determine the correlation between harmful substances released into the atmosphere and disease groups within the population. This was achieved by using the **ARIMA** method. **ARIMA Method** – the Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) method is a widely used statistical model for analyzing and forecasting time series data. ARIMA combines three components:

Autoregression (AR): A model that uses the dependency between an observation and a certain number of lagged observations.

Integration (I): Represents differencing the data to achieve stationarity, removing trends or seasonality.

Moving Average (MA): A model that incorporates the relationship between an observation and residual errors from previous observations.

The ARIMA model is typically denoted as $ARIMA(p, d, q)$, where:

p is the number of lag terms (autoregressive terms),

d is the number of differencing operations required to make the time series stationary,

Table 1

General information about cities in the Navoi region		
Cities	The year it received the status of a city	Population (thousand people)
Navoi	1958-year	150611
Zarafshan	1972- year	85636
Uchkuduk	1978- year	30528
Kyziltepa	1979- year	12602
Nurata	1976- year	36014
Yangirabot	1996- year	18782
Gazgan	2019- year	8945

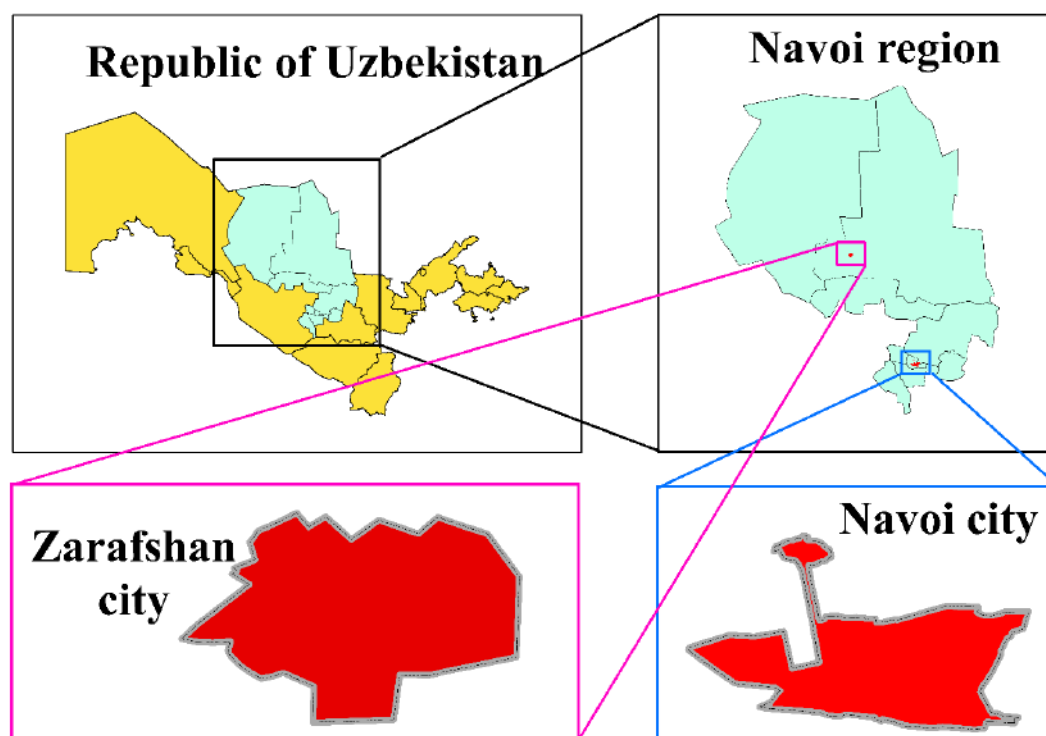


Fig. 1. Study area

q is the order of the moving average.

ARIMA models are used for forecasting future data points based on past values and patterns within a time series.

Student's t-Test. The Student's t-test is a statistical test used to determine whether there is a significant difference between the means of two groups or whether a sample mean significantly differs from a known population mean. It is commonly applied when the sample size is small and the population variance is unknown. There are two main types:

Independent t-test: Compares the means of two independent groups.

Paired t-test: Compares the means of the same group at different times or under different conditions.

The test calculates the t-statistic, which is then compared to critical values from the t-distribution to determine statistical significance. If the calculated t-value exceeds the critical value, the null hypothesis (that there is no difference) is rejected.

Data Collection. Econometric models, which provide a scientific basis for addressing specific socio-economic problems, have become increasingly important. Based on our observations and available statistical data, we developed an econometric model using the examples of Navoi and Zarafshan, two leading cities in the Navoi region [5]. The primary objective of this model is to scientifically substantiate the existence (or lack thereof) of a correlation between harmful substances released into the atmosphere and major disease groups among the population. This model forecasts the impact of changes in

atmospheric pollution levels on population morbidity rates. Specifically, it analyzes how the morbidity rate fluctuates when the amount of harmful substances released into the atmosphere increases or decreases by one unit (i.e., by one ton). This analysis is crucial for informing decision-making, as it highlights key considerations for policymakers (Komilova & Latipov [4]; Tulchinsky & Varavikova [11]).

First, we examine the econometric analysis of the relationship between the most common diseases in Navoi and Zarafshan and one of the key factors affecting them—namely, the various harmful substances released into the atmosphere. We also present future forecasts based on this analysis [7]. To perform the econometric analysis, we use a series of observations over the years. Table 2 lists the most common diseases observed in Navoi from 2011 to 2022. Table 3 presents data on the quantity of harmful gases released into the atmosphere in Navoi (in tons) over the same period. Similarly, Table 4 provides the annual distribution of harmful gases released in Zarafshan, while Table 5 shows the distribution of diseases by year.

Results and Discussion. Using the data presented above, econometric analyses were conducted to examine whether the harmful gases released into the atmosphere in the cities of Navoi and Zarafshan are correlated with the six most common types of diseases in these areas. These analyses also generated forecast values for both cities, projecting trends up to the year 2028.

In econometric analysis, multicollinearity am-

Table 2

Incidence rate of main types of diseases in Navoi city

Years	Diseases related to respiratory organs	Digestive diseases	Diseases of the eye and its accessories	Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	Diseases of the circulatory system	Diseases of the nervous system
2011	44218	17346	6548	5057	5197	5127
2012	42166	16204	5470	4871	4521	4766
2013	40374	14585	5144	4369	4311	4416
2014	37305	13790	4680	4259	3887	4094
2015	36455	13311	4585	3782	3570	3740
2016	35718	12623	4365	3656	3324	3692
2017	30449	13837	4716	3711	3016	3856
2018	31058	16342	4943	4348	2953	3091
2019	27269	11964	4574	3245	3093	3106
2020	31594	8588	4516	3374	3056	2289
2021	20694	7188	3999	3927	2710	3107
2022	30684	23950	8895	4242	7459	4716

Note: The table data was compiled by the author based on the data of the Statistics Agency of the Republic of Uzbekistan

Table 3

The number of harmful substances released into the atmosphere in the city of Navoi (in thousands of tons)

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
40.8	39.7	39.2	38.2	40.1	27.6	22.9	27.6	17.6	21.3	24.1	20.2

Table 4

The number of harmful substances released into the atmosphere in the city of Zarafshan (in thousands of tons)

2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
0.3	0.3	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	0.8	0.9	1	1	1.2

Note: The table information was compiled by the author based on the information of the Navoi Region Statistics Department

Table 5

Incidence rate of the main types of diseases in the city of Zarafshan

Years	Diseases related to respiratory organs	Digestive diseases	Diseases of the eye and its accessories	Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	Diseases of the circulatory system	Diseases of the nervous system
2011	23520	11639	3137	3264	3043	3247
2012	21533	10142	2637	2944	2540	2833
2013	20183	8462	2469	2789	2366	2754
2014	17277	7705	2160	2677	2043	2455
2015	15201	7613	1930	2575	1744	2296
2016	14803	7225	1710	2403	1631	2250
2017	14948	9142	2029	2087	1954	2619
2018	14904	10728	1972	2037	1788	3134
2019	13428	11424	875	1447	1415	2475
2020	17505	10445	963	1009	1441	1928
2021	25838	11748	833	1010	1666	1835
2022	23428	17960	1510	1785	2052	2582

Note: The table data was compiled by the author based on the data of the Statistics Agency of the Republic of Uzbekistan.

ong factors can arise when constructing multifactor regression equations. Multicollinearity refers to a high degree of linear correlation between independent variables (factors), which can make the results of the regression model unreliable. To assess multicollinearity, a matrix of pairwise correlation coefficients is generated. This matrix helps to determine the degree of direct or inverse relationships between the factors.

Several software programs can be employed to address econometric issues, including MS Excel, Stata, Minitab, and R Studio, which can also display results in graphical form (Komilova et al., 2021). In our case, it is reasonable to expect that harmful gases released into the atmosphere would lead to diseases that pose a threat to public health. Therefore, for the cities of Navoi and Zarafshan, it is essential to assess whether these harmful emissions are closely related to the six types of diseases analyzed in this study. This relationship can be determined using software programs such as MS Excel and Stata 14.2 by creating a matrix of pairwise correlation coefficients (Tables 6 and 7).

As we mentioned above, the density or strength of the connection between variables in the studied events and processes is estimated by r_{xy} – linear pair correlation coefficient. For linear regression, the value of the correlation coefficient ($-1 \leq r_{xy} \leq 1$) lies in the interval. As we know, usually the degree of connection density according to the correlation coefficient is interpreted according to the following scale coefficients (Tables 8).

So, if we look at the correlation matrix in Table 6 that we created, there are very strong, medium, and weak direct and inverse correlations between the 6 most common types of diseases in Navoi city and various harmful gases released into the atmosphere in Navoi city over the years. From the values in the green and red cells of Table 6, we can see that there is a very strong positive correlation between respiratory diseases and air pollutants at a value of approximately (0.82). There is a strong positive correlation of 0.70 between blood and blood-forming organs and diseases of the immune system and air pollutants. Also, this case has a correct correlation between the diseases of the nervous system and harmful substances released into the atmosphere with a value equal to the average (0.60). The values of the rest of the inversely related elements of the constructed correlation matrix can be considered almost insignificant due to their density below the average, which can lead to very large deviations from the current situation, i.e. unreliable forecasts, after performing our forecasting procedure. In addition, all the remaining elements of the matrix, which showed a correct connection, are only between diseases, so we can consider them to be unimportant because the possibility of the occurrence of other diseases due to one disease is an inevitable phenomenon. If we analyze the matrix in Table 7 for the city of Zarafshan, we will continue our econometric analysis with these values in the next stages, as the cells highlighted in green are strongly and very strongly connected, respectively.

Table 6

Pairwise correlation matrix between harmful substances and diseases in Navoi city

	Harmful substances released into the atmosphere	Diseases related to respiratory organs	Digestive diseases	Eye diseases	Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	Diseases of the circulatory system	Nervous system diseases
Harmful substances released into the atmosphere	1.00						
Diseases related to respiratory organs	0.82	1.00					
Digestive diseases	0.16	0.41	1.00				
Eye diseases	-0.02	0.24	0.89	1.00			
Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	0.69	0.65	0.56	0.47	1.00		
Diseases of the circulatory system	0.15	0.37	0.86	0.96	0.53	1.00	
Nervous system diseases	0.60	0.69	0.73	0.64	0.79	0.74	1.00

Note: Factors marked in green are correlated, while those in red are unrelated

Table 7

Pairwise correlation matrix between harmful substances and diseases in Zarafshan city

	Harmful substances released into the atmosphere	Diseases related to respiratory organs	Digestive diseases	Eye diseases	Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	Diseases of the circulatory system	Nervous system diseases
Harmful substances released into the atmosphere	1.00						
Diseases related to respiratory organs	0.19	1.00					
Digestive diseases	0.74	0.54	1.00				
Eye diseases	0.77	0.16	-0.24	1.00			
Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	0.86	0.04	-0.36	0.95	1.00		
Diseases of the circulatory system	0.52	0.54	0.10	0.89	0.79	1.00	
Nervous system diseases	0.37	0.02	0.12	0.78	0.69	0.72	1.00

Note: Factors marked in green are correlated, while those in red are unrelated.

Thus, Tables 6 and 7 show the dynamics of the previous years with our factors of direct and inverse correlation determined for two cities (Fig. 2), the view of the model corresponding to the dynamics and the parameters of the resulting one-factor linear

regression model forecasting until the next year 2028. we can determine whether it is reliable (Table 9).

In Figure 2, linear regression models in the form of $y=a+bx$ and their coefficients of determination (R^2) were calculated using Excel for both cities, based

Table 8

Interpretation of the scale of correlational connection

Degree of correlation	Interpretation
0.91 to 1.00 (-0.90 to -1.00)	Very strong positive (negative) correlation;
0.71 to 0.90 (-0.70 to -0.90)	Strong positive (negative) correlation;
0.51 to 0.70 (-0.50 to -0.70)	Average positive (negative) correlation;
0.31 to 0.50 (-0.31 to -0.50)	Weak positive (negative) correlation;
0.00 to 0.30 (0.00 to -0.30)	Insignificant positive (negative) correlation;

on the correlation pairs selected from Tables 6 and 7. In the next stage of the analysis, we can verify whether the unknown parameters a and b of these regression models are statistically significant—whether they lie within the confidence intervals or not—using the Student's t-test in MS Excel.

The R^2 value, shown in Figure 2, represents the coefficient of determination, which indicates the strength of the relationship between the two factors being analyzed. While researchers often aim for a high R^2 when conducting econometric analyses, this is not always a desirable practice. Overly high values during the forecasting period can lead to unreliable projections, which may result in significant errors and potential damage in various respects.

In our study, the coefficient of determination in-

dicates that approximately 67.86% of the variation in the dependent variable y (respiratory diseases) is explained by the variation in the independent variable x (harmful substances released into the atmosphere).

Here:

$y=a+bx$ – linear regression model,

x – refers to various harmful substances released into the atmosphere (free variable),

y – the name of urban diseases respectively (involuntary variable).

The parameters a and b in the regression equations represent the coefficients that indicate the levels of the factors. We now test the statistical significance and confidence intervals of these coefficients using the Student's t-test for each pair shown in Figure 2.

During the analysis, the unknown parameters a

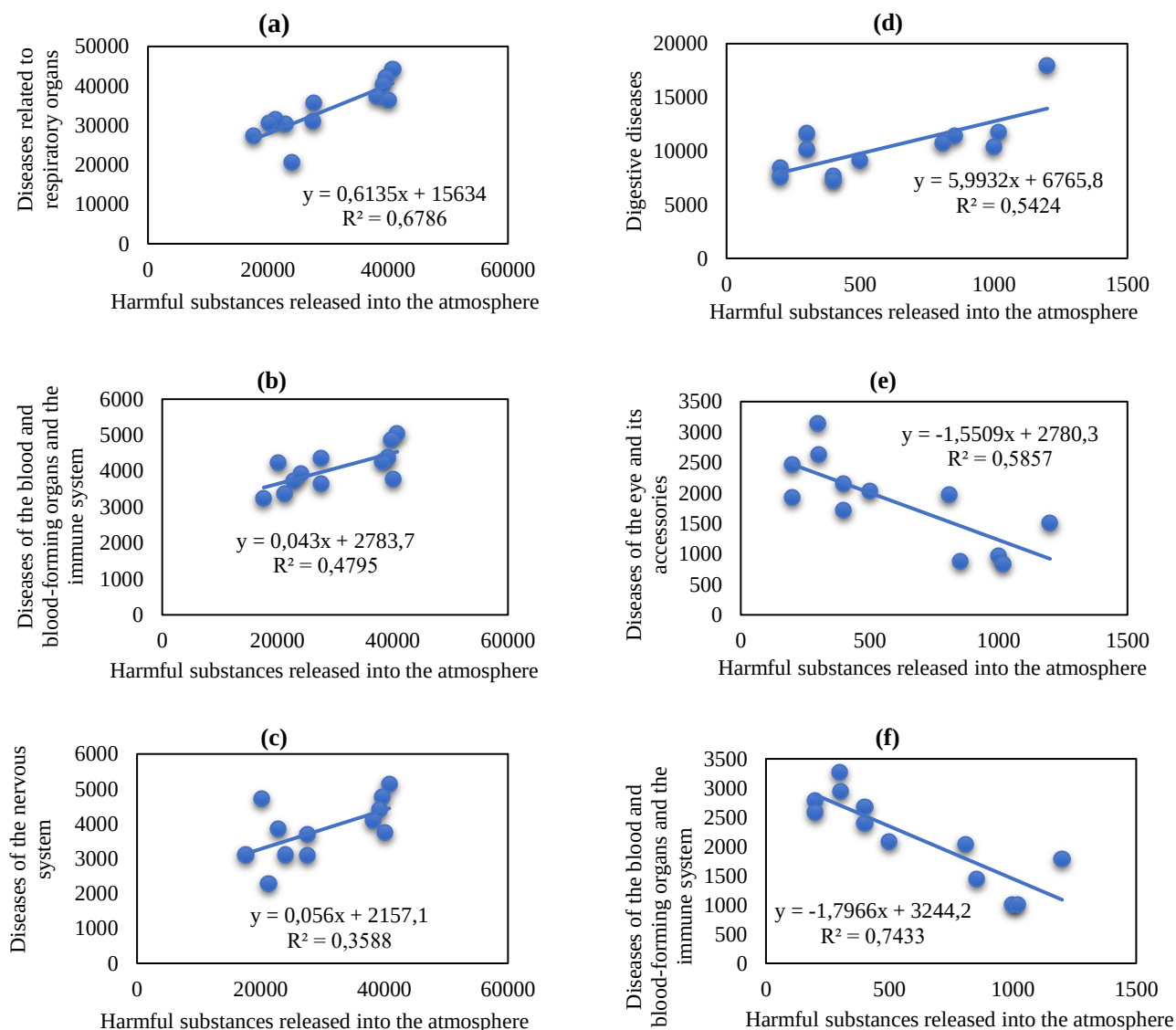


Fig. 2. Dynamic interaction between various harmful substances and diseases in the cities of the Navoi (a,b,c) and Zarafshan (d,e,f)

and b of the linear regression models in the form $y=a+bx$ were tested using the Student's t-test. Based on the test results, all three correlation pairs highlighted in green for Navoi city have t-values greater than the critical values from the Student's t-distribution table, indicating statistical significance. In Zarafshan, however, only one of the three correlation pairs under consideration met the conditions of the Student's t-test. The regression equations for the two correlation pairs highlighted in red in Zarafshan were found to be statistically insignificant.

Having determined the levels of correlation between factors through the creation of a correlation matrix and regression equations, we now proceed with the econometric analysis. We focus on the correlation pairs highlighted in green for both cities and generate their expected forecast results up to 2028 based on the regression equations. As mentioned earlier, the forecast results for future observations can be genera-

ted using various models through computer programs. Time series data, which are based on observations, typically satisfy the property of stationarity, meaning they have non-random time-dependent components. If the random residuals of a time series form a stationary series, then the time series itself is non-stationary.

To model such series, an Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) model is applied. ARIMA models allow for integrated time series analysis. In the ARIMA (p, d, q) model, p represents the order of autoregression (the number of lagged observations), d represents the degree of differencing (the difference in harmful gases and diseases, or the order of first differences), and q represents the moving average order. Since the values and types of factors vary by year, we use different forms of ARIMA (p, d, q) models to capture the data's characteristics.

By applying the ARIMA model, we generate fo-

recasts for harmful substances and diseases in the regions of Navoi and Zarafshan using R Studio software, as shown in Table 9.

To forecast harmful substances and diseases released into the atmosphere in the cities of Navoi and Zarafshan, the maximum likelihood estimation (log-likelihood), Akaika (AIC) and Bayes (BIC) criteria were used in the proposed models. These criteria are used to select the models with the least

error in forecasting the harmful substances and diseases released in the cities of the Navoi region.

So, based on the statistical criteria for evaluating the quality of the econometric models obtained in the results of the lower, middle, and upper forecasts obtained in the 95 percent confidence interval of the diseases and harmful substances released into the atmosphere in the cities of Navoi and Zarafshan are presented in Tables 10 and 11 below.

Table 9

Econometric models used in forecasting

Navoi city		
№	Type of harmful gases and diseases	The type of model selected for the forecast
1	Diseases of respiratory organs	ARIMA (0,1,0)
2	Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system	ARIMA (1,2,0)
3	Diseases of the nervous system	ARIMA (0,1,0)
4	Harmful substances released into the atmosphere	ARIMA (0,1,0)
Zarafshan city		
№	Type of harmful gases and diseases	The type of model selected for the forecast
1	Digestive diseases	ARIMA (0,2,0)
2	Harmful substances released into the atmosphere	ARIMA (0,1,0)

*Note: The ARIMA models selected for the forecast in Table 11 were selected as the best models based on the data in the given factors using R studio software

Table 10

Prognostic values of selected disease groups in Navoi city

Navoi city									
Years	Diseases related to respiratory organs			Diseases of the blood and blood-forming organs and the immune system			Diseases of the nervous system		
№	lower	medium	high	lower	medium	high	lower	medium	ihigh
2011		44218			5057			5127	
2012		42166			4871			4766	
2013		40374			4369			4416	
2014		37305			4259			4094	
2015		36455			3782			3740	
2016		35718			3656			3692	
2017		30449			3711			3856	
2018		31058			4348			3091	
2019		27269			3245			3106	
2020		31594			3374			2289	
2021		20694			3927			3107	
2022		30684			4242			4716	
2023	25706	29454	33201	3951	4377	4803	2496	3042	3589
2024	22924	28223	33523	3933	4636	5338	2096	2869	3641
2025	20502	26993	33484	3672	4809	5945	1749	2695	3641
2026	18268	25763	33258	3467	5041	6615	1428	2521	3614
2027	16153	24532	32912	3139	5233	7326	1126	2347	3569
2028	14122	23302	32481	2814	5452	8091	835	2174	3512

Note: This forecast data was developed by the author

Table 11

Prognostic values of selected disease groups in Zarafshan city

Zarafshan city							Navoi city		
Years	Digestive diseases			Harmful substances released into the atmosphere			Harmful substances released into the atmosphere		
№	lower	medium	high	lower	medium	high	lower	medium	high
2011		11639			300			40800	
2012		10142			302			39700	
2013		8462			200			39200	
2014		7705			400			38200	
2015		7613			200			40100	
2016		7225			400			27600	
2017		9142			500			22900	
2018		10728			808			27559	
2019		11424			853			17615	
2020		10445			1000			21300	
2021		11748			1019			24057	
2022		17960			1200			20200	
2023	12249	14554	16859	1085	1282	1478	12667	18327	23987
2024	10802	15957	21112	1086	1364	1642	8450	16455	24459
2025	8735	17360	25985	1105	1445	1786	4779	14582	24385
2026	6137	18763	31389	1134	1527	1920	1389	12709	24029
2027	3070	20166	37262	1170	1609	2048	2376	10836	19296
2028	4927	21569	38211	1210	1691	2172	1665	8964	16262

Note: This forecast data was developed by the author

In Tables 10 and 11 above, the dynamic expectations of the forecasts obtained for the diseases associated with gases released into the atmosphere in

the cities of Navoi and Zarafshan are presented in the following figures, respectively:

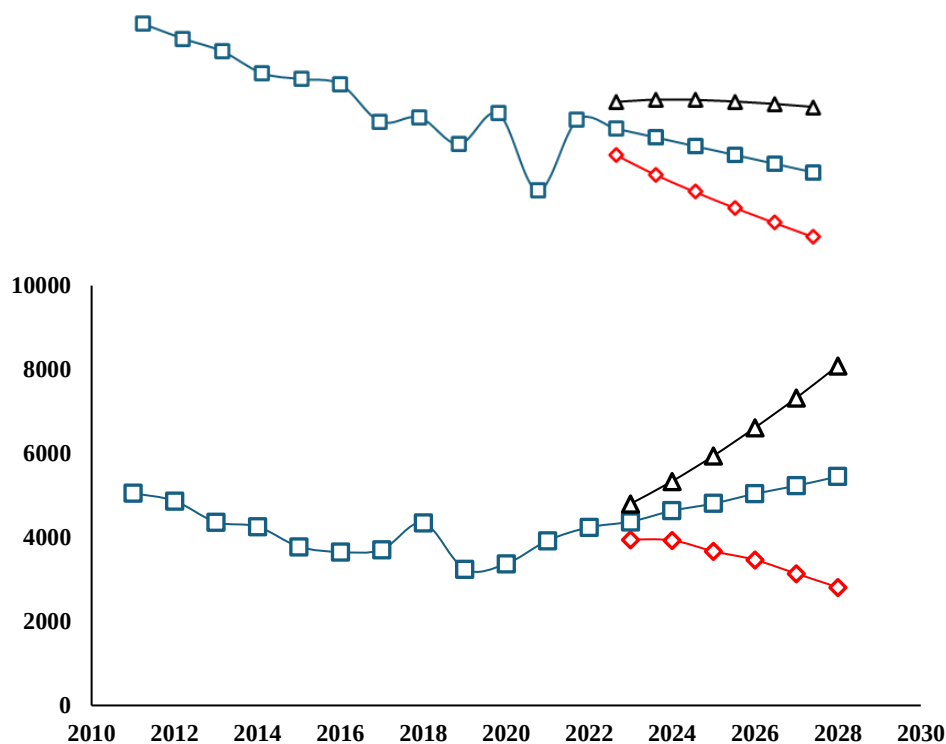


Fig. 3. Forecast of respiratory diseases in the city of Navoi until 2028

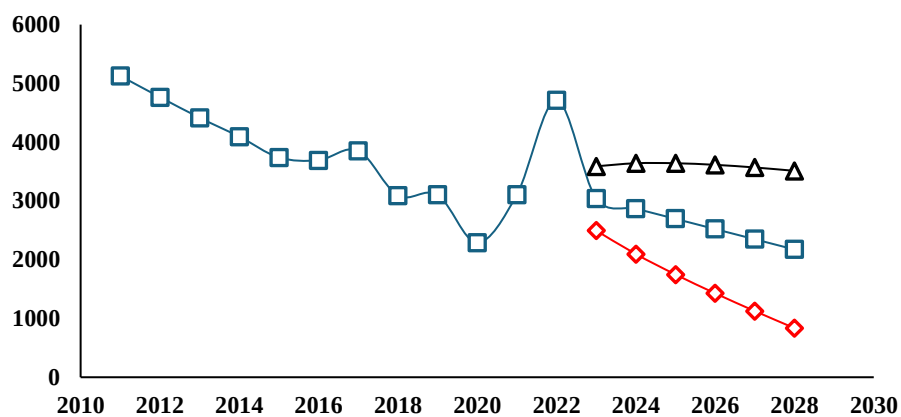


Fig. 4. Forecast of blood and blood-forming organs and diseases of the immune system in the city of Navoi until 2028

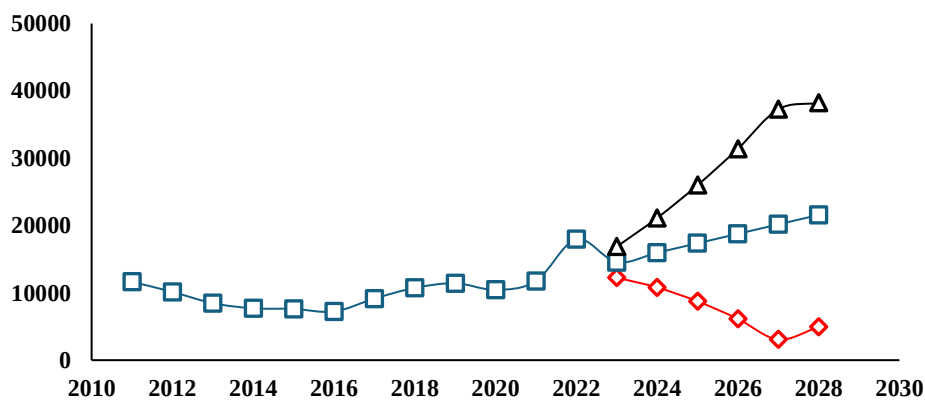


Fig. 5. Forecast of nervous system diseases in Navoi until 2028

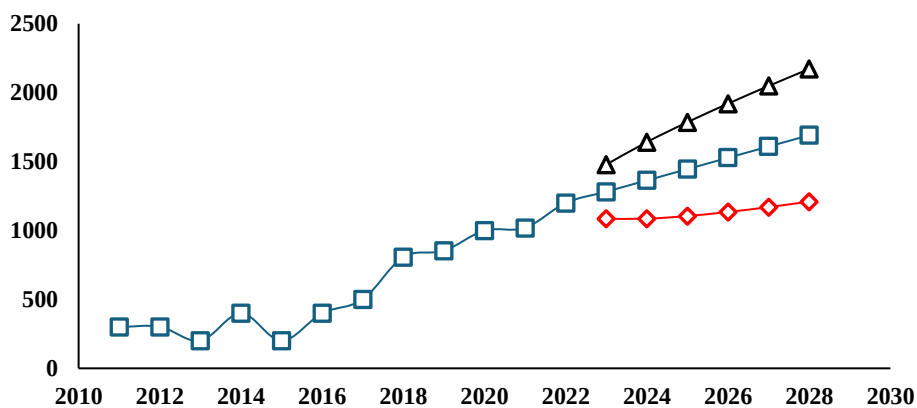


Fig. 6. Forecast of digestive diseases in Zarafshan until 2028

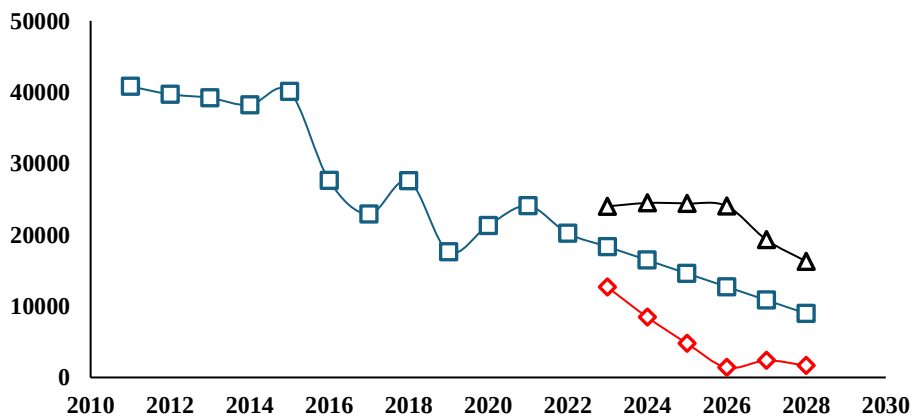


Fig. 7. Forecast of harmful substances released into the atmosphere in the city of Zarafshan until 2028

From the above pictures, we can see that the values of all the forecasted diseases and factors in the coming years will change in different ways. It should be noted that all the forecast values performed in the above tables were performed in *R studio*.

As we noted during our econometric analysis, using each of the forecast results obtained the dynamics of the relationship between *diseases* in the cities of Navoi and Zarafshan and *harmful substances* released into the atmosphere in 2023-2028, its statistical significance and errors in the MS Excel program $y=a+bx$. We check by constructing a linear regression equation in the form and we can make a general conclusion for diseases in the cities of Navoi and Zarafshan as follows.

Here:

$y=a+bx$ – linear regression model,

x – harmful substances released into the atmosphere (free variable),

y – the name of diseases present in the city, respectively (involuntary variable).

Also, parameters a and b are coefficients that indicate the level of the factors.

If we look at the data generated in the above tables, the green cells mean the coefficients check of the regression models constructed using the forecast values, that is, the values in the green cells satisfy the condition of the student t-test.

Now, we perform the step of calculating the mean error of approximation of the regression models constructed with the values of coefficients in green, which are considered statistically significant in the cities of Navoi and Zarafshan, and the values of the Fisher-F test, which evaluates the quality of the model, using MS Excel and R studio programs.

The average error of approximation calculated in these tables means the average deviation of the estimated values of the resulting regression equation from their true values and should not be statistically significant greater than 10%. In our study, this indicator is 6.97%, 8.73% and 8.84% in Navoi and Zarafshan cities, respectively, and this means that the model is built reliably. In addition, the Fisher F-test method calculated in these tables is one of the methods for evaluating the quality of the regression equation. Usually, this method involves testing the H_0 hypothesis that the regression equation and link density indicator are not statistically significant. For this, the table F_{tab} values of Freal and Fisher -criterion are compared. If $F_{real} > F_{tab}$, the hypothesis H_0 is rejected, and the regression is recognized as statistically significant, or vice versa. This F-test method performs very well for our analysis in the tables above, and we can assume that our model is statistically significant.

Conclusion. In the econometric model developed for the cities of Navoi and Zarafshan, we can

come to the following conclusions:

As the average error of approximation of the regression models constructed for our observations in Navoi and Zarafshan cities, Fisher-F test values evaluating the quality of the model all correspond to statistical criteria, there are the following relationships between the studied diseases in Navoi and Zarafshan cities and the total harmful substances released into the atmosphere, namely:

$$\text{a) in Navoi city: } y(x)=18277.14+0.537*x, \quad (1)$$

here, x – factor refers to substances released into the atmosphere;

$y(x)$ – the factor means diseases related to the respiratory system.

This regression model (1) implies that a one-unit change in the x factor leads to a 0.537-fold change in the y factor, i.e., a one-unit change in atmospheric emissions leads to a 0.537-fold change in respiratory diseases. Therefore, we should reduce harmful substances released into the atmosphere as much as possible.

$$\text{b) in Navoi city: } y(x)=1776.34+0.067*x, \quad (2)$$

x – factor refers to substances released into the atmosphere;

$y(x)$ – the factor means diseases of the nervous system.

This regression model (2) implies that a one-unit change in the x factor leads to a 0.067-fold change in the y factor, which means that a one-unit change in atmospheric emissions leads to a 0.067-fold change in the incidence of nervous system diseases.

$$\text{in Zarafshan city: } y=5684.077+8.092*x, \quad (3)$$

x – factor refers to substances released into the atmosphere;

$y(x)$ – factor means diseases related to the digestive system;

This regression model (3) means that a one-unit change in the x factor leads to an 8.092-fold change in the y factor, that is, a one-unit change in the harmful substances released into the atmosphere leads to a 8.09-fold change in the number of digestive diseases in Zarafshan city.

Recommendation. Based on the econometric models developed for Navoi and Zarafshan cities, which link atmospheric emissions to various health outcomes, here are some suggestions based on the model results:

Reducing Atmospheric Emissions: The models indicate that reducing harmful substances released into the atmosphere could significantly mitigate health risks associated with respiratory, nervous system, and digestive diseases. Specifically:

For Navoi city:

Respiratory Diseases (Model 1): A one-unit reduction in atmospheric emissions could potentially decrease respiratory diseases by 0.537 units, suggesting a direct benefit from reducing air pollution.

Nervous System Diseases (Model 2): Similarly, a reduction in emissions could lower nervous system diseases by 0.067 units, emphasizing the broader health benefits of cleaner air.

For Zarafshan city:

Digestive System Diseases (Model 3): The significant coefficient (8.092) indicates a strong positive relationship between atmospheric emissions and digestive diseases. Therefore, reducing emissions could have a substantial impact on reducing digestive health issues in Zarafshan.

Policy Recommendations: *Environmental Regulations:* Strengthen regulations on industrial emissions and vehicular pollution in both cities to limit the release of harmful substances into the atmosphere.

Investment in Clean Technologies: Encourage industries to adopt cleaner technologies and practices to minimize emissions.

Public Health Awareness: Increase public awareness campaigns about the health risks associated with air pollution and promote actions individuals

can take to reduce their exposure.

Monitoring and Research: Continue monitoring air quality and health outcomes to further refine policies and interventions.

Collaboration and Coordination: Foster collaboration between local governments, industries, healthcare providers, and environmental experts to develop and implement effective strategies for reducing air pollution and improving public health.

By implementing these suggestions, Navoi and Zarafshan can work towards creating healthier environments for their residents, reducing the burden of diseases linked to air pollution, and promoting sustainable development practices.

Acknowledgement. We express our gratitude to the Department of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Navoi region, and the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek and Navoi State University, who closely assisted in the collection and analysis of this research material.

References

1. Arani, M. H., Modarres, R., Ashtiani, M. M., & Jafari, H. R. (2021). Environmental impact assessment of a steel industry development plan. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 19(2), 1997-2011. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00752-4>
2. Dong, Y., Zhang, C., Niu, M., Wang, S., & Sun, S. (2021). Air pollution forecasting with multivariate interval decomposition ensemble approach. *Atmospheric Pollution Research*, 12(12). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101230>
3. Lakner, Z., Kökény, L., Popescu, G., & Fazekas, B. (2024). Modelling long-range economic impacts of air pollution. *Heliyon*, 10(4), e26483. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26483>
4. Odekanle, E. L., et al. (2021). Assessment of TEX air pollutants from Nigerian petroleum refineries. *Cogent Engineering*, 8(1), 1947007. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1947007>
5. Komilova, N., & Latipov, N. (2022). Classification of settlements based on the ecological situation in Navoi Region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University*, (56), 209-213. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-15>
6. Latipov, N. F., & Komilova, N. K. (2024). The role of anthropogenic influence in assessing the ecological conditions in Navoi, Uzbekistan. *Baghdad Science Journal*, 21(4). <https://doi.org/10.21123/bsj.2023.8892>
7. Singh, K., & Shrestha, A. (2020). Air quality and health impacts in Kathmandu Valley. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(5), 5364-5375. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07499-6>
8. Muñiz, I., & Sánchez, V. (2018). Urban structure and greenhouse emissions from commuting in Mexico Valley. *Ecological Economics*, 147, 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.01.035>
9. Tulchinsky, T. H., & Varavikova, E. A. (2000). Health population measurement and evaluation. *The New Public Health* (2nd ed., pp. 50005-x). <https://doi.org/10.1016/b978-012703350-1/50005-x>
10. Hesami Arani, M., Modarres, R., Ashtiani, M. M., & Jafari, H. R. (2021). NO₂ and SO₂ pollutant dispersion in rolling industry using AERMOD. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 19(2), 1287-1298. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00686-x>
11. Ali, H., & Khan, M. S. (2020). Air quality assessment and health impact in urban Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3), 142. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8160-3>
12. Arani, M. H., Modarres, R., & Ashtiani, M. M. (2021). Health risk assessment of NO₂ and SO₂ emissions using AERMOD. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 19(2), 1287-1298.
13. Karshibaevna, K. N., Kahramonovna, Z. D., & Faxriddinovich, L. N. (2022). Some problems with creating a medical-geographical atlas map of Uzbekistan. *International Journal of Early Childhood Special Education*, 13, 5836-5840. <https://doi.org/10.9756/journal/INTJECSE>
14. Lam, K. H., Xie, Q., & Lui, K. H. (2022). Longitudinal analysis of the effect of urban greenness on air pollution and respiratory health. *Environmental Pollution*, 307, 119441. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119441>
15. Khaparde, S., & Raval, M. (2021). Role of atmospheric dynamics in dispersion of urban pollutants. *Atmospheric Environment*, 244, 117964. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117964>
16. Zhou, Y., Luo, H., & Zhao, X. (2023). Urban green spaces' mitigation of pollutant effects on population health. *Science of the Total Environment*, 887, 163967. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163967>
17. Murtaza, F., & Hu, J. (2020). Atmospheric pollution and cardiovascular risk in South Asia. *Environmental Research*, 184, 109292. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109292>

18. Bano, A., & Anwar, M. (2022). Industrial air pollution's impact on soil and water resources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 193. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09900-5>
19. Wang, Z., & Zhang, J. (2023). Long-term impacts of NO_x emissions on population health. *Environmental Research Letters*, 18(4), 045007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe8e4>
20. Lucas, D., & Ribeiro, J. (2022). Chemical and biological impacts of air pollution on public health. *Frontiers in Public Health*, 10, 842415. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.842415>
21. Guan, W., & Ding, R. (2023). Particulate pollution and human health in industrial zones. *Journal of Hazardous Materials*, 445, 130226. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130226>
22. García, J., & Pérez, C. (2021). Impact of traffic and industrial emissions on urban air quality. *Urban Climate*, 37, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>
23. Seo, J., & Kim, H. (2020). Comparative analysis of air pollution and its health impacts. *Atmospheric Pollution Research*, 11(12), 2008–2019. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.10.003>
24. Rodríguez, D., & Ramos, F. (2024). Assessment of urban pollution control interventions. *Environmental Pollution*, 311, 120009. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.120009>
25. Rakhmatullaev, S. (2012). Sustainable irrigated agricultural production challenges in Uzbekistan. In *Economic Transition* (589–611).
26. Komilova, N., Makhmudov, B., & Latipov, N. (2023). Study of crimes in the city of Kokand using GIS technologies and sociological questionnaires. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 125–139. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-10>

Authors Contribution: Latipov Normurod and Makhmudov Bakhodirjon: Conception and design of study, Acquisition of data, Analysis and/or interpretation of data, Drafting the manuscript, Approval of the version of the manuscript to be published; Komilova Nilufar: Conception and design of study, Acquisition of data, Analysis and/or interpretation of data, Drafting the manuscript, Revising the manuscript critically for important intellectual content, Approval of the version of the manuscript to be published; Berdiev Khayriddin: Drafting the manuscript and Approval of the version of the manuscript to be published; Mehrdad Moslemzadeh, Chulliyev Suhrob: Conception and design of study, Acquisition of data, Analysis and/or interpretation of data, Drafting the manuscript, Revising the manuscript critically for important intellectual content

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Економетричне моделювання та прогнозування екологічного стану міст та проблем здоров'я населення: тематичні дослідження міст Навої та Зарафшану

Нормурод Латипов¹

д. філософії, кафедра основ географії та економічних знань,

¹ Навоїнський державний університет, Навої, Узбекистан;

Нілуфар Комілова²

д. геогр. н., професор кафедри економічної та соціальної географії,

² Національний університет Узбекистану імені Мірзо Улутбека;

Баходіржон Махмудов²

аспірант кафедри економічної та соціальної географії;

Хайріддин Бердієв³

д. філософії, доцент кафедри історії,

³ Ташкентський державний технічний університет, Ташкент, Узбекистан;

Мехрдад Муслемзаде⁴

д. філософії, доцент кафедри гігієни навколишнього середовища,

школа охорони здоров'я, ⁴ Університет медичних наук Гілан, Рашт, Іран;

Сухроб Чулієв¹

д. філософії, доцент кафедри основ географії та економічних знань;

Ісабек Муртазаєв²

д. філософії, старший викладач кафедри економічної теорії;

Мухтор Хамроєв⁵

кафедра геодезії, картографії та географії,

⁵ Ургенчський державний університет, Ургенч, Узбекистан

У цій роботі досліджується зв'язок між викидами шкідливих речовин в атмосферу та показниками захворюваності населення в Навої та Зарафшані, двох високоіндустріалізованих містах у посушливому кліматі

Узбекистану. Оскільки індустріалізація в посушливих середовищах створює унікальні ризики для здоров'я, дослідження спрямоване на поглиблення наукового розуміння впливу забруднення на здоров'я, характерного для цих міст. Виявлення впливу забруднення повітря на здоров'я в урбанізованих посушливих регіонах не лише покращує наукові знання, але й інформує про політику громадського здоров'я, сприяючи досягненню 11-ої Цілі сталого розвитку (ЦСР) ООН. Основною метою цього дослідження є кількісна оцінка зв'язків між промисловими забруднювачами повітря та показниками захворюваності, особливо зосереджуючись на респіраторному, імунному, неврологічному та травному здоров'ї в Навої та Зарафшані. Надаючи дієві дані про ці зв'язки, дослідження має на меті скерувати втручання в охорону здоров'я, щоб зменшити ризики для здоров'я, пов'язані з промисловими викидами в цих областях. Мета полягає в тому, щоб запропонувати емпіричні докази, які підтримають політиків і спеціалістів у сфері охорони здоров'я в розробці ефективних стратегій пом'якшення проблем здоров'я, пов'язаних із забрудненням, у промислово розвинених посушливих регіонах. Результати цього дослідження вказують на сильну кореляцію в Навої між річними викидами забруднюючих речовин і підвищенням рівня респіраторних, імунних і неврологічних захворювань, що свідчить про те, що ці проблеми зі здоров'ям особливо чутливі до забруднення в місті. У Зарафшані, однак, спостерігається інша картина, де забруднювачі тісніше пов'язані із захворюваннями травної системи. Ця регіональна варіація свідчить про те, що вплив забруднення на здоров'я може значно відрізнятись залежно від місцевих екологічних умов. На завершення дослідження підтверджує значний зв'язок між умовами навколишнього середовища та здоров'ям населення, демонструючи, що промислові викиди значно впливають на рівень захворюваності в посушливих міських умовах. Встановлюючи ці зв'язки, дослідження підтримує місію ЦСР 11 щодо створення сталого та здорового міського середовища, представляючи науково обґрунтовані рекомендації щодо мінімізації впливу промислового забруднення на здоров'я.

Ключові слова: *економетричне моделювання, забруднення повітря, Навої та Зарафшан, ARIMA, SDG, екологічний стан, прогнозування, захворювання.*

Внесок авторів: Латіпов Нормурод і Махмудов Баходіржон: концепція та дизайн дослідження, збір даних, аналіз та/або інтерпретація даних, складання рукопису, затвердження версії рукопису для публікації; Комілова Нілуфар: концепція та дизайн дослідження, збір даних, аналіз та/або інтерпретація даних, складання рукопису, критичний перегляд рукопису на предмет важливого інтелектуального вмісту, затвердження версії рукопису для публікації; Бердієв Хайріддін: складання рукопису та затвердження версії рукопису для публікації; Мехрдад Мослемзаде, Чуллієв Сухроб: концепція та дизайн дослідження, збір даних, аналіз та/або інтерпретація даних, складання рукопису, критичний перегляд рукопису щодо важливого інтелектуального вмісту

Надійшла 13 вересня 2024 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 21 жовтня 2024 р.

The main causes of soil contamination with heavy metals (Pb, Cd, Hg) on the northeastern slope of the Lesser Caucasus of the Republic of Azerbaijan

Adik Mammadov ¹

PhD (Agriculture), ¹ Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan,
e-mail: adikmamedov1952@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-6332-5927>;

Asadulla Abdullayev ¹

PhD (Geography),
e-mail: asadulla_abdullayev@mail.ru,  <https://orcid.org/0009-0003-5677-5091>

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. The subject of discussion is soil pollution - a type of anthropogenic degradation in which the content of chemicals in soils subject to anthropogenic impact exceeds the natural regional background level. The population of the earth is growing rapidly. Population growth requires food supply and meeting their consumption. At this time, the environment is polluted. Industry and agriculture especially cause soil pollution. For this reason, its research is an urgent issue. We also analyzed environmental pollution during the study. The research area is located in the Lesser Caucasus physical-geographic region, where the most important industrial enterprises in our country are located. The region is located in the western part of Azerbaijan, in an area rich in minerals. Both non-ferrous and ferrous metals are rich here. The natural conditions are also favorable for the development of industry in the area. Its richness in mineral deposits makes large-scale research of the area relevant. Therefore, our research is dedicated to the actual topic.

Data and Methods. For analysis, soil samples were taken from the research area and analyzed in the laboratory. Soil samples were taken from different soil types in the Lesser Caucasus. Based on the results of these analyses, comparisons were made for soil types. Then calculations were made based on mathematical and statistical methods. During the study, the results of previous studies in the area were also used.

Results and Discussion. As a result of the research, the influence of man-made emissions of lead, cadmium and mercury on various soil types on the northeastern slope of the Lesser Caucasus was studied, and the mechanisms that determine the state and behavior of heavy metals in background and soils subject to contamination were investigated. Ganja aluminum plant and Dashkasan ore refining plant located in the study area play a special role in soil pollution.

Conclusion. It has been noted that the excess content of certain chemicals (Pb, Hg, Cd) in the human environment (compared to natural levels) due to their receipt from anthropogenic sources has a negative impact on the environment. The process by which uncharacteristic microelements appear in the soil, characterized by a toxic effect and affecting the properties of the soil, is called soil contamination with heavy metals. It has been established that soil contamination with such chemical elements as lead, cadmium, and mercury poses a particular environmental hazard.

Keywords: Heavy Metals (HM), EAC (eluvial-accumulative coefficient), Clark concentration (CC), Lesser Caucasus, chernozem, meadow turf soils.

In cites: Mammadov Adik, Abdullayev Asadulla (2024). The main causes of soil contamination with heavy metals (Pb, Cd, Hg) on the northeastern slope of the Lesser Caucasus of the Republic of Azerbaijan. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 358-368. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-28>

Introduction. The use of chemical substances in the economic activities of people and their involvement in the cycle of anthropogenic transformations in the environment is constantly increasing [42]. A characteristic feature of the intensity of extraction and use of chemical elements is technophily - the ratio of annual production or production of an element to tons of lithosphere [33].

Another quantitative characteristic of anthropogenic participation in the global cycle of chemical elements on the planet is the mobilization coefficient or anthropogenic enrichment coefficient [25], which is calculated as the ratio of anthropogenic flow of a chemical element to its natural flow [44]. The level of the man-made enrichment factor [24], as well as the technophilicity of the elements, is not only an indicator of their mobilization from the lithosphere to

the surface natural environments [43], but also a reflection of the level of release of chemical elements into the environment together with industrial waste [27].

Heavy metals are the most common pollutants [26]. They pollute the land heavily, especially in old cities with a long industrial history [28]. Airborne heavy metals are dispersed over long distances around metallurgical plants [29], coal-burning thermal power plants and other facilities, and settle on nearby agricultural land [36]. Heavy metals enter agricultural soils from organic and mineral fertilizers, ameliorants and plant protection products [35].

Heavy metals, as a special group of elements, are highlighted in soil chemistry due to the toxic effect they have on plants at high concentrations [30]. There is no clear definition of heavy metals [32].

When the concept of "Soil Pollution" is limited

to the participation of anthropogenic substances, significant areas of soil located in the territory of positive natural geochemical anomalies [41], the agricultural use of which, in some cases, is dangerous for animals and humans, fall out of the attention of soil scientists and ecologists [40]. Meanwhile, abroad the concept of “soil pollution” is considered much more widely [37]. To denote a pollutant, two words are used: pollutant and contaminant, and the meaning of the second term is broader [28]. With its participation, two different concepts are denoted: “anthropogenic contaminant” - an anthropogenic pollutant and “natural contaminant” - a natural pollutant [45]. Accordingly, a distinction is made between anthropogenic and natural pollution [29].

Heavy metals are found in soil, water, air and food, and pose a serious environmental and public health problem [27].

Currently, heavy metal pollution is becoming an increasingly pressing problem [31]. The spread of industrialization and the use of oil, coal and other resources lead to the release of large quantities of toxic substances [43]. When these metals enter the soil through emissions from factories or the use of pesticides, these metals can remain in the soil layer for a long time [23]. They are then transported by precipitation or underground flows, thus ending up in groundwater and surface water systems [42].

The danger of heavy metals lies not only in their direct contact with nature [34], but also in the possibility of them entering the human body through food [14]. Fish, seafood [22], vegetables and fruits may contain some heavy metals that have been absorbed by plants or animals from the environment [19]. Continuous consumption of such foods can lead to the accumulation of these substances in the human body and cause serious illness [29].

Soil pollution changes its chemical composition, physical and biological state, and deteriorates its structure [18]. Therefore, improper agricultural activities, poor waste disposal [46], active industrial production and lack of work to reduce harmful emissions lead to negative consequences [30].

Soil is the first level of filtration of drinking water [47]. From contaminated soil, harmful substances and toxins enter groundwater, accumulate in the tissues of plants that feed animals on pastures, and then end up in human food [35]. Pollutants and heavy metals can lead to diseases ranging from diarrhea to cancer [29].

Most antibiotics used in agriculture and medicine enter the environment after being excreted from the body [40]. They can filter into the soil and spread, leading to the formation of antimicrobial-resistant bacteria and reducing the effectiveness of antibiotics. Every year, about 700 thousand deaths are caused by bacteria resistant to antimicrobial drugs [42].

Contaminated soils become less fertile, leading to serious economic costs. Soil is directly or indirectly needed to produce 95% of the planet's food [26].

Soil degradation leads to drainage and desertification: about 35% of wetlands have been lost since 1970, they are disappearing faster than forests. If the situation does not change, by 2050 about half of the world's population will live in dry areas with poor soils [19].

The danger lies in the fact that soil pollution is an invisible process. Right now, about a third of the Earth's soils are degraded due to erosion, salinization, chemical pollution and other reasons [18]. And it takes about a thousand years to form just one centimeter of fertile layer. If action is not taken, the health and quality of life of future generations could be seriously jeopardized [20]. By the end of 2020, soil degradation had already affected at least 3.2 billion people – that's 40% of the world's population [23].

Heavy metals (HM) already occupy the second place in terms of danger [12], inferior to pesticides and significantly ahead of such well-known pollutants as carbon dioxide and sulfur. In the future, they may become more dangerous than waste from nuclear power plants and solid waste [2]. Pollution with heavy metals is associated with their widespread use in industrial production [19]. Due to imperfect purification systems, heavy metals enter the environment [17], including the soil, polluting and poisoning it [13]. HM are special pollutants, monitoring of which is mandatory in all environments [3]. Soil is the main environment into which heavy metals enter, including from the atmosphere and the aquatic environment [20]. It also serves as a source of secondary pollution of surface air and waters that flow from it into the World Ocean [11]. HM are absorbed from the soil by plants, which then enter food [5].

Soil pollution is one of the main environmental threats in the world, affecting natural processes and the ecosystem as a whole [6]. In particular, such soils are a secondary source of emissions of pollutants into the air, surface and ground waters, and then into the ocean [7].

Mercury, lead, and cadmium are ubiquitous [8]. In any doses, they are alien to the human body and animals and, with an increase in the maximum permissible concentration, lead to a variety of metabolic abnormalities [9]. Lead and cadmium are poorly excreted from the body of warm-blooded animals [21]. They are capable of accumulating in tissues of humans and animals, causing disorders of cardiovascular activity, carcinogenesis, and others [16]. In humans, consumption of 10 mg of cadmium is accompanied by symptoms of poisoning [10].

Material and methods. During the research, samples were taken from chernozem and mountain meadow turf soils common in the Lesser Caucasus

(Dashkasan, Gadabay, Ganja, Shamkir). These samples were analyzed in the laboratory. The amount of Pb, Cd, Hg elements in these soils was studied, determined in the laboratory using atomic absorption spectrophotometry methods. Data was processed using mathematical statistical methods. Their Clark coefficient, eluvial-accumulative coefficient were calculated. For this purpose, different depths are taken as a basis. Depths of 0-19, 19-26, 26-52, 52-78 cm were chosen for chernozem soils, 0-6, 6-27, 27-47, 47-65 cm for mountain meadow turf soils. Analyzes were carried out at these depths and the results are presented in tables.

Results and discussion. We determined the mercury content in soils by atomic absorption (AA) spectroscopy using an experimental analyzer (AA), and the content of lead and cadmium in the soils of the study area using a spectrophotometer (AA).

On the northeastern slope of the Lesser Caucasus, as a result of human industrial activity, the natural state of landscapes is currently being disrupted [14]. Many natural components are subject to degradation, especially soil cover. The study area is rich in mineral resources. In places where igneous rocks are

closely located or have outcrops on the surface of the earth, ore minerals are common, such as iron ore (Dashkesan), alunites (Zeylik Alunitdag), polymetals (Mekhmana), mercury (Shorbulag, Agyatag), copper, molybdenum, and in other territories, deposits of marble, building materials, and mineral waters are of great economic importance (in the Kelbajar region of Istisu, in Shusha Shirilan and Turshsu).

Mountain brown forest leached soils in the area of our research are distributed in the Dashkesan region in the southern part of the ore processing enterprise.

With the open-pit method of mining in this region of the Republic of Azerbaijan, rocks containing toxic chemical elements, such as lead, cadmium and mercury, are opened, mixed and transported. The development of deposits is accompanied by disturbance and contamination of the soil cover. Industrial waste, having a strong polluting effect on agricultural landscapes, on the concentration of heavy metals (Pb, Cd, Hg) in soils, causes large deviations from permissible standards (PS) (Table 1) [15] and this has a very negative effect on the quality of agricultural plants, human health, and others.

Table 1

Maximum permissible limits for heavy metals in soil

Heavy metals mg/kg	EU STD mg/kg	US STD mg/kg	UK STD mg/kg	WHO mg/kg
Pb	300	300	70	0.3-10
Cd	3.0	400	1,4	0.002-0.5
Hg	-	-	-	0.001-0.04

Note: WHO = World Health Organization, STD = Standard

All this requires a comprehensive study of the behavior of heavy metals (Pb, Cd, Hg) in various soil types, since knowledge of the fate of highly toxic metals, the mechanism of their fixation and migration ability will make it possible to predict the extent of pollution and develop practical measures.

The content and distribution features of heavy metals (Pb, Cd, Hg) in soils and industrial dumps of the northeastern slope of the Lesser Caucasus have not been studied to date. The obvious insufficient amount of data on the problem under consideration determined the topic of this article; it has scientific and practical significance for studying the content of heavy metals (Pb, Cd, Hg) in various soil types and industrial dumps, which are a source of environmental pollution in this region of the Republic of Azerbaijan (Figure).

The study area covers territories from low mountains to high mountains, where the following soil types and subtypes are common.

Mountain chernozem (regur soil) leached soils.

These soils in the study area are distributed mainly in the Gadabay and Dashkesan regions. The main pollu-

ting enterprises in these regions and near them are the aluminum plant, ore refining enterprises, ore extraction. For example, Dashkasan ore refining enterprise, Ganja aluminum plant, Gadabey ore extraction enterprise, etc. The waste of Dashkesan OJSC was 2.4 cubic km in 2016. This was calculated using the Triangulation method [1]. The distribution of heavy metals was studied along section 1 and is characterized by the data in Table 2. In the distribution of gross reserves of lead in leached chernozem soils, a certain relationship between Pb and humus is noted.

At the same time, the maximum amount of gross lead is observed in the more humified horizon (9.0 mg/kg) and soil-forming rock (12.0 mg/kg). The illuvial horizon is also characterized by a relatively high concentration (6.0 mg/kg). This is explained by the fact that from this horizon, during the leaching process, lead ($EAC = 0.33$) is carried out beyond the soil profile. The Clarke concentration (CC) of lead in the studied soils reaches a value of 0.25. If we compare the amount of Pb, Cd and Hg in the soil with the standards, the amount of Pb is 9-12 mg/kg and does not differ much from the norm (0.3-10 mg/kg). Also,

Table 2

Content of heavy metals in mountain chernozem leached soils

№ section	Depth, cm	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Hg (mg/kg)		
		total	CC	EAC	total	CC	EAC	total	CC	EAC
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	0-19	9,0	0,56	0,75	0,17	0,34	1,0	0,048	0,60	1,33
	19-26	4,0	0,25	0,33	0,16	0,32	0,94	0,038	0,48	1,05
	26-52	6,0	0,38	0,50	0,22	0,44	1,29	0,059	0,74	1,64
	52-78	12,0	0,75	1,0	0,17	0,34	1,0	0,036	0,45	1,0

the amount of Cd is 0.17 mg/kg, close to the norm (0.002-0.5 mg/kg). The amount of Hg is 0.036-0.048 mg/kg and does not differ much from the norm (0.001-0.04 mg/kg).

The vertical profile of these soils is characterized by a certain monotony in the distribution of cadmium; one can note a slight accumulation in the illuvial horizon - 0.22 mg/kg, where the accumulation coefficient (EAC) reaches a value of up to 1.29, and the clarke concentration (CC) of cadmium is 0.44 (Table 1 and 2).

Mercury is characterized by differentiation in the vertical profile of mountain leached chernozem soils by two maxima. The first maximum corresponds to the accumulation of the element in the humus-eluvial horizon - 0.48 mg/kg, especially in its

organic part, which is associated with the biogenic factor, and the strong sorption of mercury by humic substances in the soil contributes to the fixation of the metal. The second maximum with a higher value falls on the illuvial horizon (26-52 cm) - 0.59 mg/kg. In the profile of these soils, mercury accumulates (EAC = 1.0-1.64), and its Clarke concentration (CC) in the described soil varies from 0.45 to 0.74.

Mountain meadow turf soils. These soils are located in Dashkasan region (Figure 1). The content and distribution of the studied metals (Pb, Cd, Hg) in the vertical profile of mountain meadow turf soils are presented in Table 3, Section 2.

If we compare the amount of Pb, Cd and Hg in the soil with the standards, the amount of Pb is 6-10 mg/kg and does not differ much from the norm (0.3-

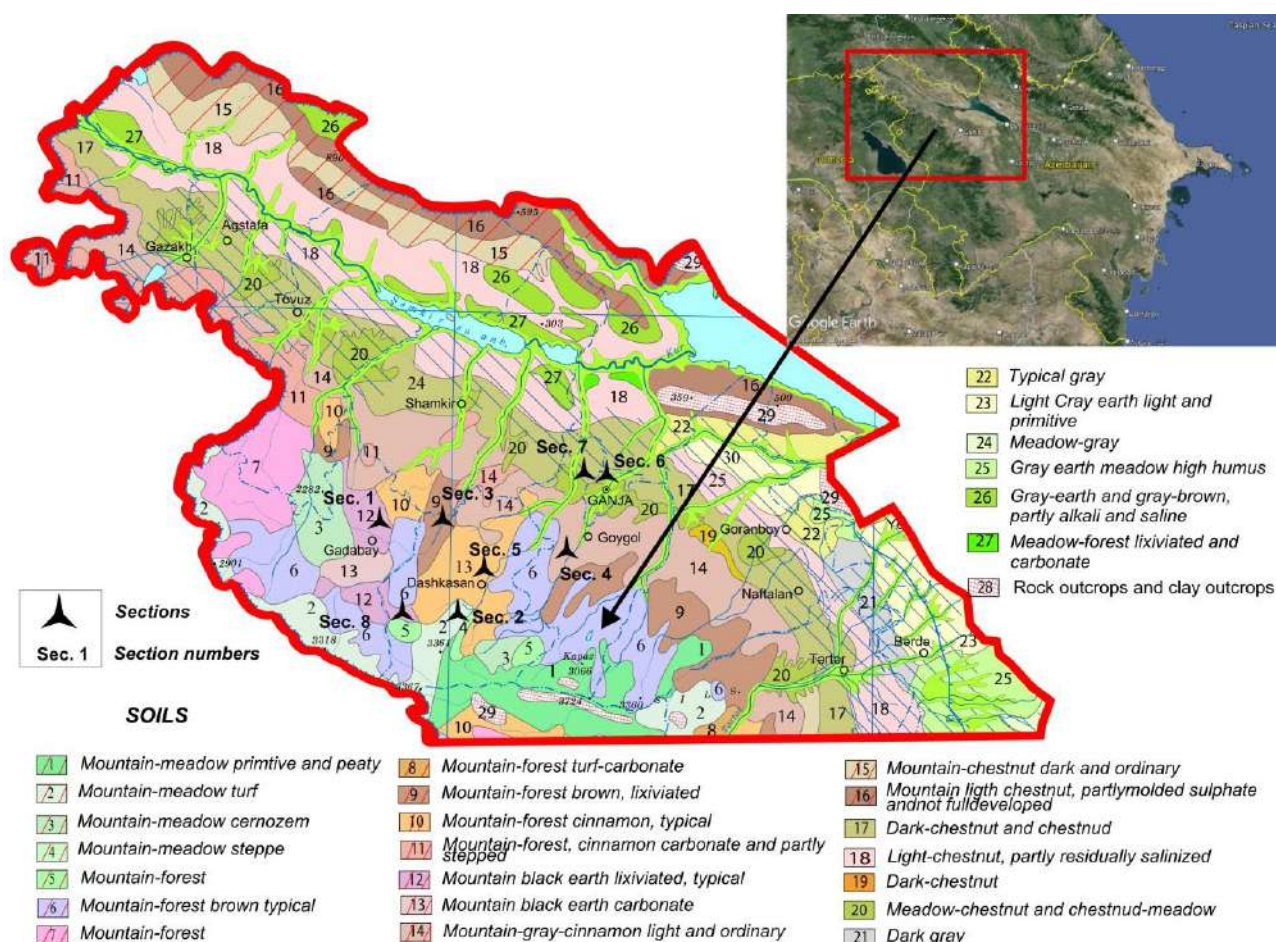


Fig. 1. Soil sections in Lesser Caucasus (investigation area)

Table 3

Content of heavy metals in mountain meadow turf soils

№ section	Depth, cm	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Hg (mg/kg)		
		total	CC	EAC	total	CC	EAC	total	Cc	EAC
2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	0-6	6,0	0,38	0,60	0,14	0,28	0,82	0,048	0,60	2,45
	6-27	8,0	0,50	0,80	0,14	0,28	0,82	0,039	0,49	1,18
	27-47	7,0	0,44	0,70	0,16	0,32	0,94	0,16	2,0	4,84
	47-65	10,0	0,63	1,0	0,17	0,34	1,04	0,035	0,41	1,0

10 mg/kg). Also, the amount of Cd is 0.14-0.17 mg/kg, close to the norm (0.002-0.5 mg/kg). The amount of Hg is 0.035-0.16 mg/kg and does not differ much from the norm (0.001-0.04 mg/kg). The data that was obtained as a result of soil analyzes taken from section 2 shows that lead accumulates in the upper horizons to a lesser extent compared to the soil-forming rock. The maximum Pb content falls on the underlying horizon (47-65 cm) - 10.0 mg/kg, which is the result of leaching from the upper horizons and this is confirmed by the EAC (1.0). In this case, the clarke concentration (CC) for lead is less than 1 and varies from 0.38 to 0.63.

The cadmium content reaches the highest values in the lower horizons - 0.16-0.17 mg/kg. This is also confirmed by the concentration clarke (0.32-0.34) and the eluvial-accumulative coefficient (0.94-1.04).

The distribution of gross mercury reserves is characterized by differentiation in the vertical profile of mountain meadow turf soils with one maximum, which is noted in the horizon of 47-65 cm-0.34 mg/kg. In different horizons, the accumulation coefficient (EAC) is 1.0-4.84, and the concentration clarke varies widely: from 0.41 to 2.0.

The content and distribution of heavy metals (Pb, Cd, Hg) were studied in section 3, Table 4.

Table 4

Content of heavy metals in mountain brown forest leached soils

№ section	Depth, cm	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Hg (mg/kg)		
		total	CC	EAC	total	CC	EAC	total	CC	EAC
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	0-13	10,0	0,63	1,67	0,09	0,18	1,13	0,056	0,70	2,33
	13-38	7,0	0,44	1,17	0,15	0,30	1,88	0,060	0,75	2,5
	38-70	7,0	0,44	1,17	0,15	0,30	1,88	0,022	0,28	0,91
	70-93	6,0	0,38	1,0	0,08	0,16	1,0	0,024	0,30	1,0

Analysis of the data presented in Table 4 shows that the vertical profile of mountain brown forest leached soils is characterized by an uneven distribution of lead. The eluvial-accumulative coefficient (EAC) for lead in various horizons is 1.0-1.67, and the clarke concentration is less than unity. This is due to its low content in the soil-forming rock and the removal of Pb from the soil profile during the leaching water regime.

In the profile of mountain-brown leached soils, cadmium is relatively distributed. No horizon with high Cd content is identified. According to the profile, its concentration varies from 0.08 to 0.15 mg/kg (EAC = 1.0-1.13). In the upper horizon and in the middle part of the soil profile, cadmium accumulates, and the degree of enrichment with the element (CC) is 0.16-0.30.

In section 3 (Figure), mercury is characterized by an uneven distribution, in which the eluvial-accumulative coefficient (EAC) is 0.91-2.5 and the change in mercury content is very pronounced, where a decrease in the concentration of the metal is

observed in the direction of the underlying horizons. The largest amount is noted in the layer 13-38 cm (EAC = 2.5), and the smallest in the layer 38-70 cm (EAC = 0.91).

Chestnut soils. When comparing the lead and cadmium content in these soils along characteristic section 4 (Table 5), the highest values are observed in the upper humus horizons: Pb -20.0 mg/kg, Cd -0.56 mg/kg (Table 5).

With depth, as the amount of humus decreases and the mechanical composition of the soil transitions from medium loamy to heavy loamy varieties, a decrease in the content of Pd and Cd is observed. At the same time, active accumulation of lead and cadmium occurs in the upper horizon of chestnut soils. This is evidenced by the calculated eluvial-accumulative coefficient (EAC), which is 1.0-3.40 for lead; for cadmium 1.0-4.67. The confinement of Pb and Cd to the upper horizon is also due to the fact that in the zone of moderate-dry steppes there is a general accumulation of metals in the soil profile with some excess in the humus horizon. Clarke concentration (CC),

Table 5

Content of heavy metals in chestnut soils (mg/kg)

№ section	Depth, cm	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Hg (mg/kg)		
		total	CC	EAC	total	CC	EAC	total	CC	EAC
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	0-5	20	1,25	3,40	0,56	1,12	4,67	0,041	0,51	0,54
	5-18	17	1,06	4,0	0,47	0,94	3,92	0,022	0,28	0,29
	18-60	9	0,56	1,80	0,23	0,46	1,92	0,063	0,79	0,83
	60-100	5	0,31	1	0,14	0,28	1,17	0,021	0,26	0,28
	100-125	5	0,31	1	0,12	0,24	1	0,076	0,95	1

indicating the degree of enrichment in lead and cadmium, is consistently 1.25; 1.12. The maximum value exceeds the minimum value for Pb by 3, and for Cd by 2.5 times.

Mercury has a different distribution pattern from lead and cadmium. The mercury content is 0.01 mg/kg and at the same time EAC increases to 1.0. The largest amount of this metal is observed in the bed rock - 0.076 mg/kg, which is explained by the enrichment of these rocks with mercury and exceeds its clarke content in the lithosphere (0.08 mg/kg). The mercury content in soil is closely dependent on its amount in soil-forming rocks, and the clarke concentration (CC) for mercury varies within the range of 0.26-0.95.

Impact of dumps on the environment. Rock dumps are very active sources of air, soil, and groundwater (possibly surface) water pollution. Rock dumps are sources of hazardous environmental manifestations associated with the combustion of dump masses, their fluttering, degassing and leaching. The impact of rock dumps is direct or indirect, associated with the interaction of the latter with precipitation, surface and groundwater, as a result of which the water seeping out from under the dumps is saturated with mineral salts and contaminated with harmful components [4].

Relatively more locally, but together the most intense impact on the natural environment is exerted by man-made flows of various pollutants generated from overburden dumps. This determines the need for a comprehensive study of the characteristics of geochemical changes in natural objects, the transformation of which is of great importance in soils.

It should be noted that in the area of our research there are deposits and occurrences of such ore districts as Shamkir, Dashkesan, Gadabay and others. In recent years, the extraction of various minerals from the above areas has been increasing at a rapid pace. During the development of deposits, the soil cover is disturbed and polluted, large areas of the land fund are put out of use for many years, the dynamic balance in landscapes is disrupted, the restoration of which will require many years and very large costs. Therefore, it is extremely important to study the

degree of stability and response of different types of soils to such active geochemical anthropogenic load, such as mining.

In order to study the influence of dump rocks on soil conditions, sections were laid in various dumps, in background soils (control) and in areas adjacent to these soils (Figure). The results of some analyzes are presented in Table 6.

(CC) is the ratio of the content of an element in the soil horizon to its global clarke in the earth's crust.

EAC - (eluvial-accumulative coefficient) is the ratio of the content of an element in the horizon to its content in the soil-forming rock.

Analysis of the data presented in Table 5 shows that **content of heavy metals in cobalt ore dumps and adjacent soils**. The area occupied by cobalt ore dump rocks is 25 hectares. The thickness of the dumps ranges from 10-200 m. Ore mining here for a long time was carried out in adits and therefore the rocks of this deposit are scattered throughout the territory. Vegetation covers no more than 2-3% of the surface.

The nature of the distribution of lead, cadmium and mercury in cobalt ore dumps was studied using the example of table 4, section 3. A comparison of the data obtained as a result of the analyzes shows that the rocks of these dumps contain very high concentrations of the studied heavy metals (Pb, Cd, Hg).

The distribution of lead (section 3) in the rocks of cobalt ore dumps is characterized by two maxima. The first maximum is observed in the layer of 0-20 cm (47.0 mg/kg), and the second is confined to the layer of 80-100 cm (40 mg/kg). According to the eluvial-accumulative coefficient (EAC), during the distribution of lead in the rocks of these dumps, the accumulation of Pb is observed only in the above layers, while in the middle layers there is a significant decrease (EAC = 0.2-0.7). This is explained by the fact that the middle layers of the rock contain lead in low concentrations. The lead content in the dump rocks is 1.8-2.9 times higher than its average content in the lithosphere.

The results of the study showed that the nature of the distribution of cadmium along the conventional horizons, section 3, changes arbitrarily and

Table 6

Content of heavy metals in dumps, control soils and soils adjacent to dumps (mg/kg)

№ section	Depth, cm	Pb (mg/kg)			Cd (mg/kg)			Hg (mg/kg)		
		total	CC	EAC	total	CC	EAC	total	CC	EAC
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cobalt ore dumps										
3	0-20	47,0	2,9	1,2	2,2	4,4	0,5	2,05	25,63	1,3
	20-40	28,0	1,8	0,7	10,0	20,0	2,2	2,02	25,2 5	1,2
	40-60	37,0	2,3	0,9	3,5	7,0	0,8	1,97	24,63	1,2
	60-80	30,0	1,9	0,2	14,0	28,0	3,0	1,52	19,0	0,9
	80-100	40,0	2,5	1,0	4,6	9,0	1,0	1,63	20,38	1,9
Mountain brown forest leached soils (control)										
4	0-20	9,0	0,56	1,8	0,13	0,26	2,2	0,018	0,23	0,8
	20-40	7,0	0,44	1,4	0,16	0,32	2,7	0,015	0,19	0,9
	40-60	6,0	0,38	1,2	0,09	0,18	1,5	0,021	0,26	0,2
	60-80	6,0	0,38	1,2	0,09	0,18	1,5	0,011	0,13	0,5
	80-100	5,0	0,31	1,0	0,06	0,12	1,0	0,024	0,30	1,0
In places where soils adjoin waste dumps										
5	0-20	24,0	1,5	2,4	0,61	1,22	1,6	0,26	3,25	1,2
	20-40	19,0	1,19	1,9	0,54	1,08	1,4	0,30	3,75	1,4
	40-60	16,0	1,0	1,6	0,42	0,84	1,1	0,21	2,63	1,0
	60-80	16,0	1,0	1,6	0,26	0,52	0,7	0,19	2,38	0,9
	80-100	10,0	0,63	1,0	0,38	0,76	1,0	0,21	2,63	1,0

ranges from 2.2-14.0 mg/kg, with a concentration clarke of 4.4-28.0. The value of CC clearly shows the excess content of cadmium in the rocks of these dumps.

In the distribution of mercury in the dump rocks, there is a decrease in its content from the upper layers to the 60-80 cm horizon, where it reaches a value of 1.52 mg/kg. Due to the accumulation, its content increases in the 80-100 cm layer (1.63 mg/kg). The data presented clearly indicate that mercury is in elevated concentrations in the rocks of the studied dumps. Compared to its average content in the lithosphere (0.08 mg/kg), the dump rocks contain 19-25 times more mercury.

The study of the content of heavy metals in soils (section 5, located 100 m from the dump) located at the junction of cobalt ore dumps (Figure) with natural soils in comparison with control section 4 shows that if the lead content in background (control) soils ranges from 5.0 to 9.0 mg/kg; then in soils mixed with dump rocks it varies within 10.0-24.0 mg/kg. The cadmium content in background soils is 0.06-0.16 mg/kg, in soils mixed with dumps 0.26-0.61 mg/kg, and mercury in background soils is 0.011-0.024 mg/kg, and in mixed with dumps 0.19-0.30 mg/kg.

A comparison of the data presented shows that contamination with lead and cadmium affects only the upper layers of the soil and there is 2.7 times more lead and 4.7 times more cadmium than in background soils (control). The accumulation of these metals in the upper layer of soil is explained by their washing away by surface water from dumps and transfer into

the soil. Unlike Pb and Cd, mercury contamination covers the entire vertical profile of the studied soils.

At the same time, soils under the influence of dumps contain 8.8 times more mercury than background soils and the clarke concentration index is 2.4-3.8 times higher than its average content in the lithosphere.

Content of heavy metals in aluminum smelter dumps and adjacent soils. The aluminum plant is located on the northern outskirts of Ganja. The production of this enterprise operates on the basis of the Dashkesan alunite deposit and mainly produces alumina. Over the course of 20-25 years, as a result of the use of imperfect technology, production dumps were formed on the southern side of the plant, covering an area of about 20 hectares, which had a strong impact on the environment and resulted in its pollution.

The distribution of lead, cadmium and mercury in the dumps of the Ganja aluminum smelter is shown in the most complete form in Table 4. The presented analytical data shows that the samples of these dumps contain heavy metals in high concentrations.

The lead content decreases with depth. The upper layers of dumps are especially enriched with this metal, where Pb is: 0-20 cm - 190.0 mg/kg; 20-40 cm - 170.0 mg/kg. In terms of concentration, the lead content exceeds the clarke value by up to 12 times. All layers of dump rocks are characterized by the accumulation of lead (EAC = 1.0-5.4).

The results of the determinations show that in the conventional horizons of the dumps, the cadmium

content decreases towards the underlying layers. At the same time, high concentrations of this metal are observed in the 0-20 cm layer (1.3 mg/kg). Relatively low concentrations are observed at a depth of 80-100 cm (0.70 mg/kg). In general, the cadmium content in the dumps is 2.6 times higher than its average content in the lithosphere. Cadmium accumulates (EAC=1.0-1.9).

Dump samples are characterized by a very high mercury content - 5.09-0.84 mg/kg. Its concentration exceeds the clarke content in all horizons by 10.5-63.6 times. An increase in the eluvial-accumulative coefficient to 6.06 indicates the accumulation of mercury in these dumps.

Let us consider the content of heavy metals in section 8 (10 km distance from dump) located at the junction of the dumps with background (control) soils in comparison with control section 7 (Table 4, Figure). In various layers of soil mixed with dumps, the content of metals (Pb, Cd, Hg) is several times higher than in control soils. This is especially typical for a horizon of 0-20 cm and is associated with their washing away by surface water from dumps and moving into the soil. Thus, in the control soil, in a layer of 0-20 cm, the lead content is 6.0 mg/kg; cadmium - 0.14 mg/kg; mercury - 0.035 mg/kg, while in places where soils adjoin waste dumps (section 28(2) - respectively Pb = 36.0 mg/kg; Cd = 0.65 mg/kg; Hg = 0.68 mg /kg.

The concentration of all metals under consideration exceeds their clarke values several times. The results of the analyzes show that pollution processes affect the entire vertical profile of the soils in the study area.

Conclusion. During field and laboratory studies, the content of lead, cadmium and mercury in the main soil types common in the study area was determined. The diversity of soil and geochemical conditions determined different contents in the distribution of metals both in arable and genetic soil horizons. It was revealed that ongoing mining operations are the main factor in the pollution of the adjacent territory

in the area of our study. Based on the data obtained, maps of the gross contents of heavy metals (Hg, Pb, Cd) for the study area were compiled. It has been established that the source of environmental pollution in this region is overburden rocks from various dumps, which greatly influence the increase in the content of such hazardous metals for the environment as lead, cadmium and mercury.

Under the influence of the Ganja aluminum smelter, the soils are enriched with heavy metals and the arable horizon (0-20 cm) of the surrounding area contains 6 times more lead, 4.6 times more cadmium and 19.4 times more mercury, compared to control soils.

To improve the state of the environment and protect soils from pollution, we have proposed the following recommendations:

- Of particular danger is soil contamination with heavy metals such as mercury, lead, cadmium. Therefore, it is advisable to carry out reclamation of disturbed areas and return them to agriculture and afforestation. As a result, there will be an expansion of arable land and forest areas, which are problematic resources for this study area.

- To reduce the negative impact of pollution sources (mineral deposit dumps in the study area), it is necessary to use modern mining technology.

- Considering that mineral dumps occupy a large area in this area, it is necessary to carry out recycling of waste to obtain additional economic profit.

- It is mandatory to determine environmental and economic damage in monetary terms of negative changes in the environment of the study area as a result of its pollution, in the quality and quantity of natural resources, as well as the consequences of such changes.

- When assessing damage to the natural environment of the study region, the costs of reducing pollution must be taken into account; environmental restoration costs; additional costs due to changes in environmental quality; costs of compensating for risks to human health.

References

1. Amanova, S., Hajiyeva, A., & Jafarova, F. (2024). Preparation of future development scenarios of urban landscapes in accordance with natural and socio-economic conditions (on the example of the cities of the Kura-Araz lowland). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (60), 305-322. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-22>
2. Ayyubova Z.I. (2017). *Ecogeochemical features of technogenic landscapes of the northeastern slope of the Lesser Caucasus (on the example of Dashkasan and Gadabay districts). Works of Azerbaijan Geographical Society. Geography and Natural Resources. 1, Baku, 65-70. [in Azerbaijani]*
3. Bartkowiak, A., Lemanowicz, J., Lamparski, R. (2020). Assessment of selected heavy metals and enzyme activity in soils within the zone of influence of various tree species. *Sci. Rep.*, 10, 14077. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69545-3>
4. Bhunia, P. (2017) *Environmental Toxicants and Hazardous Contaminants: Recent Advances in Technologies for Sustainable Development. J. Hazard. Toxic. Radioact. Waste.*, 21, 02017001. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
5. Bolshakov, V.A. (2002) *Microelements and heavy metals in soils. Soil Science*, 7, 844-849. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/4/042045>

6. Cannon, H.L., Connally, G.G., Epstein, J.B. (1978) Rocks: Geological sources of most trace elements. Report to the Workshop at South Scas Plantation Captiva Island, FL, US. *Geochem Environment*, 3, 17–31. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(96\)05085-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(96)05085-1)
7. Calado, B., Tassinari, C. (2020). Geochemistry of the upper estuarine sediments of the Santos estuary: Provenance and anthropogenic pollution. *J. Geol. Surv. Braz.*, 3, 189–209. <https://doi.org/10.29396/jgsb.2020.v3.n3.4>
8. Cooper, J., Dobson, H. (2007) The benefits of pesticides to mankind and the environment. *Crop Prot.*, 26, 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.03.022>
9. Coskun, A., Horasan, B.Y., Ozturk, A. (2021). Heavy metal distribution in stream sediments and potential ecological risk assessment in Konya Northeast region. *Environ Earth Science*, 80, 181. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09495-9>
10. Damalas, C.A., Eleftherohorinos, I.G. (2011). Pesticide Exposure, Safety Issues, and Risk Assessment Indicators. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 8, 1402–1419. <https://doi.org/10.3390/ijerph8051402>
11. Daukaev, R.A. (2008). Ecological and hygienic assessment of heavy metal pollution of the environment in the city of Ufa. *Bulletin of Tver State University*, 7, 185–188. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.011>
12. Dinis, M.D.L., Fiúza, A. (2021). Assessment of Natural Radioactivity, Heavy Metals, and Particulate Matter in Air and Soil around a Coal-Fired Power Plant-An Integrated Approach. *Atmosphere*, 12, 1433. <https://doi.org/10.3390/atmos12111433>
13. Dubovik, V. (2011). Soil contamination with heavy metals and radionuclides: monitoring and methods for reducing ecotoxicity. *Agricultural biology*, 6, 27–36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>
14. Fan Y., Li Y., Li H., Cheng F. (2018). Evaluating heavy metal accumulation and potential risks in soil-plant systems applied with magnesium slag-based fertilizer. *Chemosphere.*, 197, 382–388. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.055>
15. Hajiyeva, A., Hajiyeva, G., Dadashova, K.K. (2023). Landscape-ecological carcass model of urban landscape and methods of optimize urban landscapes (on the patterns of Ganja and Mingachevir cities). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 277–283. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-20>
16. Jafarova, F.M., Hajieva, A.Z. (2024). Research and environmental assessment of the causes of soil erosion in the south-eastern part of the Greater Caucasus. *News of Tula State University. Geosciences*, 1, 68–76.
17. Hong, AH, Law-Puong, L, Onni SS. (2014). Environmental burden of heavy metal contamination levels in soil from sewage irrigation area of Geriyo catchment, Nigeria. *Civil and Environmental Research*. 6(10), 118–124, <http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-1344-1>
18. Horasan, B.Y., Arik, F. (2019). Assessing Heavy Metal Pollution In The Surface Soils Of Central Anatolia Region Of Turkey Carpathian. *Journal of Earth and Environmental Sciences*, 14(1), 107–118, <https://doi.org/10.26471/cjees/2019/014/063>
19. Horvath, M., Heltai, G., Várhegyi, A., Mbokazi, L.A. (2022). Study on the Possible Relationship between Physico-Chemical Properties of the Covering Soil and the Mobility of Radionuclides and Potentially Toxic Elements in a Recultivated Spoil Bank. *Minerals*, 12, 1534. <https://doi.org/10.3390/min12121534>
20. Kim, K.H., Kabir, E., Jahan, S.A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Sci. Total Environ.*, 575, 525–535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>
21. Lefrancq, M., Imfeld, G., Payraudeau, S., Millet M. (2013). Kresoxim methyl deposition, drift and runoff in a vineyard catchment. *Sci. Total Environ.*, 442, 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.09.082>
22. Li, Z., Ma, Z., Huang, L. (2014). A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Sci. Total Environ.*, 469, 843–853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>
23. Lloyd, J.R.; Lovley, D.R. (2001). Microbial detoxification of metals and radionuclides. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 12, 248–253. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00207-X](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00207-X)
24. Lu, X., Zhang, X., Li, L.Y., Chen, H. (2014). Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China. *Environ. Res.*, 128, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.11.007>
25. Medvedev, I.F., Derevyagin, S.S. (2017). Heavy metals in ecosystems. *Saratov: Foreshortening*, 178.
26. Meng, L., Alengebawy, A., Ai, P., Jin, K., Chen, M., Pan, Y. (2020) Techno-Economic Assessment of Three Modes of Large-Scale Crop Residue Utilization Projects in China. *Energies.*, 13, 3729. <https://doi.org/10.3390/en13143729>
27. Opekunova, M.G. (2002). Heavy metals in soils and plants of the Southern Urals. Ecological state. *Bulletin of St. Petersburg State University*, 1, 37–45.
28. Pastor, S., Creus, A., Parrón, T., Cebulska-Wasilewska, A., Siffel, C., Piperakis, S., Marcos, R. (2003) Biomonitoring of four European populations occupationally exposed to pesticides: Use of micronuclei as biomarkers. *Mutagenesis.*, 18, 249–258. <https://doi.org/10.1093/mutage/18.3.249>
29. Pozzebon, E.A., Seifert, L. (2023). Emerging Environmental Health Risks Associated with the Land Application of Biosolids: A Scoping Review. *Environ. Health*, 22, 57. <https://doi.org/10.1186/s12940-023-01008-4>
30. Raymond, A.W., Felix, E.O. (2012). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks, and Best Available Strategies for Remediation. *Int. Sch. Res. Netw. ISRN Ecol.*, 402647, <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
31. Rosen, V., Chen, Y. (2018). Effects of Compost Application on Soil Vulnerability to Heavy Metal Pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 25, 35221–35231. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>

32. Rosell, G., Quero, C., Coll, J., Guerrero, A. (2008). Biorational insecticides in pest management. *J. Pestic. Sci.*, 33, 103–121. <https://doi.org/10.1584/jpestics.33.201>
33. Saravi, S.S., Dehpour, A.R. (2016). Potential role of organochlorine pesticides in the pathogenesis of neurodevelopmental, neurodegenerative, and neurobehavioral disorders: A review. *Life Sci.*, 145, 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2015.11.006>
34. Shehu, I.; Demaku, S.; Morina, M. (2016). Heavy Metals in Soil and Vegetables in Anadriya Region as a Result of the use of Pesticides, Herbicides and Fertilizers. *J. Int. Environ. Appl. Sci.*, 15, 191–196. <https://doi.org/10.3390/land11081346>
35. Sutkowska, K., Teper, L., Czech, T., Hulok, T., Olszak, M., Zogala, J. (2020). Quality of Peri-Urban Soil Developed from Ore-Bearing Carbonates: Heavy Metal Levels and Source Apportionment Assessed Using Pollution Indices. *Minerals.*, 10, 1140. <https://doi.org/10.3390/min10121140>
36. Tangahu, B.V., Sheikh, Abdullah, S.R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., Mukhlisin, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *Int. J. Chem. Eng.*, 2011, 1–31. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
37. Tong, S., Li, H., Wang, L., Tudi, M., Yang, L. (2020). Concentration, Spatial Distribution, Contamination Degree and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils across China between 2003 and 2019—A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 17, 3099. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093099>
38. Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M.R. (2016). Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environ. Int.*, 88, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
39. Uhl, A., Melnyk, O., Melnyk, Y., Manko, P., Brunn, A., & Fesyuk, V. (2024). Remote sensing monitoring of changes in forest cover in the Volyn region: a cross section for the first two decades of the 21st century. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (60), 272–283. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-19>
40. Verger, P.J.P., Boobis, A.R. (2013). Reevaluate pesticides for food security and safety. *Science.*, 341, 717–718. <https://doi.org/10.1126/science.1241572>
41. Wei, Z., Deng, Z. (2022). Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis. *J. Environ. Radioact.*, 242, 106778. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4903935/v1>
42. Wickerham, E.L., Lozoff, B., Shao, J., Kaciroti, N., Xia, Y., Meeker, J.D. (2012). Reduced birth weight in relation to pesticide mixtures detected in cord blood of full-term infants. *Environ. Int.*, 47, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.007>
43. Xiao, R., Wang, S., Li, R., Wang, J.J., Zhang, Z. (2017). Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 141, 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.002>
44. Ying, L., Shaogang, L., Xiaoyang, C. (2016). Assessment of heavy metal pollution and human health risk in urban soils of a coal mining city in East China. *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.*, 22, 1359–1374. <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1174924>
45. Zhang, X., Yan, L., Liu, J., Zhang, Z., Tan, C. (2019). Removal of different kinds of heavy metals by novel PPG-nZVI beads and their application in simulated stormwater infiltration facility. *Appl. Sci.*, 9, 4213. <https://doi.org/10.3390/app9204213>
46. Zhang, W., Liu, M., Li, C. (2020). Soil heavy metal contamination assessment in the hun-taizi River watershed. *China. Sci. Rep.*, 10, 8730. <https://doi.org/10.3390/w16192723>
47. Zhong, X., Gan, Y., Deng, Y. (2021). Distribution, origin and speciation of soil selenium in the black soil region of Northeast China. *Environ. Geochem. Health*, 4, 1257–1271. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00691-3>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Основні причини забруднення ґрунтів важкими металами (Pb, Cd, Hg) на північно-східному схилі Малого Кавказу Азербайджанської Республіки

Адік Мамедов ¹

д. філософії (сільське господарство),

¹ Азербайджанський державний економічний університет, Баку, Азербайджан;

Асадулла Абдуллаєв ¹

д. філософії (географія)

Предметом обговорення є забруднення ґрунтів – вид антропогенної деградації, при якому вміст хімічних речовин у ґрунтах, що піддаються антропогенному впливу, перевищує природний регіональний фоновий рівень. Населення Землі стрімко зростає. Зростання населення вимагає забезпечення продуктами харчування та

задоволення їх споживання. У цей час забруднюється навколишнє середовище. Особливо забруднюють ґрунт промисловість і сільське господарство. Тому його дослідження є актуальним питанням. Територія досліджень розташована в Малокавказькому фізико-географічному районі, де розташовані найважливіші промислові підприємства нашої країни. Природні умови також сприятливі для розвитку промисловості району. Його багатство на родовища корисних копалин робить актуальним широкомасштабне дослідження території. Для аналізу були взяті проби ґрунту з досліджуваної ділянки та досліджені в лабораторії. Зразки ґрунту були взяті з різних типів ґрунтів Малога Кавказу. За результатами цих аналізів було проведено порівняння типів ґрунтів. Потім були зроблені розрахунки на основі математичних і статистичних методів. В результаті досліджень вивчено вплив техногенних викидів свинцю, кадмію та ртуті на різні типи ґрунтів північно-східного схилу Малога Кавказу та визначено механізми, що визначають стан і поведінку важких металів у фоновому та досліджено забруднені ґрунти. Особливу роль у забрудненні ґрунтів відіграють Гянджінський алюмінієвий завод і Дашкасанський гірничо-збагачувальний комбінат, розташовані на території дослідження. Відмічено, що перевищення вмісту деяких хімічних речовин (Pb, Hg, Cd) у середовищі існування людини (порівняно з природними рівнями) внаслідок їх надходження з антропогенних джерел негативно впливає на довкілля. Процес появи в ґрунті невластивих мікроелементів, що характеризується токсичною дією і впливає на властивості ґрунту, називається забрудненням ґрунту важкими металами. Встановлено, що особливу екологічну небезпеку становить забруднення ґрунту такими хімічними елементами, як свинець, кадмій, ртуть.

Ключові слова: важкі метали (ВМ), ЕАК (елювіально-аккумулятивний коефіцієнт), концентрація Кларка (КК), Малий Кавказ, чорнозем, лучно-дернові ґрунти.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 7 травня 2024 р.

Прийнята 31 липня 2024 р.

Фактори і процеси забруднення супутньо-пластовими водами та нафтопродуктами природного середовища

Василь Суярко¹

д. г.-м. н., професор, кафедра фундаментальної та прикладної геології,

¹ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: vgস্যুরকো@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2841-0071>;

Олег Улицький²

д. геол. н., професор, пров. наук. співроб.,

² ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна,

e-mail: olegulytsky@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-2674-2208>;

Ольга Сердюкова¹

ст. викладач, кафедра фундаментальної та прикладної геології,

e-mail: serd.64@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0002-8946-0243>

Розглянуто фактори і процеси забруднення природного середовища через витоки супутньо-пластових вод (СПВ) та нафтопродуктами в процесі пошуку, розвідки та експлуатації родовищ вуглеводнів. Проаналізовано механізми та екологічні наслідки цього явища а також рівні небезпеки окремих забруднюючих компонентів. Досліджено зміни в природних екосистемах в наслідок надходження до них СПВ та нафтопродуктів. Запропоновано заходи з охорони природного середовища та зменшення екологічних ризиків при бурінні нафтогазових свердловин та розробці родовищ вуглеводнів. Супутньо-пластові води є розсолами хлоридними натрієвими розчинами (розсолами), що формуються на великих глибинах і характеризуються великими напорами. В процесі буріння глибоких свердловин і видобування нафти та газу СПВ можуть фонтанувати, виливаючись на земну поверхню. Це призводить до засолення ґрунтів і виведення з обігу великих площ сільськогосподарських земель, забруднення місцевих водозаборів, порушення життєдіяльності флори і фауни, а головне – до негативної дії на організм людини. Запропоновано розбити види забруднення СПВ, що вміщують нафтопродукти на 4 групи: розчинами хлоридного натрієвого складу; нафтопродуктами; токсичними компонентами СПВ та нафтопродуктів; теплове забруднення термальними СПВ. Визначено фактори природної захищеності підземних вод від забруднення. Інтенсивний водообмін в зоні інфільтрації призводить як до швидкого забруднення, так і до швидкого очищення ґрунтових та безнапірних підземних вод. Підземні води, що залягають глибше, за рахунок гідродинамічних напорів виштовхують забруднюючі речовини з водоносних горизонтів і залишаються чистими. Наведено хімічні елементи та сполуки СПВ і нафтопродуктів, що належать до першого, другого та третього класів небезпеки. Зазначено наслідки їх негативного впливу на організм людини. Зроблений висновок про необхідність екологічного моніторингу поблизу нафтових і газових промислів. Наголошено на екологічній та економічній доцільності використання СПВ як гідромінеральної сировини для промислового вилучення з них цінних хімічних елементів.

Ключові слова: супутньо-пластові води, нафтопродукти, природне середовище, забруднення, природна захищеність, екологічні ризики, ґрунти, ґрунтові води, підземні води.

Як цитувати: Суярко Василь. Фактори і процеси забруднення супутньо-пластовими водами та нафтопродуктами природного середовища / Василь Суярко, Олег Улицький, Ольга Сердюкова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 369-376. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-29>

In cites: Suyarko Vasyly, Ulytskyi Oleg, Serdiukova Olga (2024). Factors and processes of natural environment contamination with substitute waters and petroleum products. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 369-376. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-29> [in Ukrainian]

Постановка проблеми – визначити фактори і процеси забруднення супутньо-пластовими водами природного середовища.

Предмет дослідження – супутньо-пластові води нафтогазових свердловин.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні особливості супутньо-пластових розчинів, що вміщують вуглеводні та процеси їхнього впливу на природні екологічні системи.

Актуальність теми дослідження визначається небезпекою супутньо-пластових вод і нафтопродуктів для природних екологічних систем та здоров'я людини.

Однією з найважливіших екологічних проблем, що виникають в процесі пошуку, розвідки

та розробки родовищ вуглеводнів є забруднення природного середовища супутньо-пластовими водами (СПВ) які формуються на великих глибинах і часто вміщують нафтопродукти. СПВ мають хлоридний натрієвий склад, велику мінералізацію, що часто перевищує 150–200 г/дм³, лужну реакцію (рН>8), високу температуру (до 100–150°C) і вище. Вони часто забруднені нафтопродуктами і мають у своєму складі хімічні елементи та сполуки нехарактерні для вод інфільтраційної гідрогеодинамічної системи [4, 8]. Все це робить СПВ не лише аномальними для верхньої частини гідрогеологічного розрізу, а й агресивними до інфільтраційних вод ґрунтів та поверхневих вод [12]. Забруднення СПВ, які разом з нафтопродук-

тами попадають зі свердловин на земну поверхню зазвичай відбувається через затрубні потоки та поверхневі виливи які часто супроводжуються фонтануванням [1]. Це відбувається не лише під час аварій, а й в процесі буріння глибоких свердловин у звичайному режимі. Витоки СПВ, зокрема, призводять до збільшення мінералізації прісних вод зміни їх складу з гідрокарбонатного (кальцієвого, магнієвого, натрієвого) на гідрокарбонатно хлоридний, а також виникнення у приповерхневих водах контрастних гідрогеотермічних та гідрогеохімічних аномалій вуглеводнів, фенолів, важких металів, рідкісних і розсіяних хімічних елементів тощо. Особливо це стосується ґрунтових вод, які у разі виливів СПВ на земну поверхню, приймають на себе основне екологічне навантаження.

Сучасний рівень досліджень. Проблема забруднення природного середовища СПВ та нафтопродуктами серйозно постала в середині минулого століття. Виливи їх із глибоких нафтогазових свердловин завдають все більшої шкоди водопостачанню, поверхневим водоймам та сільському господарству. Інколи це набувало катастрофічних наслідків.

Паралельно все більше уваги стало приділятися впливу різних компонентів забруднення на організм людини. На сьогодні різні аспекти цієї багатогранної проблеми вивчаються не лише екологами, гідрогеологами, геохіміками, агрохіміками а й медиками, біологами та іншими фахівцями. Вони намагаються визначити можливі екологічні ризики від цього, дуже розповсюдженого виду забруднення, а й розробити ефективні методи зниження його негативної дії на різні природні екосистеми. Серед дослідників, які з позицій екологічної геохімії займаються цією проблемою слід назвати американських (P. M. Saint Vinsent, A. Grant, M. D. Reeder, N. J. Pekney, J. Hozchoner), канадських (J. P. Williams, M. Kang), польських (S. Wolkowicz, O. Kozłowska, K. Zglincki), норвежських (A. Abrahamson, B. Brunstorm, T. Bekke), британських (D. Boesch, N. Rabalais), індійських (R. Priatna, E. Syahbandi) та багатьох інших з різних країн світу.

В Україні значний внесок у дослідження проблеми забруднення СПВ та нафтопродуктами зробили О. Адаменко, М. Огняник, С. Назаренко, В. Колодій, В. Бойко, Р. Гаврилюк, О. Мельник, О. Манюк, В. Суярко, Е. Іванов, Д. Дядін, С. Дригулич, О. Улицький, Н. Німець, Н. Д'яченко та багато інших фахівців. В їх публікаціях розглянуто як загальні екологічні наслідки забруднення природного довкілля СПВ та нафтопродуктами, так і спеціальні аспекти цієї проблеми в основних нафтогазоносних регіонах держави. Хоча в цілому зазначена проблема постійно досліджується, дея-

кі її аспекти залишаються недостатньо вивченими. Саме їх автори і намагалися висвітлити у даній публікації.

Викладення основного матеріалу. Супутньо-пластові хлоридні натрієві води і розсоли, які супроводжують родовища вуглеводнів формуються на великих глибинах (1000–1500 м і більше). Через це вони мають високі напори а їх висхідне розвантаження спостерігається як по зонах розломів так і по глибоких свердловинах [4]. Виливаючись на поверхню, СПВ разом з нафтопродуктами насичують пухкі ґрунти четвертинного віку на 1–1,5 % від їх об'єму, проникаючи на глибину –1,5 м і більше [1].

Викиди з нафтогазових свердловин періодично трапляються в процесі буріння, випробування пластів та видобування нафти і газу. Під час значної аварії свердловина в режимі фонтанування за добу може викинути десятки тисяч кубометрів розсолів разом з десятками тон нафтопродуктів. Аварійне неконтрольоване фонтанування може тривати досить довго, забруднюючи все більші і більші площі [3, 12, 21]. Такі ситуації, нажаль, спостерігаються в різних регіонах України.

Моніторинг розповсюдження забруднення соленими розчинами дозволив нам визначити, що у ґрунтових водах і перших від поверхні водоносних горизонтах воно може охоплювати площі у десятки квадратних кілометрів зі швидкістю 1–2 м² на добу [7]. Аналогічні показники наводять і інші автори [12,19]. Швидкому розповсюдженню забруднення сприяють товсті шари пухких четвертинних відкладів (ґрунтів) та тріщинуватість вивітрених порід різного віку, що виходять на денну поверхню (крейда, пісковики, вапняки тощо). Цей процес значно прискорюється у породах розбитих густою мережею тектонічних порушень і особливо – в зонах глибинних розломів [8].

На нашу думку, процеси забруднення СПВ, що вміщують нафтопродукти, для більшої конкретизації їх причин і наслідків можна розбити на чотири групи: а) високо мінералізованими хлоридними натрієвими розчинами (розсолами); б) нафтопродуктами; в) токсичними компонентами СПВ та нафтопродуктів; г) теплове забруднення термальними СПВ. При цьому теплове забруднення (на 1–5°C) автори розглядають, як важливий фактор міграційної рухливості різних забруднюючих речовин та активзації фізико-хімічних процесів в природних екологічних системах.

Взаємодія солених розчинів з мінерально-органічним комплексом ґрунтів і вивітрілих осадових порід призводить до входження катіонів Na⁺ та K⁺ до поглинаючого мінерального комплексу. Внаслідок цього утворюються солонцюваті ґрунти або «солончаки», що характеризуються певними геохімічними особливостями: присут-

ністю органічного карбону (C_{org}), відновлювальними процесами в них ($Eh < 0$) та формуванням тут специфічних форм міграції у вигляді хлоридних комплексних сполук [8, 14].

Логічним наслідком засолення ґрунтів є суттєве підвищення в них концентрацій $NaCl$ – (до 5 % і більше від об'ємної маси), а також різке збільшення (часто – на 1–2 порядки величини мінералізації ґрунтових вод). З гідрокарбонатних кальцієвих (магнієвих, натрієвих), нейтральних (pH 6,8–7,2), прісних або слабомінералізованих (M 1,0–3,0 г/дм³), вони перетворюються в гідрокарбонатні хлоридні та хлоридні гідрокарбонатні натрієві з величиною pH до 7,6–7,8 і мінералізацією від 5 до 10 а іноді до 30–35 г/дм³ [2, 14]. Це стає причиною виведення великих площ родючих чорноземів з сільськогосподарського обігу, оскільки у рослин під дією солених ґрунтових вод відбуваються різкі зміни в організації клітинних комплексів росту – збільшується хаотичність і зменшується впорядкованість процесів, які відбуваються в клітинах рослин. Результатом таких змін є гальмування метаболічних процесів, які регулюють зростання, а відтак – і урожайність сіль-

ськогосподарських рослин [2, 14].

Геохімічний тип СПВ в різних нафтогазоносних регіонах є хлоридним натрієвим. Тому помітне збільшення соленості (на смак) у неглибоких колодязях разом з присутністю нафтопродуктів (смак, запах, колір) як поблизу нафтогазових промислів так і окремих пошуково-розвідувальних свердловин на нафту і газ однозначно свідчать про забруднення питних вод СПВ та нафтопродуктами.

СПВ (розсоли) вміщують понад 50 мікроелементів, більше 30 з яких є металами [8,10,14,18]. Більшість з них у великих ($> ГДК$) концентраціях за довготривалого вжитку негативно впливають на організм людини (табл. 1).

Динаміка ґрунтових і підземних вод зони вільного водообміну має великий вплив на забруднення підземної гідросфери. Швидке розповсюдження в них забруднюючих речовин обумовлюється великими швидкостями фільтрації, що змінюється від 0,1 до 1,0 м/добу. В водах руслового алювію та закарстованих карбонатних і галогенних породах ці швидкості досягають 100–150 м/добу, а іноді й більше [8].

Таблиця 1 / Table 1

Небезпечні для організму людини мікроелементи та сполуки у супутньо-пластових водах [7, 8] /
Microelements and compounds in associated formation waters that are dangerous to the human body [7, 8]

Клас токсичності (небезпеки)	Мікроелементи та сполуки	Вплив на організм людини
I	Hg, As, Sb U, NO_2 , NH_4 , Pb, P, F, бензоперен, асфальтени	Нервова, кровоносна, серцево-судинна, статеві, генна системи; печінка, нирки, кістки, ракові пухлини
II	B, Li, Br, I, Cu, Cr, Zn, NO_3 , бензол, гексанол, фенол, хлороформ, ізопропилацетат	Нервова, кровоносна, статеві, генна системи; печінка, ракові пухлини
III	Ba, Sr, Cl, S, ксилон, ізобутелен, ацетон	Кровоносна, серцево-судинна системи; шлунково-кишковий тракт

Слід зазначити, що гарні фільтраційні властивості підземних вод зони інфільтрації, з одного боку сприяють швидкому їх забрудненню, а з іншого – швидкому їх очищенню завдяки інтенсивному водообміну.

Інтенсивність і масштаби хлоридно-натрієвого забруднення ґрунтів регулюються геохімічними властивостями мінералів водовміщуючих порід, а також складом міжзернового цементу пісковиків та інших теригенних порід. Розчинення карбонатів – крейди, вапняків, мергелів, тощо призводить до переходу у солені розчини катіонів Ca^{2+} , які є одним із основних компонентів обмінних реакцій у системі «порода – вода». За рахунок утворення хімічно інертних карбонатних комплексів забезпечується видалення із забруднених вод багатьох шкідливих компонентів. Катіонний обмін є процесом урівноваження системи «порода –

вода» за Законом діючих мас [3, 8].

Серед забруднюючих речовин є багато таких, що мають негативний заряд (суспензійно-глинисті, вуглеводневі фракції, тощо). Між катіонами Ca^{2+} і аніонами, що представлені різними атомами та молекулами, у водному розчині відбуваються реакції, внаслідок яких утворюються комплексні сполуки, що швидко випадають в осад на стінках порід-колекторів [8].

Важливу роль у природній захищеності ґрунтових вод відіграє перший від поверхні локальний або й регіональний водотрив, який, зазвичай, представлений глинистими породами. Він є основним фізико-хімічним бар'єром на шляху міграції СПВ та нафтопродуктів [8, 12]. Через це проникнення забруднюючих потоків у нижні безнапірні горизонти підземних вод припиняється або сильно гальмується. Води напірних горизонтів, що

характеризуються висхідним розвантаженням, самі, завдяки напорам, стримують проникнення в них забруднюючих речовин [8].

Нафта і нафтопродукти, що виливаються зі свердловин, можуть утворювати як суцільні потоки, так і скупчення дисперсних часток суспензійних розмірів. В процесі міграції в ґрунтах і ґрунтових водах самостійні фази нафтопродуктів відносно вільно переміщуються до першого механічного бар'єру (часто – непроникних глинистих порід), формуючи лінзи, які знаходяться над дзеркалом ґрунтових вод [12], а суспензії нафтопродуктів мігрують далі доти, доки їх компоненти не нейтралізуються внаслідок обмінних реакцій [9,15]. Експериментально встановлено, що краплинки нафти діаметром 0,5–1,5 мк за концентрації нафти у воді 20–40 млн⁻¹, вільно проходили крізь пісок [13]. Оскільки частки нафти такого розміру мають негативний заряд, вони відштовхуються одна від одної (а не коагулюють), утворюючи більші за розмірами скупчення. Це відбувається, переважно тоді, коли їхня міграція стає обмеженою. Таким чином, дисперговані частки нафти можуть здійснювати міграцію у ґрунтових водах на великі відстані, що вимірюються кілометрами. В процесі міграції негативно зарядженні крапельки нафти притягуються позитивно зарядженими частками порід і ґрунтів. Такими, наприклад, можуть бути катіони заліза (Fe⁺², Fe⁺³), алюмінію (Al⁺³), цинку (Zn⁺²) та інших металів.

Внаслідок цього утворюються стійкі хелатні комплекси з обмеженою міграційною здатністю, що забезпечує поступове очищення ґрунтів від нафтопродуктів [17].

Якщо в ґрунтах вуглеводневе забруднення гальмується процесами сорбції, то у підземних і ґрунтових водах воно розповсюджується на великі площі. Окремі нафтові фракції можуть розчинятися у воді. Величини їх розчинності (мг/дм³) є досить значними: бензин – 9–505; керосин 2–5; дизельне паливо 8–22; загальні нафтопродукти – 10–50. Таким чином, окремі вуглеводні, що входять до складу нафти, є легкорозчинними у воді. Через це у природних водах у великих кількостях присутні різноманітні вуглеводневі сполуки, феноли та органічні кислоти. Проте, найчастіше серед них фіксуються метанові і парафінові вуглеводні з розчинністю метану – 24,4 мг/дм³ та етану 60,4 мг/дм³, а також ароматичні вуглеводні з розчинністю бензолу – 1780 мг/дм³, толуолу – 515 мг/дм³, ксилолу – 175 мг/дм³. У підземних водах забруднених нафтопродуктами, зустрічаються також сполуки, що вміщують кисень (карбонатні кислоти – оцтова, мурашина, саліцилова), поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), нафтенові кислоти, феноли тощо [3, 5,19].

Більшість нафтопродуктів у питних водах становить велику небезпеку для організму людини. ГДК для них знаходиться в інтервалі 0,1–0,3 мг/дм³ (табл. 2).

Таблиця 2 / Table 2

Гранично допустимі концентрації та класи небезпеки деяких компонентів вуглеводневого забруднення підземних вод [8] /

Maximum permissible concentrations and hazard classes of some components of hydrocarbon pollution of groundwater [8]

№ п/п	Вуглеводневі компоненти	ГДК, мг/дм ³	Клас небезпеки
1.	Бензопірен	0,001	1
2.	Етилацетат	0,2	2
3.	1,2-дихлоретан	0,02	2
4.	Бензол	0,5	2
5.	3-гексанол	0,01	2
6.	Ізопропілацетат	0,2	2
7.	Феноли	0,001	3
8.	Загальні нафтопродукти	0,1-0,3	2

Проблема забруднення навколишнього природного середовища не вирішується без розробки та удосконалення методик, спрямованих на зниження екологічних ризиків, що пов'язані з бурінням нафтогазових свердловин та видобуванням вуглеводнів.

Серед основних технологічних прийомів, що запобігають забрудненню і використовуються в процесі буріння: надійна герметизація затрубного простору; ізоляція продуктивних пластів; зниження токсичності хімічних реагентів у бурових

промивальних рідинах та надійна ізоляція амбарів-накопичувачів з СПВ від ґрунтових та підземних вод [1, 3, 10].

Найдоцільнішим методом знешкодження СПВ, що виливаються на земну поверхню, є використання їх як гідромінеральної сировини з метою промислового вилучення галогенів (Br, S, Cl), рідкісних лугів (Ls, Rb, Sc) та широкого спектра інших цінних хімічних елементів. Оскільки гідромінеральна сировина у вигляді розчинів різноманітного хімічного складу десятки років ши-

роко використовується як природний ресурс у різних країнах світу (США, Канада, Італія, Японія, Ізраїль, Німеччина та ін.), ця проблема в Україні вже давно повинна переміститися з теоретичної у практичну площину. Це питання постійно дискутується в роботах як вітчизняних [5, 7], так і іноземних дослідників [14, 18].

Давно відомо, що для знешкодження СПВ їх можна захоронювати у глибокі поглинаючі горизонти. Такий метод застосовується на більшості нафтогазових свердловин України. Перед його застосуванням слід уважно дослідити геологічну будову та структурно-тектонічні особливості району захоронення, визначивши надійність герметичності геологічних структур, яка б виключала висхідне розвантаження захоронених рідин по зонах гідродинамічно відкритих розломів. У разі витискання назад, до земної поверхні, захоронені СПВ можуть забруднювати не лише ґрунти, ґрунтові та безнапірні води зони вільного водообміну, а й підземні води водоносних горизонтів і комплексів, що використовуються для централізованого водопостачання. Такі випадки не раз спостерігалися в районах де геологічні породи інтенсивно розбиті розривними порушеннями глибокого закладання [7].

Скидання СПВ з нафтопродуктами по земній поверхні з використанням рельєфу місцевості (балки, яри, кар'єри тощо) є дешевим і водночас дуже небезпечним методом видалення цих агресивних солених розчинів від місць виливу, якими є нафтогазові свердловини. Такі дії призводять не лише до засолення ґрунтів, а й до інших небезпечних наслідків у підземних водах та поверхневих водоймах (як це описано вище). Саме тому скидання СПВ у водойми жорстко обмежується Законами України, державними нормативами та необхідністю отримання відповідних офіційних дозволів.

Сучасними методами знешкодження СПВ та нафтопродуктів є очищення їх із застосуванням хімічних реагентів зокрема демінералізаторів та деемульгаторів [6]. Ці методи доцільно застосовувати перед захороненням СПВ та нафтопродуктів у поглинаючі горизонти, скиданням їх у водойми а також при зберіганні в амбарах-накопичувачах. Деякі закордонні компанії успішно застосовують для демінералізації СПВ метод електролізу [14].

Існує також багато інших методів зменшення екологічного навантаження СПВ і нафтопродуктів на природні екологічні системи. Деякі з них вже давно використовуються в Україні, а решта ще потребує обґрунтування доцільності їх використання та впровадження в практику нафтогазовидобування.

Висновки. Проведене авторами статті дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Супутньо-пластові води (СПВ), що вили-

ваються на поверхню з глибоких нафтогазових свердловин, є високомінералізованими хлоридними натрієвими розчинами (розсолами), що характеризуються мінералізацією до 150–200 г/дм³ і більше, високою температурою, яка інколи перевищує 150⁰С, лужністю (рН 8–9) та хімічною агресивністю. Вони формуються у глибоких горизонтах літосфери, супроводжуючи скупчення вуглеводнів і мають високі напори. В процесі буріння пошуково-розвідувальних свердловин та видобування нафти і газу, СПВ, які зазвичай вміщують нафтопродукти, можуть фонтанувати, виливаючись на денну поверхню та забруднюючи ґрунти, ґрунтові та безнапірні підземні води, а також поверхневі води. Це призводить до засолення ґрунтів і вилучення з обігу великих площ сільськогосподарських угідь, забруднення та виведення з ладу місцевих водозаборів, порушення життєдіяльності флори і фауни, а головне – до важких неінфекційних захворювань у людей.

2. Забруднення природного середовища СПВ, що вміщують нафтопродукти, можна поділити на 4 види: а) високомінералізованими хлоридними натрієвими розсолами; б) загальними нафтопродуктами; в) токсичними компонентами СПВ та нафтопродуктів; г) термальними розсолами (теплове забруднення). З усіма цими видами забруднення можна успішно боротися лише за умови врахування природних геологічних, гідрогеологічних, еколого-геохімічних та геоморфологічних особливостей територій досліджень, а також факторів і процесів його розповсюдження.

3. Серед великої кількості хімічних елементів та сполук, що входять до складу СПВ та нафтопродуктів, є такі, що належать до найнебезпечніших і відповідають першому, другому і третьому класу токсичності. Їх концентрації часто на порядки перевищують норми ГДК і тому за умови довготривалого вживання вони можуть стати причиною тяжких неінфекційних захворювань у людини. Через це поблизу нафтогазових промислів необхідно запроваджувати постійний екологічний моніторинг ґрунтів, ґрунтових, підземних та поверхневих вод.

4. Природні води – найкраще середовище міграції забруднюючих речовин, а їх природня захищеність дозволяє їм, навіть в умовах величезних антропогенних навантажень, залишатися придатними для використання. Основну роль в захищеності вод відіграє їх динаміка.

Гарні фільтраційні властивості гірських порід в зоні вільного водообміну, з одного боку сприяють їх швидкому забрудненню, а з іншого – завдяки інтенсивному водообміну, забезпечують їх швидке очищення. Важливу роль у природній захищеності ґрунтових вод відіграє перший від поверхні водотривкий горизонт, представлений,

як правило, глиною або суглинком і який є бар'єром на шляху міграції СПВ та нафтопродуктів. Підземні води водоносних горизонтів, що залягають глибше, завдяки гідростатичним напорам і висхідному розвантаженню, самі стримують проникнення в них як солених пластових вод і нафтопродуктів, так і інших забруднюючих речовин.

5. Одним з найкращих методів зниження екологічних ризиків від забруднення СПВ природного середовища в Україні може стати використання цих розсолів як гідромінеральної сировини

з метою вилучення з них галогенів, рідкісних лугів, тощо. Економічна доцільність методу підтверджується використанням розчинів різноманітного хімічного складу та мінералізації і, передусім, розсолів, у країнах передових технологій (США, Канада, Японія, Італія, Ізраїль, Німеччина та ін.) для вилучення з них багатьох цінних хімічних елементів. Такий підхід не лише зменшить витрати на боротьбу із забрудненням, а й забезпечить екологічний та економічний ефект від промислового використання СПВ.

Список використаної літератури

1. Бойко В. С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ / В. С. Бойко. – Київ: Реал-Принт, 2004. – 693 с.
2. Гаванюк Н. Р. Механізм дії мінералізованої (пластової) води на сільськогосподарські рослини / Н. Р. Гаванюк // 36.: Символ дерева у світовій культурі та художній творчості: Науковий вісник, 2006, вип. 16.4 – С.178–186.
3. Дядін Д. В. Гідрохімічні показники осередків забруднення підземних вод на родовищах Східного нафтогазового басейну / Д. В. Дядін // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 2017. – № 1 (15). – С. 3–47.
4. Колодій В. В. Нафтогазова гідрогеологія / В. В. Колодій, І. В. Колодій, Б. Й. Маєвський: Підручник для ВНЗ. – Ів.-Франківськ: Факел, 2009. – 184 с.
5. Німець Н. М. Комплексний аналіз деяких моделей екологічної безпеки супутньо-пластових вод нафтоконденсатних родовищ / Н. М. Німець, Т. В. Брусенцева, Н. С. Цапко // Вісник НЕУ, «ХП», 2020. – № 6. – С. 35–41.
6. Родовенчик Я. В. Нова концепція знешкодження шахтних вод та концентратів в процесі водоочищення / Я. В. Родовенчик, М. Д. Гомеря, В. М. Родовенчик // Вісник НТУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2020. – № 1. – С. 43–49.
7. Суярко В. Г. Екологія підземної гидросфери Донбасу / В. Г. Суярко. – Київ: Знання, 1995. – 69 с.
8. Суярко В. Г. Геохімія підземних вод восточної частини Дніпровсько-Донецького авлакогена / В. Г. Суярко. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2006. – 225 с.
9. Суярко В. Г. Особливості забруднення підземних вод у зонах впливу нафтогазопромислів / В. Г. Суярко, О. О. Сердюкова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2010. – № 294. – С. 222–225.
10. Суярко В. Г. Прогнозування, пошук та розвідка родовищ вуглеводнів / В. Г. Суярко: Підручник для ВНЗ. – Харків: Фоліо, 2015. – 413 с.
11. Троценко А. В. Дослідження впливу на навколишнє середовище місць зберігання нафтошлаків / А. В. Троценко, П. Г. Дригулич, А. В. Пукіш // Екологічна безпека та раціональне природокористування, 2010. – 14 (23). – С. 171–177.
12. Улицький О. Дослідження забруднених нафтопродуктами верхніх водоносних горизонтів за допомогою математичного моделювання / О. Улицький, Н. Д'яченко, А. Соколов, О. Сердюкова // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – № 59. – С. 44–54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04>
13. Al-Ghouti. Produced water characteristics, treatment and reuse: a review / M. A. Al-Ghouti, M. A. Al-Kaubi, M.Y. Asfaq, D.A. Dana // Journal of Water Process Engineering, 2019, 28. – Pp. 222–239.
14. Azetsu-Scott K. Precipitation of heavy metals in produced water: influence on contaminate transport and toxicity / K. Azetsu-Scott, P. Yeats, G. Wohlgeschaffen, J. Dalziel, S. Niven, K. Lee // Marine Environmental Research, 2007. – 63(2). – Pp. 146–167.
15. Barron M.G. Long-term ecological impacts from oil spills: comparison of Exxon Valdez, Hebel Spirit and Deepwater Horizon / M.G. Barron, D. N. Vivian, R. A. Heintz, U. H. Yim // Environmental Science Technology, 2020, 54(11). – Pp. 6456–6467.
16. Boesch D. Biological effects of drilling fluids, drill cuttings and produced waters / D. Boesch, N. N. Rabalals (Eds.) / Long-term Environmental Effects of Offshore Oil and Gas Development, Elsevier Applied Science Publishers, London, 1987. – Pp. 496–538.
17. Cartmill J.C. Flow of a disperse emulsion of crude oil in water through porous media / J.C. Cartmill // AAPG Bull., 54, 1970. – Pp. 2438–2447.
18. Fabota P. Heavy metal pollution and ecological geochemistry of soil impacted by activities of oil industry in the Niger Delta, Nigeria / P. Fabota, C. Ogun Kunle, O. Folarin, F. Oladele // Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4). – Pp. 1–9.
19. Grant A. Toxicity of sediments from around a North Sea oil platform: are metals or hydrocarbons responsible for ecological impacts? / A. Grant // Mar. Environ. Res., 2002. – pp. 95–116.
20. Zabbey N. Conflicts – Oil and water / N. Zabbey, G. J. Obsson // Global Challenges, 1(5), 2017. – Pp. 1–10.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Factors and processes of natural environment contamination with substitute waters and petroleum products

Vasyl Suyarko¹

DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Department of Fundamental and Applied Geology,

¹ V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Oleg Ulytskyi²

DSc (Geology), Professor, Leading Researcher,

² SE "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine;

Olga Serdiukova¹

Senior Lecturer, Department of Fundamental and Applied Geology

ABSTRACT

Statement of the problem determine the factors and processes of contamination of the natural environment with secondary stratum waters.

The subject of the research is associated reservoir waters of oil and gas wells.

The object of the study is the physical and chemical features of associated reservoir solutions containing hydrocarbons and the processes of their influence on natural ecological systems.

The relevance of the research topic is determined by the danger of accompanying reservoir waters and oil products for natural ecological systems and human health. Factors and processes of pollution of the natural environment due to leaks of associated formation water (SW) and oil products in the process of search, exploration and exploitation of hydrocarbon deposits are considered. The mechanisms and ecological consequences of this phenomenon, as well as the level of danger of individual pollutant components, were analyzed. Changes in natural ecosystems as a result of the arrival of sewage sludge and petroleum products into them were studied. Measures to protect the natural environment and reduce environmental risks during drilling of oil and gas wells and development of hydrocarbon deposits are proposed. Accompanying formation waters are brines of sodium chloride solutions (brines) formed at great depths and characterized by high pressures. In the process of drilling deep wells and extracting oil and gas, sewage sludge can gush out onto the earth's surface. This leads to salinization of soils and withdrawal of large areas of agricultural land from circulation, pollution of local water intakes, disruption of the vital activity of flora and fauna, and most importantly – to a negative effect on the human body. It is proposed to divide the types of pollution of sewage containing petroleum products into 4 groups: sodium chloride solutions; petroleum products; toxic components of sewage sludge and petroleum products; thermal pollution by thermal SW.

Results. The factors of natural protection of underground water from pollution have been determined. Intensive water exchange in the infiltration zone leads to both rapid pollution and rapid purification of groundwater and non-pressurized groundwater. Underground waters that lie deeper, due to hydrodynamic pressures, push pollutants out of aquifers and remain clean. The chemical elements and compounds of hazardous waste and oil products belonging to the first, second and third classes of danger are given. The consequences of their negative impact on the human body are indicated. A conclusion was made about the need for environmental monitoring near oil and gas industries. The environmental and economic expediency of using SW as a hydro-mineral raw material for the industrial extraction of valuable chemical elements from them is emphasized.

Keywords: accompanying reservoir waters, oil products, natural environment, pollution, natural protection, ecological risks, soils, groundwater, underground water.

References

1. Boyko V. S. (2004). *Development and exploitation of oil fields*. Kyiv: Real-Print, 693.
2. Gavanyuk N. R. (2006). *Mechanism of action of mineralized (formation) water on agricultural plants*. Collection: *Symbol of the tree in world culture and artistic creation: Scientific Bulletin*, 16.4, 178–186.
3. Dyadin D. V. (2017). *Hydrochemical indicators of groundwater pollution centers in the fields of the Eastern oil and gas basin*. *Environmental safety and balanced resource use*, 1(15), 3–47.
4. Kolodiy V. V., Kolodiy I. V., Mayevsky B. Y. (2009). *Oil and gas hydrogeology. Textbook for universities*. Ivano-Frankivsk: Fakel, 184.
5. Nimets N. M., Brusentseva T. V., Tsapko. N. S. (2020). *Comprehensive analysis of some models of environmental safety of associated formation waters of oil condensate deposits*. *Bulletin of NEU, "KhPI"*, 6. 35–41.
6. Rodovenchyk Ya. V., Gomerya M. D., Rodovenchyk V. M. (2020). *New concept of neutralization of mine waters and concentrates in the process of water purification*. *Bulletin of NTU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Series: chemical engineering, ecology and resource conservation*, 1, 43–49.
7. Suyarko V. G. (1995). *Ecology of the underground hydrosphere of Donbass*. Kyiv: Znannya, 69.
8. Suyarko V. G. (2006). *Geochemistry of groundwater of the eastern part of the Dnieper-Donetsk aulacogen*. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU, 225.
9. Suyarko V. G., Serdyukova O. O. (2010). *Features of groundwater contamination in zones of influence of oil and gas industries*. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (294), 222–225.

10. Suyarko V. G. (2015). *Forecasting, search and exploration of hydrocarbon deposits. Textbook for universities*. Kharkiv: Folio, 413.
11. Trotsenko A. V., Drygulych P. G., Pukish A. V. (2010). Research on the impact of oil and slag storage sites on the environment. *Environmental safety and rational use of nature*, 14(23), 171–177.
12. Ulytsky O., Diachenko N., Sokolov, A., & Serdiukova O. (2023). Studies of oil product pollution in the aeration zone by mathematical modelling. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (59), 44–54. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04>
13. Al-Ghouti M. A., Al-Kaabi M. A., Asfaq M. Y., Dana D. A. (2019). Produced water characteristics, treatment and re-use: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 222–239.
14. Azetsu-Scott K., Yeats P., Wohlgeschaffen G., Dalziel J., Niven S., Lee K. (2007). Precipitation of heavy metals in produced water: influence on contaminate transport and toxicity. *Marine Environmental Research*, 63(2), 146–167.
15. Barron M. G., Vivian D. N., Heintz R. A., Yim U. H. (2020). Long-term ecological impacts from oil spills: comparison of Exxon Valdez, Hebel Spirit and Deepwater Horizon. *Environmental Science Technology*, 54(11), 6456–6467.
16. Boesch D., Rabalais N. N. (Eds.) (1987). *Biological effects of drilling fluids, drill cuttings and produced waters. Long-term Environmental Effects of Offshore Oil and Gas Development*, Elsevier Applied Science Publishers, London, 496–538.
17. Cartmill J.C. (1970). Flow of a disperse emulsion of crude oil in water through porous media. *AAPG Bull.*, 54, 2438–2447.
18. Fabota P., Ogun Kunle C., Folarin O., Oladele F. (2016). Heavy metal pollution and ecological geochemistry of soil impacted by activities of oil industry in the Niger Delta, Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 75(4), 1–9.
19. Grant A. (2002). Toxicity of sediments from around a North Sea oil platform: are metals or hydrocarbons responsible for ecological impacts? *Mar. Environ Res.*, 95–116.
20. Zabbey N., Obsson G. J. (2017). Conflicts – Oil and water. *Global Challenges*, 1(5), 1–10.

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 21 October 2024

Accepted 24 November 2024

Water security status and associated challenges in Guwahati city (India)

*Bharati Hazarika*¹

PhD, Research Scholar, Department of Geography, ¹ Gauhati University, Guwahati, Assam, India,
e-mail: bharatihazarika99@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0007-2397-5870>;

*Bimal K. Kar*¹

PhD, Professor, Department of Geography,
e-mail: bimalkar@guahati.ac.in,  <https://orcid.org/0000-0001-8168-4560>

ABSTRACT

Introduction. Although cities are becoming increasingly developed in all spheres, there occur formidable multidimensional challenges associated with urban development. One such challenge is the water security, as water in the urban areas is the hotspot in regard to its consumption due to fast growing population on small geographical extent. Moreover, the development of urban water system is unable to keep pace with the rapid growth of population in cities, leaving majority of the dwellers lacking access to water supply system.

The purpose of article. This study intends to identify the problems associated with the urban water systems, its challenges in effective supply of water and the resultant water insecurity at households. It examines the water infrastructures in the city since its development in 1930 on a spatio-temporal context. The impact of prevailing water infrastructures on the status of households' water insecurity has also been assessed.

Research Methods. Google earth engine software was used to visualize the spatial spread of urban water networks in the city. A kml file generated from the Google earth was converted to compatible layer in ArcGIS. Purposive sampling technique was adopted for household survey in three different zones, based on distance from reservoirs, slope, reservoir capacity and number of household connections from reservoirs. Selection of households from different zones under each scheme was done on the basis of consumers of urban water system and water security status. Water security status at households has been assessed through its components, quantity, quality, reliability and accessibility.

Main findings. Water infrastructures have been inadequate since a very long time with just one third of the population having access to the urban water systems. Households reported that enhancing the quantity and quality of water, which constitute vital aspects of water security, requires resorting to diverse strategies, incurs considerable cost and compromises welfare. Moreover, there exists a spatial variation in quantity and quality of water obtained from a shared scheme with increasing distance from service reservoirs/plants. Further, along with poor reliability and accessibility from water supply schemes at households, disparities among different water supply schemes have also been revealed.

Scientific novelty and practical value. The article analyzes for the first time the status of urban water security and associated challenges in the city through primary data and information on water infrastructures. The practical value of the study is the possibility of revealing the spatial variation in quantity and quality of water obtained at households despite a shared scheme or system that can be conducted in other studies of developing countries. The results of the study are significant in the context of justifying measures to strategize security of water at individual level.

Keywords: *Guwahati, water supply scheme, quantity, quality, water security.*

In cites: Hazarika Bharati, Kar Bimal K. (2024). Water security status and associated challenges in Guwahati city (India). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 377-391. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-30>

Introduction

Water supply system forms the backbone of sustainable urban development. However, it is often challenged with multifarious issues particularly in developing countries [40, 5]. Basically, the failure in water supply systems in large cities has been associated with fast growth of population, lack of adequate investments in water infrastructures and declining trend of water resources [12, 15]. These factors exert immense pressure on the existing water infrastructure, if they are mostly obsolete and worn out [19]. Lack of investment in augmenting water supply systems has become a common problem in most of the developing countries, as such it hinders the target of achieving the SDG-6 of "water and sanitation for all" under the umbrella of millennium development goals [36, 41]. Many large cities of developing countries

are confronted with lack of universal coverage of municipal water, inadequate water supply, poor water quality, intermittent and unreliable water supply, power cuts, water theft, low pressure in pipes, leakages in distribution system, etc [18, 24]. These challenges are linked with the inefficient water infrastructure system. The obstacles that come on the way towards assured water supply include lack of adequate water source, suboptimal location for setting up of water plant, obstruction in setting up of pipeline network, poor management of the water supply system, lack of adequate monitoring in the supply system, poor quality of supply network materials, etc [22, 38].

Centralized water system and its governance have been the focus areas of research in the recent times particularly in the global south cities considering SDG-6 [3, 40]. Failures in urban water gover-

nance push the city dwellers to increased intensity of water insecurity, basically involving inadequate quantity and quality of water. Ageing urban water systems has considerably reduced its production due to continuous wear and tear of the components, affecting the consumers by gradual decrease in water obtained at households over the years [19]. On the other hand, inadequate information and insufficient monitoring in the distribution system results in frequent leakages of the pipes including disastrous bursts in few cases [21]. Such deficiencies in the distribution system results in substandard water supply, leading to decrease in quantity and deterioration in quality of water, reaching the consumers [42]. A developed country like the United States was reported with approximately 18 per cent of the outbreaks caused from water quality failure due to contaminants entering into the distribution system through leakages [8]. A progressive society in all aspects depends on the reliable quality and adequate quantities of water. Wastage of water through cracks, leakages, faulty valves, illegal connections, thefts in the distribution system was estimated to be more than 40 % in developing countries, leading to remarkable volumes of water loss [42]. Water quantity, one of the prime components of water security, tends to be inadequate with decreased pressure in pipes due to flaws in the distribution system as evident in Delhi [23]. Temporary and prolonged suspension of water supply from a centralized water system has become a common phenomenon in cities of developing countries [21]. Households strategize alternate source of water along with municipal water systems due to reduced accessibility and reliability from the same [44]. It is therefore important to investigate and understand the challenges encountered by the providers and consumers to effectively address the issue of water insecurity, significantly hindering societal and well being of the residents [6].

Urban water provision and governance constitutes vital aspects of development, supposedly ensures water security to the populations. Guwahati city, characterized by rapid urbanization during the last few decades has posed a challenge on the urban water system. Presently the city has populations of more than a million as per estimation. The city is located at the southern banks of Brahmaputra. At the initial development of the city population were concentrated in the north central part of it, along the immediate banks of Brahmaputra, indicating water needs fulfilled by it. The earliest form of the city was a small town with a geographical area of 2.68 sq. km, consisting of only 8 wards with 11,661 populations during 1901 Census [7]. At that time the town was confined to the north central part of the present Guwahati. With the development of communication networks and establishment of provincial institutions

and divisional offices the town began to assume commercial, educational and administrative importance in attracting population from the neighboring districts and other states of India. The growing population and subsequent spatial expansion contributed expansion of municipal area to 7.68 sq. km in 1903 by including three more wards to its earlier eight wards. Accordingly the water plants got constructed in those areas and its governance was also confined to the places of important establishments. The town grew to double in its geographical area by including three more wards to its earlier 11 wards, totaling to reach a total area of 14.24 sq. km in 1961. In response to growing population by inclusion of large areas into municipal boundary the water infrastructures also got developed, although not in tandem as per demands. Again in 1974, after converting the town into municipal corporation the total jurisdiction of the city area rose to 216.79 sq. km with 34 wards. The shifting of the state capital from Shillong (Meghalaya) to Dispur area of Guwahati (Assam) in 1972 had set the trend of rapid growth of the city. Thus the inclusion of villages into the city limit has indeed increased the demand for water supply services. It may be noted that during the process of growth, the city expansion of the town took place towards south, east and west in a semi-circular way. In this way as per demands the water infrastructures also got constructed in the city since 1930; but multiple challenges stood on the way of smooth operation of the water supply. Moreover, spatial variation in quantity and quality of water at households has been an alarming cause of concern in the city since long. Inadequate fund has been identified as the prime obstacle to restore, renovate, manage and augment the municipal water systems. Such challenges are faced by both the providers and consumers of water supply, and in this way both parties often get criticized on the ground that municipal water authorities are often deemed irresponsible and consumers are also frequently criticized as it is hard to satisfy their demands. It may be noted that water supply services in the city are able to cater only just one-third of the population [16]. Therefore, understanding the challenges of both the parties is essential to address the issue in a more sustainable manner.

Materials and Methods

This study has been based on primary and secondary data collected during 2022-2024. Primary data was collected at household level with respect to household size, frequency of households obtaining water per week, average liters of water obtained, hours of water supply, frequency of water supply per day, time of water availability (morning or evening), alternate sources of water to supplement shortages, etc. The secondary data collected from different institutions in the context of the study area includes location and number of water plants and its service

reservoirs, capacity and production of water, ground water information, etc. The primary survey was conducted using a structured schedule-cum-questionnaire at 506 households through a purposive sampling method covering different categories of water supply systems. Data were collected from three different categories of households, such as households near to reservoirs (Zone I), households located in midpart of the distribution system (Zone II) and households located at the extreme or tail end of the distribution system (Zone III). The sampled schemes were 25, which include different types such as old and new schemes including DTWS. The sampled schemes were chosen systematically based on their types of schemes such as capacity, number of connections, locations of reservoirs, distance and elevation to represent the consumers of urban water systems. From each water supply schemes on an average of 21 households were selected from three different parts of the distribution system (Zone I, II & III). This method represents the total consumers of water supply system who experience inequalities in obtaining water from such urban water systems. This method was followed to understand inequalities of water obtained at households away from the service reservoirs.

The collected data were processed and tabulated using Excel software to compare and contrast among different water supply schemes for different aspects of water security. Google Earth was used to locate the water plants and their service reservoirs. A kml point data (keyhole markup language) as a file was converted to vector file in the ArcGIS platform to visualize the spread of different water supply systems in the city. Water samples taken from the household taps were analyzed in the laboratory, which were then summarized and presented in tabular form for different categories of households (Zone I, II & III) to see variation in water quality with distance from service reservoirs. The parameters include pH, total dissolved solids (TDS), total hardness, calcium, residual chlorine, magnesium, iron, fluoride and turbidity which were analyzed in Public Health Engineering Department Division I, located at Bamunimaidam, Guwahati, Government of Assam. A combination of physical and chemical analysis was performed on the samples using turbid meter, litmus paper and titration method for determining concentration of turbidity, pH, hardness and chlorine. The other parameters were analyzed using conductivity or UV detection, titration method using EDTA (chelating agent) and spectrophotometer for TDS, fluoride, magnesium and iron respectively.

Study area

Guwahati city, located in the north-eastern part of India is one of the largest and fastest growing cities in the region. The city currently accommodates more than a million populations (estimated based on 2001-

2011 growth rate) in 216.79 sq. km and it is bordered by Brahmaputra in the north. Apart from the presence of mighty river, large and small wetlands are dotted sporadically including three small rivers (tributaries of the Brahmaputra) in the city, suggesting ample water resources for the dwellers. On the other hand, ground water deposits found at shallower depths has been a great resource for the dwellers considering the spatial variation of municipal water networks.

The city draws water from two sources, the Brahmaputra and ground water within its municipal boundary. Although other small rivers such as Bharalu, Mora Bharalu, Khanajan, Basistha and Bondajan flowing through the city are not being directly used for water supply, but plays a significant role in recharging of ground water, by more than 65 % of the city dwellers. Similarly wetlands either big (including Deeporbeel, Ramsar site of India) or small in different parts of the city also elevates the ground water level, beneficial for constructing deep tube well schemes (DTWS) to supply water to households deprived from the Brahmaputra-based schemes. The city has 135 water plants, but only 34% of the city population has access to the urban water system.

Results and Discussion

Challenges among the Providers

Water infrastructures are essential investments for a livable city, a pre-requisite for health, prosperity and security of a nation. Reliable and secured water infrastructures requires long-term economic inputs that are planned, designed and constructed over time considering current and future growth and development of the city [10]. An urban water infrastructure generally consists of three basic components: the source of water supply, the processing or treatment of the water (water treatment plant) and the distribution of piped network to the users. Water infrastructure/services in Guwahati are numerous, which are maintained by the municipal authorities and a few by the local communities. A total of 135 water plants, large and small are operating in different parts of the city and while distributing to the consumers various challenges occurs.

Obsolete water plants

Water plants in developing countries are characterized by old, poor, and broken components, resulting in reduced production of water than its designed capacity [46]. In fact, the water plants have outlived its engineering life (functioning for more than 30 years) [19]. Similarly, in Guwahati the water plants are unable to produce water as per its designed capacity (Table 1). Except for the newly established water plants (SWGSP & SCGWSP) others are unable to produce as per designed capacity due to malfunctioning of important components. Therefore, lack of renovating the vital components of water plants has often resulted in interrupted and reduced quantity of

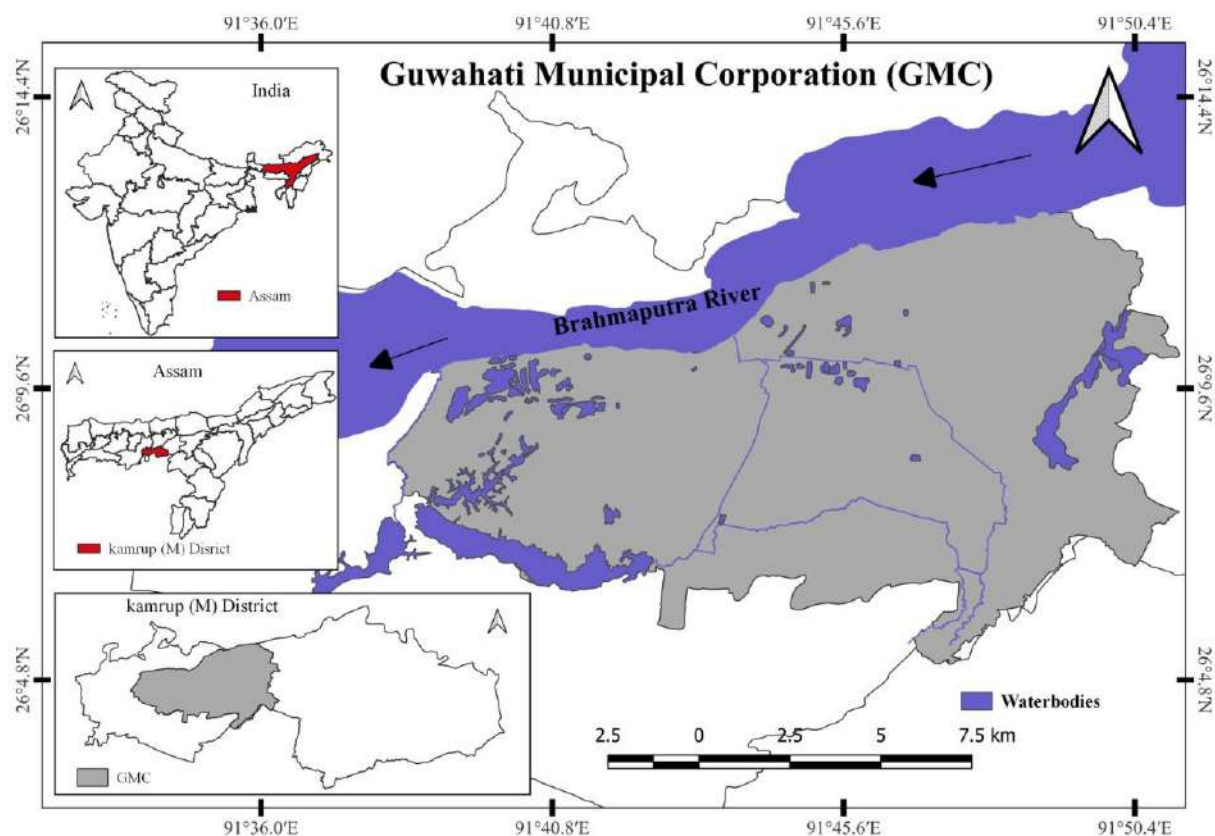


Fig. 1. Location of the study area

Table 1

Capacity and production status of water plants in Guwahati

Location of water treatment plants	Year of Commissioning	Designed Capacity (in MLD)	Production of water (in MLD)	Gap of production (in MLD)
Panbazar	1963	45.00	25.00	20.00
Satpukhuri	1930 (Renovated in 1984)	22.50	15.00	7.50
Kamakhya	1992	4.50	3.50	1.00
Lichubagan, Hengerabari (GMDW& SB)	1996	12.60	7.50	5.10
Sadilapur, Jalukbari (SWGWS)	2018	107.00	20.00	87.00
Kharghuli, Uzanbazar (SCGWSP)	2022	191.00	63.00	128.00
DTWS- GMC-WWW	Since 1983	1.50	1.16	0.34
DTWS- PHED-I	Since 1957	14.19	8.63	5.56
DTWS- PHED- II	Since 1960	8.97	4.67	4.3
Total		400.10	148.46	258.80

Source: Different water supply agencies in Guwahati Metropolitan Corporation, 2024

water supply, low production of water leaving many households deprived of water supply network.

Pipeline cracks/ leakages/ bursts in the distribution system

Leakages in the distribution network are a com-

mon phenomenon in Guwahati which have a significant impact on the quantity and quality of water supply. Another compromising effect is the suspension of water supply, when repairs are undertaken, otherwise innumerable cracks and leakages are left unde-

tected which considerably tends to decrease pressure in pipes. On the other hand, such leakages are the pathways for transmission of unwanted and contaminated elements into the pipelines, resulting in inadequate quality of supply water [13]. The faulty valves lying along the drain is also frequently identified upon receiving complaints of poor water quality. The old water supply schemes are challenged with frequent occurrence of either cracks or leakages; the SWGWSP and SCGWSP however are associated with bursting of pipeline network due to poor quality

of materials. Bursting of pipes or valves can result in a significant upward flow of water, consequently damaging loss of human lives and property in different parts of the city along with occurrence of flash floods, traffic disruption, etc. In May 2023 a disastrous bursting incident from SCGWSP resulted in the loss of two human lives and left around 30 people injured including loss of property of at least 40 houses [28]. Thereafter also multiple bursting occurred in different parts of the city causing infrastructural and property damage.



Fig. 2. Pictures depicting pipeline leakages and bursts in Guwahati
(Source: Internet and author, 2022-24)

Illegal water connection or water theft

There are many unauthorized connections from water networks of municipal water supply system in Guwahati. This type of water theft frequently goes undetected by water authorities and it has consequent effect on pressure in pipes in the adjacent areas [28]. Water is stolen by installing water pumps or booster to enhance pressure in pipes in an attempt to obtain desirable quantity of water. Despite residents' suspects and complaints about installation of water pumps for water theft leading due to unusual pressure fluctuation in the pipes, the concerned water authorities are unable to detect such malpractice in most cases. Although water suppliers have the authority to locate and remove water pumps, the residents hide so effectively that detection remains challenging.

The water authorities have introduced grievance cell to manage water theft complaints including imposition of penalties on the people involved in such theft. But, the number of thefts has not declined as reported in various print and electronic media. It may

be mentioned here that water theft has been addressed in many cities of developing countries by strict metering system and proper field audit [25]. However, it remains a matter of great challenge to overcome the issue of water theft in Guwahati city due to lack of metering system and unskilled man power in recording audit system.

Inadequate funds

Maintenance of the infrastructure necessitates timely renovation and augmentation that demands consistent flow of funds [5]. It is observed that a considerable number of households in the south-central, south-western and eastern parts of Guwahati city are deprived of urban water networks due to huge cost involved in setting up of water plants. However, in other large cities of India majority of the populations has access to the urban water supply system [33, 44]. Moreover, renovation activities are greatly affected due to lack of requisite funds from the concerned authorities. Even the leakages occurring in the distribution system are not concealed due to lack of funds

until they go beyond control. Moreover, the outlived water plants that require thorough renovation have also not been considered, otherwise it could have produced water as per its designed capacity (Table 1). The Brahmaputra carries high silt and it affects materials of water pumps during procurement of the silt-laden raw water. In view of this, the water pumps get damaged and defunct leading to temporary suspension of water supply. The shortage of required funds has also delayed scheduled completion and full commissioning of SCGWSP & SWGWSP in the city. In

fact, although there has been continuous efforts with respect to these two projects to extend the supply network in the proposed command areas, shortage of funds stands on their way of completion and commissioning. Power cuts is also an added problem in ensuring uninterrupted pumping of raw water, which could have been mitigated provided there is dedicated power supply exclusively for pumping operations. Therefore, in totality lack of funds pose long-term challenges, which the old schemes are facing at present.

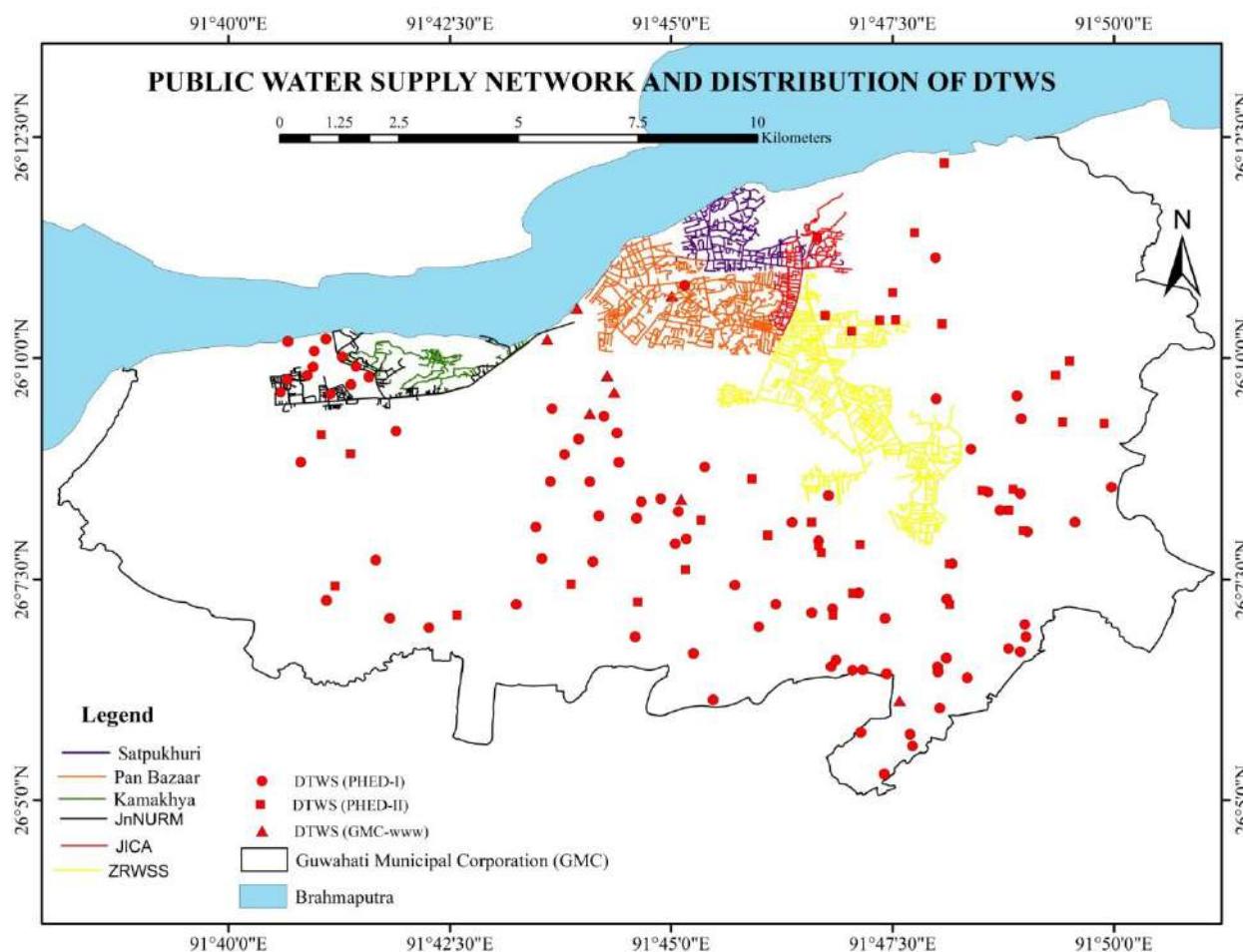


Fig. 3. Public water supply network and distribution of DTWS

Natural calamities

Most of the water infrastructures in Indian cities lack resilience to disasters due to their poor engineering design and management [9]. Occurrence of heavy rains followed by landslides damages the vital components, such as main pipeline through which water is pumped to various reservoirs. Restoration work of such damaged pipeline in the landslide hit area takes a considerably longer time leading to suspension of water supply for more than sixty days [37].

Declining water resources

The Deep Tube Well Schemes (DTWS) being developed in the course of time indicates that such small schemes are important in areas devoid of mega public water supply systems. This has led to heavy

extraction of ground water to cater to the needs of ever increasing demands consequent upon declining ground water levels. The declining trend of ground water resources results in uninterrupted supply of water to households and even temporary suspension of supply. Some of the DTWS, particularly in the eastern part of the city, get defunct over time due to lowering of water table and authorities takes the responsibility to find another location of water source to resume water supply. It however takes a considerable time for resumption of water supply and no alternate supply is available during such period of restoration.

In this way a variety of challenges emerges before the providers of urban water supply, viz. political, natural, manmade, etc, towards aiming at ensur-

ing water security for the dwellers of Guwahati city.

Problems of Water Security among the Consumers

Quantity of Water Supplied at households

In developing countries water quantity received at households from the urban water system varies across its different command or supplied areas [2, 44]. The water supply patterns in Guwahati vary among different water supply schemes as testified by consumers during field survey. Nature of water supply to households is intermittent as all the schemes operating in the city are able to provide three or four times only per week, except the SWGWSP and SCGWSP. In the past (at least 10-15 years back) respondents obtained water daily, but now water is supplied to households thrice a day or sometimes twice

(during various crisis situation) due to increasing household connections from water supply system. To maintain equity for all households intermittent supply strategy is adopted by providing water in phases at different time period (morning and evening) of the day with limited hours of supply. Sometimes due to scarcity of water resources intermittent supply service has become the norm [20]. However, in the present study intermittency has been associated with inadequate infrastructures. Earlier the frequency of water supply in a day was twice, but now for the last many years it has reduced to just once and that too with uncertain time of the day. As the water supply to households is not regular, the city dwellers often have to reschedule their activities or to wait for resumption of water flow in taps.

Table 2

Daily water availability patterns at household level in Guwahati city

Water supply schemes	Number of sampled households	Average number of days water received per week	Average range of number of liters in a single supply per day	Average hours of water supply (in minutes)	Frequency of water supply in a day	Time of water availability
Panbazar	67	3	400- above 3000	45-90	1	Morning & evening
Satpukhuri	84	3	300-3000	40-90	1	Mid-morning & evening
Kamakhya	23	4	500-2500	30-50	1-2	Mid-morning & evening
Lichubagan, Hengrabari (ZRWS) (GMDW& SB)	19	4	800-4000	60-120	1	Morning & evening
Sadilapur, Jalukbari (SWGWSP)	25	7	1500	60-90	1-2	Morning & evening
Kharghuli, Uzanbazar (SCGWSP)	24	7	1500	60-80	1-2	Morning & evening
DTWS-GMC-WWW	19	3	500-1500	40-50	1	Morning & evening
DTWS-PHED-I	178	3	200-1500	30-60	1-2	Morning & evening
DTWS-PHED-II	67	3	200-1500	40-60	1-2	Morning & evening

Source: Primary Survey, 2022-23

The households obtaining volume of water from a shared scheme varies in such a way that some households receive more than 3000 liters in a single supply, while some others with less than 500 liters. Such a low quantity of water to some households is found in the case of Panbazar and Satpukhuri water supply schemes. The households close to the water reservoir get adequate pressure in pipes and therefore receive water more than the national standard (135 lpcd). However, in the middle part and tail end part of the distribution system water availability gradually reduces due to poor pressure in the pipes. This phe-

nomenon is attributed to household connection more than its designed capacity, water theft in the upper part (zone I) by installing booster in taps, illegal connection and unnoticed cracks and leakages in pipes. Water availability at the households for the tail end part goes down to 300-400 liters per day for a 4-5 family size, and also provided only thrice a week, demanding family members to use water conservatively and compromise sanitation. Water is provided once for a maximum of 90 minutes to the tail end part of the distribution system, while the households close to reservoir receives water more than 3000 liters in less

than 45 minutes. The remaining water in the pipes of distribution system flows to the tail end with least pressure which last for 90 minutes to those households. Similar is the case with respect to Kamakhya water scheme and ZRWSS, where quantity of water obtained at households varies significantly. The DTWS also provides water in similar pattern. Sometimes it is provided twice a day. This practice however allows recharging of ground water. Contrastingly, the consumers of new water supply projects get

adequate volume of water daily. The SWGWSP and SCGWSP provide water twice a day so that all households of these this projects get equal volume of water unlike the old schemes in the city. Moreover, these two projects are supplying water daily to ensure water security. Therefore, it is evident that there exists a marked disparity of water availability among the households even drawing water from similar shared schemes.

The prevalence of disparities in household water

Table 3

Disparity in water availability at households within a scheme in Guwahati city

Water supply Schemes/Project	Zone I		Zone II		Zone III	
	No. of sampled households	Average water obtained (in lpcd)	No. of sampled households	Average water obtained (in lpcd)	No. of sampled households	Average water obtained (in lpcd)
Panbazar	24	188	20	100	23	50
Satpukhuri	27	170	30	80	27	38
Kamakhya	7	157	7	125	9	63
Lichubagan, Hengrabari (ZRWSS) (GMDW& SB)	7	182	6	110	6	80
Sadilapur, Jalukbari (SWGWSP)	10	250	7	188	8	167
Kharghuli, Uzanbazar (SCGWSP)	8	220	8	180	8	165
DTWS- GMC-WWW	6	120	7	95	6	45
DTWS- PHED-I	61	110	59	78	58	43
DTWS- PHED- II	23	125	21	100	23	65
Total	173	170	165	118	168	80

Source: Primary Survey, 2022-23.

availability, measured in liters per capita per day (lpcd) sourced from municipal supplies, is a notable phenomenon observed not only in India but also in other developing nations [38]. Guwahati city is facing uneven distribution of water supply with substantial variation in per capita, supply hours and water pressure. This inequality in water availability is a function of slope and distance from the service reservoirs. The households located at higher elevation than the reservoir receive relatively less volume of water due to decreased pressure. However, mechanical water pumping system can help address this issue, a practice which is confined to only few locales due to the cost implications. The households located at higher elevation than the service reservoirs adopt this technique to maintain adequate pressure in pipes.

The households categorized as Zone I generally tend to have desired pressure in pipes and therefore obtain adequate water. These households on an average obtain 170 lpcd, which is above the national standards (135 lpcd) for maintaining proper health, sanitation and hygiene (Table 3). Although water is

not provided daily, the households located in this zone are able to suffice their daily water needs by collecting and storing it for dry pipe days. The intermediate zone (Zone II) tends to have decreased pressure in pipes with consequent decrease in volume of water obtained by the households. This decreased pressure is attributed to increased number of house service connection in the initial part (Zone I) of the distribution system. The average water obtained in this intermediate zone is 118 lpcd. However, there is marked disparity between the schemes, where the water obtained is less than 100 lpcd in the Satpukhuri and DTWS (GMC and PHED-I) (Table 3). Moreover, the households connected to the SWGWSP and SCGWSP are able to obtain adequate water despite increasing distance from service reservoirs due to their efficient supply system. It has become a challenge for the households to cope with low volume of water obtained in zone II. In contrary to Zone I, the Zone III (tail end) part of the distribution system has the least pressure in pipes due to greater number of connections and leakages in the upper part. The

households falling into this zone endure with the supply system as they obtain the lowest volume of water with an average of 80 lpcd. Hence, the distance from the service reservoirs plays an important role in keeping inequality of water quantity per capita and the challenges of inadequacy within an urban water system.

Quality of Supply Water at households

The health and wellbeing of an individual depends upon the quality of water consumed. However, lack of adequate supply of safe drinking water among the people in most of the developing nations greatly affects their welfare and development. [31]. But the irony is that today more than 50% of the global city dwellers do not have access to safe water [41]. In the case of Guwahati city its distribution network is characterized by ageing pipelines, corrosion and leaching of pipe materials, intrusion of contaminants and unwanted solid particles through cracks and leakages, formation of biofilm in the pipes, etc. All these issues

affect the water quality in varying spatio-temporal terms [11, 35]. The water quality is also found to vary within the distribution systems of three supply zones (Table 4) from service reservoirs to the consumer taps.

The most common pollutants and problems detected in the supply water of Guwahati city include Total dissolved solids, Total hardness, Calcium, Residual chlorine, Magnesium, Iron, Fluoride and Turbidity as well as bacterial contamination [16]. The pH value, another crucial parameter in water chemistry, was also analyzed to measure its alkalinity level. The above mentioned issues in supply water are not visible to the naked eyes, excepting chlorine, iron and turbidity, which can be distinguished by the consumers. The ageing water networks are the pathways for intrusion of unwanted contaminants (solid and liquid particles) through cracks and leakages and formation of biofilm due to intermittent nature of water supply [4,35].

Table 4

Spatial variation in water quality at households within a distribution system

Water Quality Zones		Water Supply Schemes/Project									Total
		Panbazar	Satpukhuri	Kamakhya	Lichubagan, Hengerabari (ZRWSS) (GMDW & SB)	Sadilapur, Jalukbari (SWGWSP)	Kharghuli, Uzanbazar (SCGWSP)	DTWS- GMC-WWW	DTWS- PHED-I	DTWS- PHED- II	
Zone I	Mean Concentration (mg/L and NTU)										
	Chlorine	7.5	9.7	6.8	5.4	2.4	2.6	3.4	3.5	3.9	5.02
	Turbidity	3.91	3.66	3.1	3.61	3.47	3.12	0.34	0.97	0.95	2.57
	Iron	0.14	0.21	0.1	0.15	0.08	0.11	0.64	0.87	0.74	0.33
Zone II	Chlorine	0.31	0.54	0.26	0.37	0.38	0.29	0.54	0.46	0.27	0.49
	Turbidity	4.87	3.74	2.98	2.58	4.11	4.16	0.74	0.81	0.84	2.76
	Iron	0.1	0.1	0.07	0.07	0.05	0.08	0.59	0.47	0.64	0.24
Zone III	Chlorine	0.09	0.02	0.19	0.21	0.26	0.21	0.31	0.28	0.11	0.18
	Turbidity	4.91	5.24	4.1	3.14	4.13	3.97	0.81	0.72	0.87	3.10
	Iron	0.08	0.11	0.1	0.07	0.06	0.08	0.61	0.56	0.63	0.25

Source: Primary survey, 2022-23

Reliability of supply at households

Reliability of supply water is measured with respect to its adequacy in quantity and quality. Unreliability in water supply is mitigated through various coping strategies adopted by the consumers [44]. Many of the households in the city have devised some alternative ways to enhance water security besides municipal water, which illustrate about the responses to unreliability of water supply in Guwahati.

Extraction of ground water in Guwahati city has

exceeded the safe limit with more than 65% of the populations derive water from it, as a common pool resource [19]. Many residents go for digging of wells as their first option and this strategy is being employed exclusively by majority of the households across the city (Table 5). As there are numerous options, the city residents use more than one strategy, some are adopted by larger number of households and others are chosen by only a few depending on their feasibility. Although zone I obtains adequate

Table 5

Accommodating water supply unreliability at household level in Guwahati

Coping Mechanisms Zones		Water Supply Schemes/Project								
		Panbazar	Satpukhuri	Kamakhyā	Lichubagan, Hengrabari (ZRWSS) (GMDW & SB)	Sadilapur, Jalukbari (SWGWS)	Kharghuli, Uzanbazar (SCGWS)	DTWS- GMC-WWW	DTWS- PHED-I	DTWS- PHED- II
Zone I	Households (in %)									
	Dug wells	37.51	39.14	3.61	21.36	14.21	31.24	31.21	11.31	32.14
	Tube wells	9.62	14.52	0.00	11.27	15.63	21.62	21.52	16.53	28.74
	Communal bore hole	0.00	0.00	0.00	2.31	0.00	11.21	0.00	0.00	0.00
	Buying of water	0.00	1.24	9.54	15.21	0.00	14.21	10.24	15.21	3.64
	Storing of water	14.21	13.62	17.52	0.00	0.00	0.00	14.12	8.52	6.74
	Rain water harvesting	12.17	1.32	21.19	19.87	0.00	13.25	9.87	17.21	15.42
Zone II	Conservational behavior of water use	0.00	0.00	15.87	12.31	0.00	8.87	15.24	12.36	27.21
	Dug wells	46.31	51.26	6.21	38.12	19.87	43.64	26.63	16.34	33.34
	Tube wells	11.62	21.63	3.51	21.23	8.63	19.51	8.62	18.54	16.92
	Communal bore hole	6.37	8.74	0.00	8.74	0.00	10.26	0.00	0.00	25.34
	Buying of water	15.62	21.63	8.30	25.10	0.00	21.60	12.31	18.67	18.54
	Storing of water	31.52	27.58	38.24	37.21	0.00	21.14	26.54	30.25	26.34
	Rain water harvesting	19.64	25.87	31.25	30.21	0.00	18.79	18.63	27.89	31.25
Zone III	Conservational behavior of water use	9.87	6.87	20.14	10.35	0.00	10.32	20.31	13.64	25.17
	Dug wells	65.21	68.76	20.15	50.16	10.24	45.64	35.16	40.12	37.25
	Tube wells	18.67	20.85	8.74	30.24	15.23	30.14	14.26	25.87	21.37
	Communal bore hole	14.32	25.14	0.00	20.10	0.00	18.96	0.00	0.00	3.54
	Buying of water	20.62	30.14	5.34	35.45	0.00	27.56	13.65	24.63	26.36
	Storing of water	35.63	37.28	53.31	68.78	10.34	35.60	41.25	63.32	58.25
	Rain water harvesting	15.60	15.58	23.34	38.25	0.00	35.63	48.35	46.36	35.37
	Conservational behavior of water use	33.32	35.63	34.85	41.25	10.36	27.89	25.28	23.68	29.68

Source: Primary survey, 2022-23 and water supply agencies, 2023.

water from municipal supply, dug-well is used to enjoy liberal washing and cleaning by a large number of households than other options. But, with increasing distance from service reservoirs the dependence on dug wells/tube wells increases due to decrease in the quantity of water obtained from municipal supply (Table 5). These sources supplement shortages to some extent on daily basis. Storing of water and rain water harvesting are also found to comparatively higher in zone II. Small storages like drums, cans and buckets are used to store municipal water for emergency requirement or at the times of supply interruption. The use of strategies among the consumers in zone III is found to be more than the other zones (Table 5). Conservational attitude of water usage is also much higher at the extreme parts of water supply networks. The households categorized in this zone practice storing of water as a precautionary measure for dry pipe days. It needs to be mentioned here that the households connected to the SWGWSP are equipped with sufficient water provisions, and to supplement shortages in the case of extreme events the shallow depths of ground water in western part of the city suffice the crisis.

The study reveals that more than 63% city dwellers use electronic water purifiers. Of these households, 56% use chlorination (bleaching powder) in their over head tanks to prevent bacterial contamination and this is more prevalent in households with increasing distance from the service reservoirs. These households practice this method, because the officials of water authorities have suggested them to use it to prevent possible contamination. Another 20% of the households filters water through conventional filtration systems, typically equipped with candles. Around 14% of households purify water through boiling in view of its health outcomes. More than 3% of the city households spend extra money on purchasing packaged mineral water exclusively for drinking purposes with a view to remain safe from water-borne diseases. The packaged mineral water has so far reported no adverse effects and hence some rich people confidently consume this packaged water. It is therefore clear that the city dwellers practice different alternative ways to enhance water quality depending on their capability, feasibility and practicability.

Accessibility of water supply

One of the key determinants of health outcomes

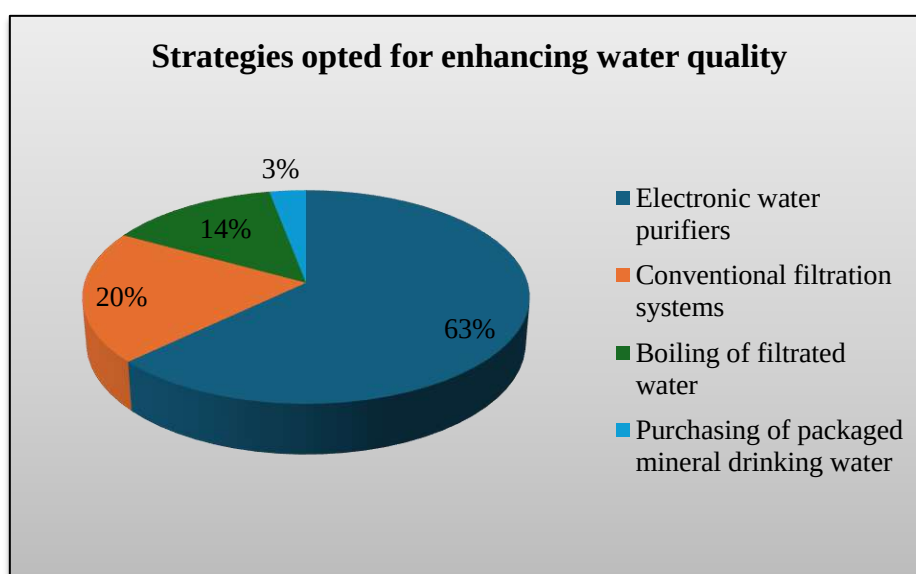


Fig. 4. Strategies devised by households to enhance water quality

is access to clean and adequate water among the city dwellers in relation to socio-economic background. However, there remains a challenge among the consumers in achieving equitable access to water. Empirical studies conducted in this respect reveal that economic differentials are the root cause of such unequal access to municipal water, apart from location of households away from water supply systems [26, 29]. Although municipal water supply network is confined into some parts of the city, all households within the command area has do not have access to it. In fact, a large proportion of low income households is deprived of required access to municipal

water. Contrastingly, although the high income households can easily afford the cost of water supply, the water supply networks still remains inaccessible to those households. Such circumstances indicate that affordability alone cannot necessarily be always correlated with accessibility.

The household survey further reveals that the socio-economic factors like education, household size, age and gender of the household head, income, etc plays a significant role in procuring municipal water connection [1, 26]. However, in Guwahati city accessing water from the urban water supply systems is primarily determined by wealth of the households.

However, there are few households in the city which despite low income have access to water supply. In fact, such households took municipal water supply connection long back during the periods of comparatively better incomes. It is further observed that the higher income households with large family size or large number of water users, such as tenants in rental

properties, avail water service connection with larger diameters in attempt to ensure adequate volume of water for all. Hence, variation in income level among the city dwellers greatly influences the degree of access and adequacy of water in different parts of Guwahati city.

Water accessibility, which is defined as the abi-

Table 6

Spatial variation in accessibility of water supply at households

Water supply Schemes/Project	Households obtaining adequate water (in %)
Panbazar	41.80
Satpukhuri	32.14
Kamakhya	34.78
Lichubagan, Hengerabari (ZRWSS) (GMDW & SB)	42.10
Sadilapur, Jalukbari (SWGWS)	100.00
Kharghuli, Uzanbazar (SCGWSP)	100.00
DTWS- GMC-WWW	31.57
DTWS- PHED-I	55.06
DTWS- PHED- II	32.83
Total	48.62

Source: Primary Survey, 2022-23.

lity of households to ensure adequate quantity of water at an affordable price, [1, 2] varies spatially at household level across Guwahati city among different water supply schemes. The household survey reveals that more than 50% are challenged with inadequacy of required water (Table 6). It is observed that the newly established residential high rise complexes in the western and north-eastern parts of the city are benefited with adequate supply of water from SWGWSP and SCGWSP respectively. But, the remaining water supply schemes in the city can hardly provide sufficient water to 50% of the households under their command. As the old and conventional water supply schemes are functioning mostly below their designed capacity, to supply water to the consumers exceeding the production capacity, the volume of water supply mostly remains insufficient to the users leading. Hence, to ensure equitable access to water, the supply schemes should be thoroughly renovated and properly maintained by overcoming all challenges arising from their infrastructural inadequacy.

Besides the above, an analysis of multiple dimensions of water security status in Guwahati city reveals that the municipal water supply system is still inadequate for the city households particularly in terms of quantity.

Conclusion

The foregoing analysis reveals that the urban water system in Guwahati has been struggling with multiple deficiencies, resulting in low accessibility, poor quality and compromised reliability of water supply. The water production level is significantly

below their designed capacity due to ageing of water plants and lack of proper management practices contributing to only 34% of the city population having access to urban water system. Additionally, leakage in the distribution system has greatly affected the quantity and quality of water obtained at households, reducing reliability on urban water supply. Such a situation is indicative of the fact that the water supply system is given least priority in the development agenda of the city corporation. Considering the out-lived urban water systems and slow development of supply network in the recently commissioned water supply projects, the city authority can propose a policy for decentralization of the water supply network to cover more area and population. Such attempts can address the sustainability of the system and ensure water security among the city dwellers.

This study presents a detailed account on the cause and effect of water insecurity with a view to explore necessary coping strategies to overcome the prevailing challenges of water deficiencies in the city [21, 44]. The study based on household survey reveals the deficiency of the water supply system such that 48% households in zone I do not meet the required minimum water supply standard of 135 lpcd. This has been largely attributed to lowering of water table in the DTWS. This deficiency is even more alarming in zone II and zone III, where around 90% households fall short of required standard of water supply in the city.

It is, however, encouraging to find that the SCGWSP and SWGWSP are in continuous effort to expand the supply network in the areas deprived of

urban water supply systems in Guwahati city. The would certainly help increase household level water supply connections and enhance access to urban water for domestic use in the city. Moreover, the very recent commissioning of more than 100 DTWS under GMC-www can also increase the degree of access to urban water supply in the city. However, there has been great challenge on the part of the urban water authorities concerned to keep track with continued increase in the demand of water due to rapid city population growth along with the issues of industrialization and climate change. In view of such situation efforts should be on to increase utilization of huge

Brahmaputra river water along with concerted measures for rainwater harvesting, protection of surface waterbodies and optimal use of groundwater in the city. It is thus expected that such efforts along with awareness campaign against wastage of water and possible measures for waste water recycling would go a long way in ensuring water security in Guwahati city.

Acknowledgements

The authors are thankful to the University Grants Commission (UGC), Government of India, for providing financial support in the form of a Fellowship (3165/NET-DEC 2018).

References

1. Abubakar, I. R. (2019). Factors influencing household access to drinking water in Nigeria. *Utilities Policy*, 58, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.03.005>
2. Adams, E. A. (2018). Intra-urban inequalities in water access among households in Malawi's informal settlements: Toward pro-poor urban water policies in Africa. *Environmental Development*, 26, 34-42. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.004>
3. Bakker, K. (2007). The "commons" versus the "commodity": Alter-globalization, anti-privatization and the human right to water in the global south. *Antipode*, 39(3), 430-455. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2018.03.004>
4. Barros, D., Almeida, I., Zanfei, A., Meirelles, G., Luvizotto Jr, E., & Brentan, B. (2023). An Investigation on the Effect of Leakages on the Water Quality Parameters in Distribution Networks. *Water*, 15(2), 324. <https://doi.org/10.3390/w15020324>
5. Biswas, A. K. (2013). Water management for major urban centres. In *Water Management in Megacities* (pp. 3-17). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315878645>
6. Boakye-Ansah, A. S., Ferrero, G., Rusca, M., & Van Der Zaag, P. (2016). Inequalities in microbial contamination of drinking water supplies in urban areas: The case of Lilongwe, Malawi. *Journal of Water and Health*, 14(5), 851-863. <https://doi.org/10.2166/wh.2016.258>
7. Census of India. (1971). *District census Handbook, Kamrup (M) District, Assam*.
8. Craun, G. F., Nwachuku, N., Calderon, R. L., & Craun, M. F. (2002). Outbreaks in drinking-water systems, 1991-1998. *Journal of Environmental Health*, 65(1), 16.
9. Deshkar, S. (2019). Resilience perspective for planning urban water infrastructures: A case of Nagpur City. *Urban Drought: Emerging Water Challenges in Asia*, 131-154. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8947-3_9
10. Dong, X., Du, X., Li, K., Zeng, S., & Bledsoe, B. P. (2018). Benchmarking sustainability of urban water infrastructure systems in China. *Journal of cleaner production*, 170, 330-338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.048>
11. Fontanazza, C. M., Notaro, V., Puleo, V., Nicolosi, P., & Freni, G. (2015). Contaminant intrusion through leaks in water distribution system: experimental analysis. *Procedia engineering*, 119, 426-433. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.904>
12. Gleick, P. H., Wolff, G. H., Cooley, H., Palaniappan, M., Samulon, A., Lee, E., ... & Katz, D. (2013). *The World's Water 2006-2007: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press.
13. Gupta, A., & Kulat, K. D. (2018). Leakage reduction in water distribution system using efficient pressure management techniques. Case study: Nagpur, India. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(6), 2015-2027. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.023>
14. Gupta, A., & Kulat, K. D. (2018). A selective literature review on leak management techniques for water distribution system. *Water resources management*, 32, 3247-3269. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-1985-6>
15. Hansen, R. D. (2009). Water-related infrastructure in Medieval London. nd). <http://www.waterhistory.org/histories/london/> (accessed 10 January 2015).
16. Hazarika, B., & Kar, B. K. (2024). Water security in Guwahati City (India): examining present status and emerging challenges. *GeoJournal*, 89(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10708-024-11103-9>
17. Hazarika, N., & Nitivattananon, V. (2016). Strategic assessment of groundwater resource exploitation using DPSIR framework in Guwahati city, India. *Habitat International*, 51, 79-89. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.10.003>
18. Jayakar, A., Sudharsan, S., Veewin, M., & Rishi, M. (2022). Water Theft and Leakage Identification in Distributed System. In *2022 Smart Technologies, Communication and Robotics (STCR)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/STCR55312.2022.10009563>
19. Kang, H. (2019). Challenges for water infrastructure asset management in South Korea. *Water Policy*, 21(5), 934-944. <https://doi.org/10.2166/wp.2019.005>
20. Kumar, A. (1998). Technologies to improve efficiency in distribution system with intermittent supplies. *Water Supply-International Water Supply Association*, 16(1), 576-579.

21. Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of water and health*, 3(2), 109-127. <https://doi.org/10.2166/wh.2005.0012>
22. McIntosh, A. C. (2003). *Asian water supplies reaching the urban poor*. Asian Development Bank.
23. Misra, K., & Malhotra, G. (2011). Water management: the obscurity of demand and supply in Delhi, India. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 23(1), 23-35. <https://doi.org/10.1108/14777831211191575>
24. Mustafa, D., & Reeder, P. (2009). 'People is all that is left to privatize': water supply privatization, globalization and social justice in Belize City, Belize. *International Journal of Urban and Regional Research*, 33(3), 789-808. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2427.2009.00849.x>
25. Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2011). Assessment of apparent losses in urban water systems. *Water and Environment Journal*, 25(3), 327-335. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2010.00225.x>
26. Nastiti, A., Sudradjat, A., Geerling, G. W., Smits, A. J. M., Roosmini, D., & Muntalif, B. S. (2017). The effect of physical accessibility and service level of water supply on economic accessibility: a case study of Bandung City, Indonesia. *Water International*, 42(7), 831-851. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1373323>
27. Neelkamal Das, N. D., & Goswami, D. C. (2013). A geo-environmental analysis of the groundwater resource vis-à-vis surface water scenario in Guwahati city. <https://doi.org/10.12944/cwe.8.2.13>
28. Northeast Now. (2023). Assam water supply pipe burst in Guwahati, one dead. Northeast Now. Available at: <https://ne-now.in/north-east-news/assam/assam-water-supply-pipe-burst-guwahati-one-dead.html>. Accessed May 22, 2024.
29. Osei, L., Amoyaw, J., Boateng, G. O., Boamah, S., & Luginaah, I. (2015). The paradox of water accessibility: understanding the temporal and spatial dimensions of access to improved water sources in Rwanda. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 5(4), 553-564. <https://doi.org/10.2166/washdev.2015.029>
30. Parkinson, S. C., Johnson, N., Rao, N. D., Jones, B., van Vliet, M. T., Fricko, O. & Flörke, M. (2016). Climate and human development impacts on municipal water demand: A spatially-explicit global modelling framework. *Environmental Modelling & Software*, 85, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.002>
31. Patki, V. K., Jahagirdar, S., Patil, Y. M., Karale, R., & Nadagouda, A. (2021). Prediction of water quality in municipal distribution system. *Materials Today Proceedings*, 13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.826>
32. Pawe, C. K., & Saikia, A. (2018). Unplanned urban growth: land use/land cover change in the Guwahati Metropolitan Area, India. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 118(1), 88-100. <https://doi.org/10.1080/00167223.2017.1405357>
33. Ray, B., & Shaw, R. (2018). Coping with Urban Water Insecurity in the Colonial City of Kolkata. *Urban Drought: Emerging Water Challenges in Asia*, 209. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-8947-3_13
34. Romero-Lankao, P., & Gnatz, D. M. (2016). Conceptualizing urban water security in an urbanizing world, *Current opinion in environmental sustainability*, 21, 45-51 <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.002>
35. Sadiq, R., Kleiner, Y., & Rajani, B. (2007). Water quality failures in distribution networks—risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning. *Risk Analysis: An International Journal*, 27(5), 1381-1394. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2007.00972.x>
36. Shipman, H. R. (1967). Water supply problems in developing countries. *Journal-American Water Works Association*, 59(7), 767-772.
37. The Times of India. (2022). After 2 months, water supply from Satpukhuri to resume. The Times of India. Available at: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/guwahati/after-2-months-water-supply-from-satpukhuri-to-resume/articleshow/93147568.cms>. Accessed May 24, 2024.
38. Tholiya, J. J., Chaudhary, N., & Alam, B. M. (2022). Determinants of geographical inequalities in domestic water supply across city of Pune, India. *Water Supply*, 22(2), 2148-2169. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.364>
39. UN Water. Water and urbanization. (2021). Available at: <https://www.unwater.org/water-facts/water-and-urbanization>. Accessed May 1, 2024.
40. Van der Bruggen, B., Borghgraef, K., & Vinckier, C. (2010). Causes of water supply problems in urbanised regions in developing countries. *Water resources management*, 24, 1885-1902. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9529-8>
41. (2018). Urban water security dashboard: Systems approach to characterizing the Water, U. N. (2018). Sustainable Development Goal 6 synthesis report on water and sanitation, Published by the United Nations New York, New York, 10017 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000997](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000997)
42. WHO & UNICEF 2000 Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report. Iseman Creative, Washington, DC <https://iris.paho.org/handle/10665.2/45503>
43. WHO/UNICEF. WASH (water, sanitation, and hygiene). (2023). Available at: <https://www.unwater.org/water-facts/wash-water-sanitation-and-hygiene>. Accessed May 1, 2024.
44. Zerah, M. H. (2000). Household strategies for coping with unreliable water supplies: the case of Delhi. *Habitat International*, 24(3), 295-307. [https://doi.org/10.1016/S0197-3975\(99\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0197-3975(99)00045-4)

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Стан водної безпеки та пов'язані з цим проблеми в місті Гувахаті (Індія)

Бхараті Хазаріка¹

д. філософії, наук. співробітник кафедри географії,

¹ Університет Гаухаті, Гувахаті, Ассам, Індія,

Бінал К. Кар¹

д. філософії, професор кафедри географії

Розвиток міської системи водопостачання не встигає за швидким зростанням населення в містах, через що більшість мешканців не мають доступу до системи водопостачання. Це дослідження має на меті виявити проблеми, пов'язані з міськими системами водопостачання, проблеми з ефективним водопостачанням і, як наслідок, відсутність водної безпеки в домогосподарствах. Воно розглядає водну інфраструктуру в місті з моменту його розвитку в 1930 році в просторово-часовому контексті. Також було оцінено вплив існуючої інфраструктури водопостачання на стан водної безпеки домогосподарств. Для візуалізації просторового розподілу міських водопровідних мереж у місті було використано програмне забезпечення Google Earth Engine. Для обстеження домогосподарств у трьох різних зонах було прийнято методику цілеспрямованого відбору на основі відстані від водосховищ, нахилу, місткості водосховища та кількості підключень домогосподарств до водойм. Вибір домогосподарств з різних зон за кожною схемою здійснювався на основі споживачів міської водопровідної системи та стану водозабезпеченості. Стан водної безпеки домогосподарств оцінювався за її складовими, кількістю, якістю, надійністю та доступністю. Водна інфраструктура була неадекватною протягом дуже тривалого часу, лише одна третина населення мала доступ до міських систем водопостачання. Домогосподарства повідомили, що підвищення кількості та якості води, які є життєво важливими аспектами водної безпеки, вимагає застосування різноманітних стратегій, спричиняє значні витрати та ставить під загрозу добробут. Крім того, існують просторові варіації в кількості та якості води, отриманої за спільною схемою зі збільшення відстані від резервуарів обслуговування/заводів. Крім того, поряд із низькою надійністю та доступністю схем водопостачання домогосподарств, також були виявлені відмінності між різними схемами водопостачання. У статті вперше аналізується стан міської водної безпеки та пов'язані з цим виклики в місті за допомогою первинних даних та інформації про водну інфраструктуру. Практична цінність дослідження полягає в можливості виявлення просторової варіації кількості та якості води, отриманої в домогосподарствах, незважаючи на спільну схему або систему, яку можна проводити в інших дослідженнях країн, що розвиваються. Результати дослідження є значущими в контексті обґрунтування заходів щодо стратегії водної безпеки на індивідуальному рівні.

Ключові слова: Гувахаті, схема водопостачання, кількість, якість, водозабезпеченість.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 3 серпня 2024 р.

Прийнята 9 вересня 2024 р.

Against the background of global climate changes, the current ecological situation of Azerbaijan's water resources and the directions of efficient use

Ilgar Khalilov¹

PhD (Geography), Associate Professor,

¹ Azerbaijan State University of Economics, Baku, Azerbaijan

e-mail: ilqar.xalilov@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-7617-9439>;

Farhad Eminov¹

PhD (Geography), Associate Professor,

e-mail: farkhademinov1953@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0001-8747-7802>

ABSTRACT

State of the problem. The article describes the full range of hydrological threats related to the limitation and pollution of the water resources of the Republic of Azerbaijan. It is noted that the consequences of year-by-year aggravation of hydrological threats are the increase of conflicts with neighboring states, the development of new centers of ecological instability, the republic's socio-economic development programs are not fully implemented in the regions. It is known that the main features of Azerbaijan's water resources are their limitation, uneven distribution, approximately 70% of surface water resources are formed outside the country's borders and are seriously polluted when entering the country. The total water reserve of Azerbaijan is 35 billion cubic meters, of which 5 billion cubic meters is underground water. River water resources of the republic are 30.0 billion cubic meters, of which 10.0 billion cubic meters are local waters.

Research object. Azerbaijan's water resources, their modern ecological condition and directions for effective use.

The purpose of the study. Based on the long-term observation data and climate forecasts of Azerbaijan, it is to show the scarcity of fresh water resources, the potential to be significantly affected by climate change, and the directions of efficient use. However, the ability to quantify future changes with hydrological changes and their impacts on systems and sectors is limited by uncertainty at all stages of the assessment process. Uncertainty arises from different socio-economic development scenarios, given different climate model forecasts, reduction of climate impacts to local and regional scales, impact assessment. In accordance with the UN Sustainable Development Goals, it is important to study its effects in the study area within the framework of climate action.

Methodology. Generalization, statistical, systematic analysis and comparison methods were used in the preparation of the article.

Scientific novelty of the research. Against the background of modern climate change, the ecological situation of Azerbaijan's fresh water sources is analyzed and the characteristics of the use of water in various economic fields, the situation of pollution of transit river waters with industrial and domestic sewage of neighboring countries, and the harmful effects of their use on human health and environmental components are emphasized.

Research results. In the article, the improvement of the national strategy in the implementation of the ecological-geographical assessment of water bodies in Azerbaijan, the implementation of projects supported by various international organizations, the application of river basin management plans to a larger number of rivers and the improvement of legislation for the purpose of protection, the implementation of international cooperation are among the necessary steps.

Keywords: water resources, river waters, pollution, climate change, environmental responsibility, health, management, climate action goal.

In cites: Khalilov Ilgar, Eminov Farhad (2024). Against the background of global climate changes, the current ecological situation of Azerbaijan's water resources and the directions of efficient use. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, (61), 392-398. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-31>

Introduction. Currently, fresh water is one of the most valuable natural resources and the most intensively consumed resource in the entire global economy [19]. In general, the total global consumption of fresh water is 1000 times greater than the consumption of all other types of industrial raw materials: in one day, the world consumes a volume of water equal to the annual production of all types of minerals.

Determining water as a normal economic resource has certain grounds, because water is a resource whose price can be calculated, its volume and demand can be quantified [1, 21]. When determining the price of water as an economic resource, there are non-economic problems, including the specificity of

a given economic benefit [4], the mass and consistency of its consumption, and the complete absence of substitute goods or substitutes [7].

These factors determine the spectrum of prospects for the development of the water market and determine the boundaries that shape the effective demand and supply of existing water resources [15]. If the current growth rate of water consumption is maintained in the process of socio-economic development, the water problem will emerge as a global problem [10]. This will affect the rights of every person to water, environmental and national security, investment characteristics in relevant sectors of the economy, trans boundary regulation of water resour-

ces [8], management of international water basins, etc. Meanwhile, subsidies for urban, industrial and agricultural water supply, sanitation and treatment do not allow the price of water to be taken as an absolute indicator of its value as an economic resource alone [23].

Decreasing the quantity and quality of water as a component of any ecosystem has a serious negative impact on the environment [16]. Exceeding the environment's natural capacity for self-cleaning and absorption leads to loss of biodiversity, damage to vital systems, damage to natural food sources, and other costs [24]. The total damage to the environment caused by water pollution must be considered in two aspects: quality and quantity, both of which have equal socio-medical importance [25].

The state of water resources directly responds to changes in air temperature and precipitation and their extreme manifestations. Azerbaijan has been experiencing a shortage of water resources for the last 30-40 years, and according to forecasts, the country may face a significant shortage of water resources by 2040 [3]. Since almost all sectors of the economy depend on water, there may be a decrease in GDP by 2050 due to its lack in regions of the country [2].

One of the causes of land degradation and desertification is the extensive use of water resources for irrigation. Unsustainable irrigation canals and outdated water supply infrastructure that require large-scale reconstruction are also factors that lead to inefficient use of water resources and land degradation [5]. This has resulted in an ecological disaster, loss of biodiversity, reduction of fish stocks, and a negative impact on the welfare of the local population.

As we mentioned above, Azerbaijan is one of the countries with scarce water resources. 62 percent of the total water resources of the South Caucasus belong to Georgia, 28 percent to Armenia and only 10 percent to Azerbaijan [6]. Azerbaijan's water problems arise from a combination of its geographical, climatic, economic and management factors. The semi-desert and arid desert climate of a large area of the country, together with limited water resources, pose significant challenges for sustainable water management. Kura-Araz lowland, Arazboyu plains of Nakhchivan, Jeyranchol-Acinohur, etc. are located in the arid region of the country, so there is a chronic water shortage. Limited water resources are aggravated by the presence of large semi-desert areas and the fact that Azerbaijan shares water resources with neighboring countries [9].

It is known that agriculture is one of the main sectors of the national economy of Azerbaijan and is highly dependent on irrigation. The use of inefficient irrigation methods, including outdated infrastructure and equipment, leads to excessive water consumption, which leads to wastage and depletion of water resources. The lack of comprehensive management

of water resources leads to their uneven distribution and over-exploitation.

1. Modern ecological situation of fresh water resources of Azerbaijan.

In addition, Azerbaijan also suffers from the effects of frequent natural destructive weather and climate events, which increase the likelihood of natural disasters (floods, inundations, landslides) if appropriate measures are not taken, and negatively affect the quality and quantity of water, threatens the ability to manage water resources safely [11].

One of the most important problems of Azerbaijan is water pollution. According to environmental pollution monitoring data, the main water polluters are mainly industrial, agricultural and utility enterprises of Armenia and Georgia, as well as Azerbaijan. In periods of low water, the increase in salinity and the concentration of pollutants leads to the deterioration of the quality of surface water and the pollution of underground water. If we take into account that groundwater with a mineralization of more than 3.0 g/l is distributed in more than 40% of the territory of the republic, the degree of loading into aquifers can be estimated as increased. Aquifers in the saline soils of Kura-Araz lowland are under medium load. The chemicalization of agricultural production and the discharge of waste water into sewers without treatment lead to the pollution of water resources. In addition, in some agricultural regions of the republic, the surface drainage network and drainage systems are in an unsatisfactory condition, and their timely treatment results in an intensive rise in the level of groundwater, which increases the area of salinized and re-salinated areas [13].

The main water resources of the country are formed outside its territory and enter the republic in a highly polluted form. Up to 700 million m³ of dirty water is discharged into the Kura River alone from the territory of the neighboring republics of Georgia and Armenia, which causes significant ecological stress.

Considering that up to 80% of Azerbaijan's drinking water supply is provided by the waters of the Kura river basin, the deterioration of the quality of these waters poses a threat to the health of the population of the republic [12]. The environmental situation in the Kura river basin, which provides drinking water to most of the republic's settlements located along the Kura river, including the city of Baku, is becoming more and more complicated [14].

In the conditions of the limited water resources of Azerbaijan and the fact that more than 70% of the water flow of the river basin is formed in the territories of Turkey, Iran, Georgia, and Armenia, the ongoing transboundary pollution of the Kura and Araz waters sharply worsens the situation of uninterrupted supply of fresh water to the population's needs, and

various sectors of the national economy has a negative impact on development.

Rivers entering Azerbaijan bring water with a content of pollutants higher than the established norm. On average, about 350 million cubic meters of polluted water and 330 million cubic meters of polluted water containing heavy metals, phenols and oil products are discharged from the territory of Armenia into the Kura and Araz river basins. Petroleum products, phenols, surfactants, pesticides, and heavy metals are found more often in waters coming from the territory of Georgia. These, in turn, cause serious damage to the health of the people who use that water, and create problems for reserves and wetlands that are fed by these waters.

Araz, Okchuchay, Arpachay and other rivers are also subject to strong anthropogenic influence from the territory of Armenia. Copper, molybdenum and other heavy metals in the waters of the Araz and Okchu rivers are a hundred times higher than the norm. As a result, microflora and fauna disappear in river waters, the process of self-cleaning stops, and the river basin becomes a "dead zone". Considering that 80% of the population uses polluted river water for drinking and agricultural purposes, then one can imagine the threat to human health and the ecological system as a whole [17].

The greatest damage from the Kura and Araz rivers affects the population living in the Kura-Araz plain. Most of the population of Azerbaijan lives in the Kura-Araz plain, and they get water from the Kura and Araz rivers for drinking and irrigation purposes. The Kura and Araz rivers are currently more polluted, and therefore there is a need for more thorough water treatment or the use of alternative sources. The government's policy in this area is to restore and improve the provision of drinking water and sewage systems to the population, and concrete action plans are currently being developed and implemented.

The general situation of water supply and sanitation in Azerbaijan is characterized by irregular water supply and poor quality of water received by consumers. This is due to limited access to water sources of appropriate quality and quantity.

The population living in rural areas is not in a good situation as they use water directly from rivers, canals and springs. Most rural settlements do not have drinking water or wastewater treatment.

There is a need to determine the adequacy of Azerbaijan's water sources both in terms of quality and quantity. The most cost-effective solution to the problems of polluted Kura and Araz is to use alternative sources (rich water resources of Karabakh and Eastern Zangezur), purify drinking water, reduce pollution and provide rural areas with sufficient underground water supply.

As is known, the Kura River, the main water artery of Azerbaijan, is the only source that provides drinking water to the majority of the country's population. Of particular concern is its transboundary pollution, which sometimes reaches catastrophic levels. In order to ensure the safety of the population and control the quality of water entering the territory of the republic, the government of Azerbaijan has allocated the necessary funds for the purchase of equipment for monitoring transboundary rivers in the border areas.

In order to check the quality of water at the points starting from the border with Georgia, the relevant departments of the Ministry of Ecology and Natural Resources of the republic take samples three times a month and determine the hydrochemical and physical indicators of water properties. The presence of pollutants such as oil, oil products, phenols, pesticides, heavy metals in Kura water up to 10 times higher than the sanitary-hygienic norms is an indicator of how serious the ecological situation is.

Groundwater in the territory of the Republic is not subject to domestic, industrial and agricultural pollution. The main reason for the pollution of municipal areas is the lack or limited development of sewage network and treatment facilities in most populated areas.

2. Directions for efficient use of water resources.

Global climate changes primarily cause annual reduction of water resources. This effect did not bypass Azerbaijan and led to a decrease of water resources by more than 15%. The conducted analyzes show that if the Paris climate agreement is not fulfilled and the temperature rises by 4-5 degrees, Azerbaijan's water resources may decrease by 40-50% by the end of the century.

Supporting vulnerable regions will directly contribute not only to Goal 13 but also to the other SDGs. It is still possible, with strong political will, increased investment, and using existing technology, to limit the increase in global mean temperature to two degrees Celsius above pre-industrial levels, aiming at 1.5°C, but this requires urgent and ambitious collective action [18].

The International Natural Resources Institute (WRI) predicts that by 2040, one fifth of the world's countries will have water problems. Thus, climate change disrupts the rainfall cycle and population growth increases the demand for water. According to the report of the International Institute of Natural Resources, Azerbaijan is among the countries with the highest risk of drought. Azerbaijan ranks 18th among 33 countries. The problem is that, although the country has 7-8 times more water than it needs, the demand for drinking and household water is not met. The main reason for this is that there are too many water losses in the country.

According to the standard set by the World Health Organization (WHO), the daily drinking and household water requirement per person is 450 liters. According to international standards, the population of Azerbaijan should be provided with 1.6 billion

cubic meters of drinking and domestic water per year. Water supply in Azerbaijan is 5.3 times less, i.e. 306 million cubic meters. This means 83 liters of water per person per day, which is 5.3 times less than the international norm (Figure 1).

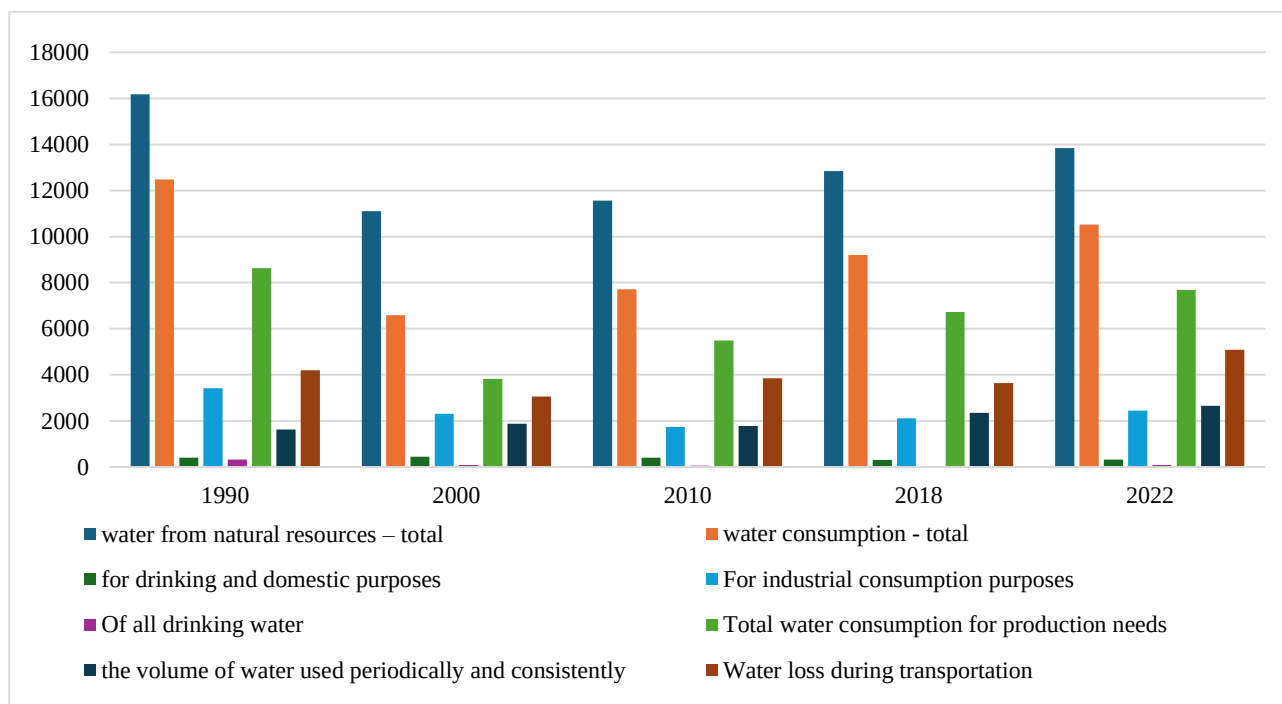


Fig. 1. Water supply (the volume of water is given in million cubic meters), The diagram was prepared based on the information of KONEK SC and the Water Reclamation and Water Management Agency

After climate changes in recent years, water resources have decreased sharply and will be only 17 billion cubic meters in 2023. 4.8 billion cubic meters of it was formed in the country itself, and the rest in the territory of neighboring states. Therefore, the creation of new water sources is required, and the improvement of waste water treatment is considered one of the priority areas of the policy.

"Electronic water management" information system-EcoPortal was created by the decree of the President of the Republic of Azerbaijan dated February 13, 2021, with the aim of assessing Azerbaijan's water resources, organizing efficient use of water, and organizing water accounting, monitoring and management system effectively and efficiently. Technical support in the preparation of the Ecoportal project is organized by the European Environment Agency on the basis of the "Principles and Practices of the Joint Environmental Information System" project in the Eastern Partnership countries [20].

According to the statistics of the State Statistical Committee of Azerbaijan on water from natural sources, its consumption and loss, Azerbaijan ranks first in the Commonwealth of Independent States with 28% water loss. Since 2000, annual renewable water resources in our country have decreased by more than 30%. During that period, the population

increased by 24%, and the volume of water withdrawals from natural water sources increased by 15%. Although 80% of the consumed water is taken from surface water sources, the use of underground water has increased four times in the last 20 years. More than 90% of the water taken from various sources was used in agriculture. In agriculture, the application of flood irrigation, the lack of concrete linings in most canals and similar problems lead to the loss of more than 33% of the water taken. Failure to carry out significant improvement works in this area is one of the main reasons that exacerbates the water problem.

At the same time, only 51% of the population in our country is connected to the water supply system. The remaining 49% try to meet their water needs within their own means. This indicator lags behind the European average and is far from the UN goal of "safe and equal water for all by 2030". Water consumption per person in households is a little more than 300 liters, which is more than in previous years. The expansion of the water supply system, related works are being done in connection with paid water supply - investments in water supply have shown an increase of approximately 10%. The main problem in water supply continues to be losses during transportation. Even the percentage indicator is 42.7% higher

than the agricultural sector [22].

Protection of water resources from pollution, improvement of the quality of surface and underground water in Azerbaijan is one of the main goals of the state policy in the field of water management. A country's ability to mitigate and adapt to climate change impacts is limited by the sustainable use of appropriate technologies and multiple management criteria, as well as economic efficiency. Management strategies that adapt to climate change require an appropriate monitoring network. Improving the national strategy, implementing projects supported by various international organizations, applying river basin management plans to a larger number of rivers and improving legislation for the purpose of protection is one of the necessary steps in the implementation of the ecological-geographic assessment of water basins in our country.

Taking into account that agriculture is the most used sector of water resources, the main measure that is important to implement in this field in our country is the adoption of flood irrigation and the expansion of modern water systems in a mass manner.

Two ways to eliminate the water shortage in the republic have been identified: reducing the load on water resources and increasing fresh water resources. The first way envisages the implementation of comprehensive measures to reduce the speed of development of water-intensive industries and to apply modern water-saving technologies in industry, agriculture and communal services. The second involves increasing freshwater resources by improving interstate water relations, regulating the flow of rivers, using underground freshwater resources, desalinizing saline and brackish waters, artificially increasing precipitation, and redistributing water resource areas.

Hydrochemical observations of the ecological condition of surface waters are carried out by the National Monitoring Service of the Ministry of Ecology and Natural Resources. Monitoring stations are established on Kura and Araz rivers and other transit rivers, and every year more than 1000 water samples are taken and analyzed, their chemical analysis is carried out to determine polluting components.

As a result of the analysis, it is determined that the highest level of mineralization and pollution in river waters is observed in the middle flow of transit rivers, in the points entering the territory of Azerbaijan from the border of Armenia and Georgia, which poses a serious threat to the health and living environment of the population. This is the result of intensive pollution of those rivers with industrial and domestic sewage in the territory of Armenia and Georgia.

The result. The regulation of the use and protection of water resources is carried out by determining the standards of water use and waste water discharge (permits for special water use, water use limits, norms for the maximum allowable discharge of pollutants into the natural environment and general sewage systems). Monitoring of sources of wastewater discharge into water bodies, determination of restrictions on land use of water courses, underground water deposits along the Caspian coast and in water protection zones, application of administrative measures and economic mechanisms for violations of laws, collection of fines for pollution of water resources, tax, credit and other concessions purchase, receiving monetary compensation for damage caused as a result of damage or destruction of natural objects, applying economic sanctions to water users for excess water consumption are considered ways of efficient use and protection of water resources.

We would like to note that certain projects in the field of water problems are being implemented within the Eastern Partnership program of the European Union. In this direction, management plans for various river basins and the Electronic water management system mentioned above have been created, which are commendable cases.

2024 has been declared the "Year of Solidarity for the Green World" in Azerbaijan. At the same time, the UN Climate Change Conference (COP29) will be held in Baku in November 2024. The main purpose of such measures is to combat problems such as climate change, global warming, water shortage, transition to clean energy sources as soon as possible, etc. By hosting such events, Azerbaijan shows that it is not indifferent to environmental issues.

References

1. Ahmed Z., Asghar M.M., Malik M.N., Nawaz K. Moving towards a sustainable environment: the dynamic linkage between natural resources, human capital, urbanization, economic growth, and ecological footprint in China Resour. Pol., 67 (2020), 101677, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101677>
2. Agnihotri, J., Coulibaly, P. (2020). Evaluation of Snowmelt Estimation Techniques for Enhanced Spring Peak Flow Prediction. Water, 12(5), 1290. <https://doi.org/10.3390/w12051290>
3. Aliyev, F.Sh. (2000). Use of underground water resources and geoecological problems of the Republic of Azerbaijan. Baku: Chasgioghlu, 326. [in Azerbaijani]
4. Almorox, Quej, V.H., Martí, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. Hydrology, 528, 514-522, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057>
5. Amanova, Sh. S., Hajiyeva, G.N. (2023). Investigation of Natural Condition in Urban Landscapes of Plain Areas Based on GIS, C. R. Acad. Bulg. Sci., 76(11), 1679–1689. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2023.11.05>

6. Asgarzade, V. (2016). *Economic and ecological importance of water resources in Azerbaijan*, Baku, 245. [in Azerbaijani]
7. Darbandsari, P., Coulibaly, P. (2020). Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100730. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100730>
8. Dosdogru, F., Kalin, L., Wang, R., Yen, H. (2020). Potential impacts of land use/cover and climate changes on ecologically relevant flows. *Hydrology*, 584, 124654, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124654>
9. Hajiyeva, A.Z., Jafarova, F.M., Hajiyeva, G.N. (2024). Structural-Genetic Characteristics of Landscapes of the South-eastern Slope of the Great Caucasus and Study of Their Modern State. *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 77, 62–72. <https://doi.org/10.7546/CRABS.2024.01.08>
10. He, H., Jansson, P.E., Gärdenäs, A.I. (2021). Coup Model (v6.0): An ecosystem model for coupled phosphorus, nitrogen, and carbon dynamics—Evaluated against empirical data from a climatic and fertility gradient in Sweden. *Geosci. Model Dev.*, 14, 735–761, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-735-2021>
11. Imanov, F.A., Guliyeva, A.A. (2020) Development of surface water resources distribution plan for the rivers of Ganikh basin. *News of Baku State University, natural sciences series*, 1, 81-92. [in Azerbaijani]
12. Imanov, F.A., Verdiyev, R.H., Aliyev, S.I., Aliyev, E.H., Mammadova, C.A. (2021). The method of holistic determination of the ecological flow of Azerbaijani rivers (in the example of Shamkirchay and Alijanchay). *Geography and natural resources*, 2(14), 3-10. [in Azerbaijani]
13. Khalilov, I., Eminov, F. (2024). Problems of optimizing the production and export of environmentally friendly consumer products in Azerbaijan. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology*, (60), 424-431. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-32>
14. Ministry of Ecology and Natural Resources (<https://eco.gov.az/>)
15. Mykhailenko, V., Safranov, T., Adobovska, M. (2023). Biological wastewater treatment plants as sources of environmental pollution by persistent organic pollutants (on the example of Odesa industrial-and-urban agglomeration). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (58), 350-359. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-26>
16. Naghdi, S., Bozorg-Haddad, O., Khorsandi, M., Chu, X. (2021) Multi-objective optimization for allocation of surface water and groundwater resources. *Science of The Total Environment*, 776, 146026, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146026>
17. Management plan for the Kura upstream of the Mingachevir dam river basin district in Azerbaijan (2021-2026). (2021). 189, https://www.euwipluseast.eu/images/2021/04/PDF/Kura_Mingachevir_RBMP_ENG.pdf
18. Sustainable Development Goals by the United Nations. <https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals/climate-action>
19. Terzi, S., Torresan, S., Schneiderbauer, S., Critto, A., Zebisch, M., Marcomini, A. (2019). Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management*, 232(15), 759-771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>
20. The Law of the Republic of Azerbaijan "On Environmental Protection".
21. United Nations Economic Commission for Europe. Strategic Environmental Assessment Protocol, 2015.
22. Water Information System (<https://meteo.az/su>).
23. Yang, D., Yang, Y., Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>
24. Zhao, W.L., Gentine, P., Reichstein, M., Zhang, Y., Zhou, S., Wen, Y., Lin, C., Li, Y., Qiu, G.Y. (2019). Physics-constrained machine learning of evapotranspiration, *Geophysical Research Letters*, 46 (24), 14496-14507, <https://doi.org/10.1029/2019GL085291>
25. Zomorodian, M., Sai, Hin Lai, Homayounfar, M., Ibrahim, Sh. (2018). Fatemi S.E., El-Shafie A. The state-of-the-art system dynamics application in integrated water resources modeling. *Journal of Environmental Management*, 227, 294-304. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.097>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Сучасний екологічний стан водних ресурсів Азербайджану та напрямки їх ефективного використання на тлі глобальних змін клімату

Ільгар Халілов¹

к. геогр. н., доцент,

¹ Азербайджанський державний університет економіки,
Баку, Республіка Азербайджан;

Фархад Емінов¹

к. геогр. н., доцент

У статті описано весь спектр гідрологічних загроз, пов'язаних з обмеженням і забрудненням водних ресурсів Азербайджанської Республіки. Зазначається, що наслідками щорічного загострення гідрологічних загроз є зростання конфліктів із сусідніми державами, розвиток нових осередків екологічної нестабільності, в регіонах не в повному обсязі виконуються програми соціально-економічного розвитку республіки. Відомо, що головними особливостями водних ресурсів Азербайджану є їх обмеженість, нерівномірний розподіл, приблизно 70% ресурсів поверхневих вод утворюються за межами країни і при надходженні в країну сильно забруднюються. Загальні запаси води Азербайджану становлять 35 млрд м³, з них 5 млрд м³ – підземні води. Річкові водні ресурси республіки становлять 30,0 млрд м³, з них місцеві води – 10,0 млрд м³. Базуючись на даних довгострокових спостережень і кліматичних прогнозах Азербайджану, показано дефіцит ресурсів прісної води, потенціал істотного впливу зміни клімату та напрями ефективного використання. Проте здатність кількісно визначити майбутні зміни гідрологічних змін та їх вплив на системи та сектори обмежена невизначеністю на всіх етапах процесу оцінки. Невизначеність виникає через різні сценарії соціально-економічного розвитку, враховуючи різні прогнози кліматичних моделей, зниження кліматичних впливів до локальних і регіональних масштабів, оцінку впливу. Відповідно до Цілей сталого розвитку ООН, важливо вивчати його вплив на досліджувану територію в рамках кліматичних заходів. На тлі сучасних кліматичних змін аналізується екологічна ситуація джерел прісної води Азербайджану та особливості використання води в різних сферах економіки, ситуація із забрудненням транзитних річкових вод промисловими та побутовими стоками сусідніх країн, а також наголошено на шкідливому впливі їх використання на здоров'я людини та компоненти навколишнього середовища. У статті розглянуто вдосконалення національної стратегії у впровадженні еколого-географічної оцінки водних об'єктів в Азербайджані, реалізація проектів, підтриманих різними міжнародними організаціями, застосування планів управління річковими басейнами до більшої кількості річок та удосконалення законодавства з метою захисту, здійснення міжнародного співробітництва є одними з необхідних кроків.

Ключові слова: водні ресурси, річкові води, забруднення, зміна клімату, екологічна відповідальність, здоров'я, управління, ціль кліматичних дій.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 8 жовтня 2024 р.

Прийнята 22 листопада 2024 р.

Ecological consequences of the catastrophic destruction of the Kakhovka reservoir dam

Leonid Chernogor¹

DSc (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine,
Head of the Department of Space Radio Physics,

¹ V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine,

e-mail: leonid.f.chernogor@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>;

Alla Nekos¹

DSc (Geography), Professor,

Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education,

e-mail: alnekos999@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>;

Ganna Titenko¹

PhD (Geography), Associate Professor, Head of Karazin Institute of Environmental Sciences,

e-mail: titenko@karazin.ua, <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>;

Leonid Chornohor¹

Master's student of Karazin Institute of Environmental Sciences,

e-mail: l.l.chornohor@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

ABSTRACT

Formulation of the problem. The relevance is due to the need detail physical and mathematical modeling to the ecological consequences of the destruction of the Kakhovka Reservoir dam (Kherson region, Ukraine) on June 6, 2023.

Purpose. Determination of the ecological consequences by numerical modeling of the parameters of unregulated release of super-strong water flow that occurred as a result of the destruction of the Kakhovka Reservoir dam.

Methods. Multi-factor analysis, mathematical simulation, analytical and numerical calculations.

Results. For the first time, mathematical 1D, 2D and 3D models dynamics of water flow from the Kakhovka Reservoir have been developed, which make it possible to assess the ecological consequences of flooding large territories of the country. Relationships were obtained to estimate the potential energy of the water mass in the reservoir, the kinetic energy of the water flow, the height of the level and mass of water in the reservoir, flow speed, and water outflow rate. These relationships were used to assess the consequences of the disaster. The developed methodology can be used to predict the consequences of dam damage on other rivers and reservoirs. Numerical modeling of the dynamics of the main parameters of the water flow from the destroyed Kakhovka Reservoir was carried out. It was established that in about ten days the height of the water column in the reservoir decreased by more than an order of magnitude, the flow speed by about 4 times, the volume by 45 times, water flow by almost two orders of magnitude, the flow power and potential energy of water in the reservoir by almost three orders of magnitude. The reservoir lost approximately 18 Gt of water. A territory of 650 km² was flooded. The height of the water column in the vicinity of the dam reached 10 m, and at a distance of ~80 km it reached 5 m. The initial speed of water flow below the dam was close to 10 m/s. This speed remained at a distance of ~80 km from the dam, which contributed to the rapid onset and inevitability of the disaster, which took place late at night (about 03 h). The environmental consequences of the world's largest man-made disaster in decades were very significant. Some consequences will be observed for ~10 years or more. It can be argued that the ecosystems of Ukraine have suffered irreparable damage that qualifies as ecocide.

Conclusions. The results obtained indicate that the consequences of the destruction of the Kakhovka dam were catastrophic for the ecological situation of the region, hydropower, water supply, fisheries and agriculture, etc.

Keywords: Kakhovske reservoir, dam destruction, water flow, mathematical model, water outflow, outflow rate, energy characteristics.

In cites: Chernogor Leonid, Nekos Alla, Titenko Ganna, Chornohor Leonid (2024). Ecological consequences of the catastrophic destruction of the Kakhovka reservoir dam. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 399-410. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-32>

Introduction. The Kakhovka hydroelectric power station (HPP) was built in 1956 in the Dnieper riverbed [1]. Its electrical power was 335 MW. The operation of the HPP was ensured by a reservoir stretching from Zaporizhzhia to Kherson regions. In addition to its energy function, the reservoir was of great household importance. It contained 40% of the fresh water of Ukraine. The reservoir was used for irrigation of arid lands, water supply to Kryvyi Rih, Marhanets and other populated areas, cooling of

equipment of the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant (NPP), fisheries, and water transport.

On June 6, 2023, as a result of the actions of the aggressor, the Kakhovka reservoir dam was destroyed, which was preceded by two powerful explosions at 02:35 and 02:54 Kyiv time. These explosions were recorded by technical means of the Main Center of Special Monitoring of the State Space Agency of Ukraine [<https://gcsk.gov.ua>]. According to the authors' estimates, the energy release of the second,

more powerful explosion was 0.5–15 t of standard explosive (TNT, trinitrotoluene).

The explosions led to the instant destruction of the dam, rapid water flow, flooding of large areas that were located along the Dnieper below the reservoir and a terrifying ecological disaster [2–28].

The paper [2] is devoted to a qualitative analysis of the consequences of the Kakhovka dam destruction. The ecological problems that arose after the Kakhovske reservoir depletion is partially described in the papers [3–5, 7, 8, 23, 24, 26, 27].

The results of multi-temporal Interferometric Synthetic Aperture Radar monitoring of the Kakhovka dam are presented in [21].

The authors of [23] have estimated 35962 m³/s of peak discharge from the 300-meter dam breach scenario and the flood extent (823 km²) from this scenario also matched with the actual situation as observed by remote sensing data. These estimations help in understanding and managing the risks associated with structural failures. The findings in paper [22] highlight safety and risk-reduction measures pivotal in avoiding such scenarios.

The study [24] aims to address knowledge gaps related to the event by employing multi-temporal change detection of pre- and post-event Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery, analyzed using the Google Earth Engine platform, to map flood extent and impacts.

The results of the studies devoted to the consequences of the Kakhovka dam destruction and the emptying of the Kakhovske reservoir are presented in [3–5]. The water regime of the lower reaches of the Dnipro River was studied, in particular, the water temperature. The remote sensing data on spatial features of water temperature are given. Significant changes in water temperature are shown in the lower reaches of the Dnipro River and in the former Kakhovske reservoir.

In study [25], a unique operational system for estimating irrigation water using data from satellite soil moisture, reanalysis precipitation, and potential evaporation, have been created. As a proof of concept, the authors implemented the method at a 1 km resolution during the period of 2015–2023 over the area south of the Kakhovka Dam in Ukraine, which collapsed on 6 June 2023.

All of the above papers [6–20] are of a descriptive and informative nature. In order to be able to fully assess the ecological consequences of the disaster, it is necessary to quantitatively model the situation and provide a mathematical justification and description for it. Scientific research of this kind has not been carried out and, subsequently, there are still no models of the parameters of an unregulated super-powerful water flow from a huge reservoir. To date, this disaster is considered the largest in Europe in

recent times. The modeling results are intended not only to explain the horrific consequences of the disaster, but also to assess the possible consequences of other catastrophic dam failures on large rivers.

The state of the Kakhovske reservoir before and after destruction is shown in Fig. 1.

The purpose of the study is to determine the ecological consequences by numerical modeling of the parameters of unregulated release of super-powerful water flow that occurred as a result of the Kakhovka reservoir dam destruction. For this purpose, two-dimensional and three-dimensional modeling of water flow parameters was carried out and its main parameters were calculated.

Information on the Kakhovske reservoir. According to the project, the length of the Kakhovske reservoir was $L \approx 230$ km, and the width l varied from ~ 5 to ~ 30 km [2]. The total area of the reservoir was $S_0 = 2155$ km². The initial height of water column was $h_0 \approx 16$ – 17 m. With an initial volume of water $V_0 \approx 18.1$ km³ the mass of water was $m_0 \approx 1.8 \cdot 10^{13}$ kg. According to the authors' estimates, the initial potential energy of water in the reservoir, calculated by the formula:

$$E_{p0} \approx \frac{1}{2} m_0 g h_0,$$

reached $E_{p0} \approx 1.4$ PJ ≈ 337 kt of TNT. Here g is gravitational acceleration. Initial water flow speed

$$v_0 \approx \sqrt{gh_0}$$

at $h_0 \approx 16.5$ m was 12.7 m/s.

After the destruction of the dam, which had a length of 447 m and a maximum height of 29 m, the water level in the reservoir initially was decreasing by $\Delta h \approx 0.15$ m every hour. This makes it possible using the known values of $\Delta h/\Delta t$ and v_0 to estimate the cross-sectional area S_{10} of the water flow from the following relation:

$$\frac{dm}{dt} = \rho S_0 \frac{dh}{dt} = -\rho S_{10} v_0$$

or

$$\rho S_0 \frac{\Delta h}{\Delta t} \approx -\rho S_{10} v_0.$$

Hence, with $\Delta h/\Delta t \approx -4.17 \cdot 10^{-5}$ m/s and $v_0 = 12.7$ m/s we have $S_{10} = 7.1 \cdot 10^3$ m².

The main indicator for assessing catastrophic consequences and the impact on the ecological situation of the region should be considered the power of the water flow. The initial power of the water flow was calculated according to the formula:

$$P_{k0} = \frac{1}{2} v_0^2 \left| \frac{dm}{dt} \right| \approx \frac{1}{2} v_0^2 \rho S_0 \left| \frac{\Delta h}{\Delta t} \right| \approx \frac{1}{2} \rho S_{10} v_0^3 \approx 7.3 \text{ GW}.$$

To compare and evaluate the strength and power of a certain water flow, we point out that such power corresponds to the power of 7–8 power units of a typical NPP.

The initial water outflow rate can be estimated as follows:



Fig. 1. Kakhovske reservoir before (above) and after the disaster (according to [<https://grivna.ua/publikatsii/kahovska-ges:-yak-use-pochinalosya-velike-budivnictvo-stalinskoyi-epohi-%28foto%29>])

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_0 \approx \left(\frac{\Delta m}{\Delta t}\right)_0 = -\rho S_{10} v_0.$$

Calculations showed that it was -90 kt/s , and the volumetric water outflow rate $\Delta V/\Delta t$ was $9 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$. At the same time, reference data on average water flow rate of the largest rivers of Ukraine are known: for Dniester it is $3.1 \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s}$, for Dnieper it is $1.67 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, and for Danube it is $6.43 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. A comparison of these characteristics indicates that the parameters of the water flow from the destroyed Kakhovske reservoir were practically catastrophic and environmentally dangerous for the entire region, both land and other hydrographic objects, including the Dnieper-Bug estuary, the Black Sea coast and the Black Sea itself (the quality of its water, Black Sea flora and fauna). The water level in the flooded areas increased until June 09, 2023, on this day it reached its maximum, and then gradually decreased. The width of the Dnieper has increased in some places to 10 km. For example, the water level in the Dnieper in the city of Kherson, which is located at a distance of approximately 80 km from the Kakhovka dam, increased by 5.37 m. The Inhulets River overflowed its banks.

Results of modeling. The initial equations describing the water flow from the destroyed Kakhovske reservoir are the equations for the flow speed $v(h)$, the current mass m or the current volume of water $V(h)$ in the reservoir and the water outflow rate $dm(h)/dt$ as a result of a leakage:

$$v = \sqrt{gh}, \quad (1)$$

$$m = \int_V \rho dV = \rho \int_0^L dL \int_0^l dl \int_0^{h_0} dh, \quad \frac{dm}{dt} = -\rho S_1 v, \quad (2)$$

where $L = L(h)$, $l = l(h)$, $m = m(h)$, $S_1 = S_1(h)$.

If the area of the mirror water surface $S(h) = S_0$, then we have a one-dimensional model (1D model):

$$V_0 = V_0 \frac{h}{h_0}, \quad m = m_0 \frac{h}{h_0},$$

where the index «0» refers to the initial volume, initial mass and height of the water column, and without the index to the current values of these parameters.

The simplest (1D) model of a reservoir is a rectangular parallelepiped of length L , width l and height h . In fact, when water leaks, the length L and width l of the mirror water surface also decrease with decreasing height of the water column h . Since $L \gg 1$, one can first assume that $L(h) \approx L_0$, and $l = l(h)$. Such a model is two-dimensional (2D model). In a three-dimensional (3D) model $L = L(h)$, $l = l(h)$. Knowing these dependencies, it is possible to calculate the dependence of the volume of water on the height of the water column, that is, $V = V(h)$, and then other parameters of the water flow.

Let us obtain the relation for $l(h)$. To do this, consider a cross section of the reservoir (Fig. 2).

Let the bottom profile be described by the relationship

$$h = h_0 \left(\frac{l}{l_0}\right)^\alpha,$$

where $l_0 = l(h_0)$, α is the flatness index of the reservoir bottom to be determined. At the same time

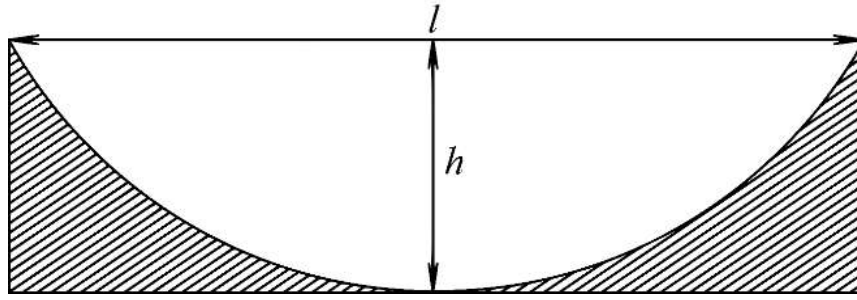


Fig. 2. Cross-section model of the reservoir

$$l = l_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/\alpha} = l_0 H^{1/\alpha}, \quad (3)$$

$$H = \frac{h}{h_0}.$$

The area of the shaded figure shown in the Appendix under the $h(l)$ curve is given by the relation

$$S_{l1} = 2 \int_0^h h dl = \frac{2}{\alpha} l_0 h_0 \int_0^H H^{1/\alpha} dH = \frac{2}{1+\alpha} l_0 h_0 H^{1+1/\alpha}.$$

The area of a rectangle of width l and height h is equal to $S_{l2} = lh$. Then the cross-sectional area of the reservoir:

$$S_l = S_{l2} - S_{l1} = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} l_0 h_0 H^{1+1/\alpha}. \quad (4)$$

Hence

$$S_{l0} = S_l(h_0) = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} l_0 h_0, \quad (5)$$

and the initial volume of water in the reservoir is determined by the formula

$$V_0 = S_l(h_0) L_0 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} L_0 l_0 h_0 = \frac{\alpha-1}{\alpha+1} S_0 h_0, \quad (6)$$

where $L_0 l_0 = S_0$. From (6) we find that $\alpha \approx 3.21$.

It should be taken into account that in this approximation it follows from (4) and (5) that

$$\frac{V(h)}{V_0} = \frac{S_l(h)}{S_{l0}} = H^{1+1/\alpha}, \quad (7)$$

From equation (2) taking into account the fact that $S_l(h) = S_{l0}H$, (1) and (7) we have:

$$\rho V_0 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) H^{1/\alpha} \frac{dH}{dt} = -\rho S_{l0} v_0 H^{3/2}, \quad H(0) = 1. \quad (8)$$

The solution to (8) is given by the following relation:

$$H = \left(1 + \frac{t}{\tau} \right)^{-2\alpha/(\alpha-2)}, \quad (9)$$

$$\tau = \frac{2V_0}{S_{l0} v_0} \frac{\alpha+1}{\alpha-2},$$

here τ is the characteristic time of the reservoir depletion.

For $\alpha \approx 3.21$ we get $\tau \approx 1.4 \cdot 10^6 \text{ s} \approx 16$ days. In this case, from (9), we have:

$$H = \left(1 + \frac{t}{16} \right)^{-5.3}.$$

In the limiting case, when $l(h) = l_0$, from (9) we obtain for the 1D model:

$$H = \left(1 + \frac{t}{\tau} \right)^{-2}, \quad \tau = 4.6 \text{ days}. \quad (10)$$

Knowing dependence (9), it is possible to calculate other main parameters of the water flow:

$$v = v_0 H^{1/2}, \quad (11)$$

$$\frac{m}{m_0} = H^{1+1/\alpha}, \quad (12)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\rho S_{l0} v_0 H^{3/2}, \quad (13)$$

$$E_p = \frac{1}{2} m g h = E_{p0} H^{2+1/\alpha}, \quad (14)$$

$$P_k = \frac{1}{2} \rho S_{l0} v_0^3 H^{5/2} = P_{k0} H^{5/2}. \quad (15)$$

Here E_p is the potential energy of water in the reservoir, P_k is the power of water flow. The water deficit in the reservoir can be determined from the equation

$$\Delta m = m_0 - m = m_0 (1 - H^{1+1/\alpha}). \quad (16)$$

Results of calculations of the dependence of the water flow main parameters (relative water level (H), water level (h), water flow speed (v), relative mass of water in the reservoir (m/m_0), water deficit in the reservoir (Δm), water outflow rate (dm/dt), water flow power (P_k) and potential energy of water mass (E_p)) versus time, counted from the moment of the Kakhovka dam destruction, are shown in Figs. 3–10.

Next, we take into account the approximate dependence of the reservoir length L on its depth, that is $L(h)$. Such a model is a three-dimensional one (3D model). By analogy with expression (3), we will assume that

$$L = L_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{1/\beta} = L_0 H^{1/\beta}. \quad (17)$$

According to our estimates, the exponent characterizing the flatness of the reservoir bottom in the longitudinal direction is $\beta \approx 10$. Then the equation for the relative height of the water column $H(t)$ taking into account the water outflow rate (2), the bottom profile in two directions (3) and (17) has the form:

$$\rho V_0 (1 + \gamma) H^\gamma \frac{dH}{dt} = -\rho S_{l0} v_0 H^{3/2}, \quad H(0) = 1. \quad (18)$$

It is taken into account here that the dependence of the volume of water on the height of the water column has the form:

$$V = V_0 H^{1+\gamma},$$

where a dimensionless parameter that describes the bottom profile in two directions

$$\gamma = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta}.$$

The solution to equation (18) is given by the following relation:

$$H = (1 + \frac{t}{\tau})^{1/(\gamma-0.5)}, \quad (19)$$

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10}v_0} \frac{1+\gamma}{0.5-\gamma}. \quad (20)$$

Dependence (19) is the basic one. It is used to determine the temporal dependencies of all other parameters of the water flow. Temporal variations in the relative height of the water column in the reservoir $H(t)$ depend on the dimensionless parameter γ , which characterizes the profile of the reservoir bottom. Thus, for $\gamma < 0.5$ we have

$$H = \frac{1}{(1+t/\tau)^{1/(0.5-\gamma)}}.$$

In particular, for $\alpha = 3.21$, $\beta = 10$ we have $\gamma \approx 0.41$, characteristic time $\tau \approx 3.15 \cdot 10^6 \text{ s} \approx 36$ days, describing the water flow dynamics.

If $\gamma > 0.5$, then

$$H = (1 - \frac{t}{\tau})^{1/(\gamma-0.5)},$$

where

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10}v_0} \frac{1+\gamma}{\gamma-0.5}.$$

For example, for $\gamma = 0.6$ we obtain practically the same characteristic time $\tau \approx 36.8$ days.

In the case where $\gamma = 0.5$ the temporal dependence has the simplest form:

$$H(t) = e^{-2t/3\tau},$$

where

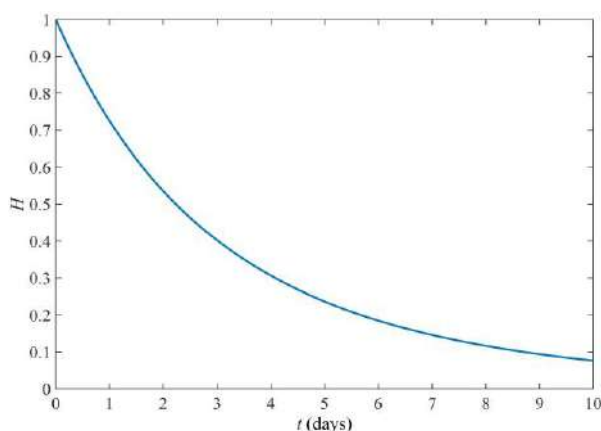


Fig. 3. Temporal dependence of the relative water level in the Kakhovske reservoir

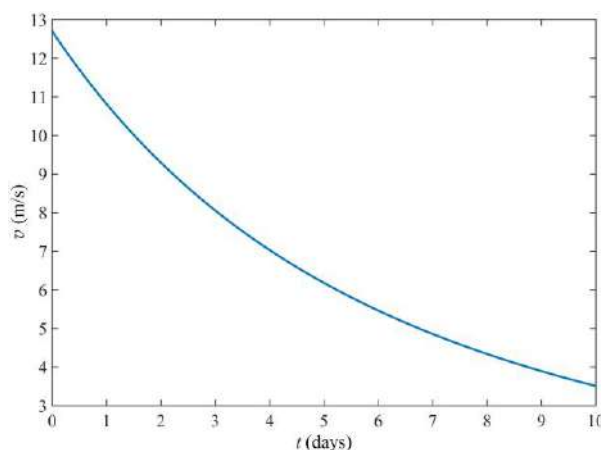


Fig. 5. Time dependence of the water flow speed from the Kakhovske reservoir

$$\tau = \frac{V_0}{S_{10}v_0} \approx 2 \cdot 10^5 \approx 2.3 \text{ days}. \quad (21)$$

From the given estimates of the characteristic time it is clear that it significantly depends on the bottom profile. The characteristic time of reservoir depletion is given by the relation (21). It is determined by the initial values of the reservoir volume, speed and cross-sectional area of the water flow.

Having relation (19), characteristic time τ and parameter γ , it is possible to calculate the main parameters of the water flow (height of the water column in the reservoir h , flow speed v , relative mass of water in the reservoir m/m_0 , water deficit in the reservoir Δm , water mass outflow dm/dt , power of water flow P_k , and potential energy of water mass E_p) according to equations (9), (11)–(16).

Let us compare the values of $H = h/h_0$ for three (1D, 2D, and 3D) models of water flow parameters given by relations (10), (9) and (19) (H_1 , H_2 , and H_3 , respectively) (Table 1). As can be seen from the results presented in Table 1, the difference in the relative height (H) values given by different models usually does not exceed 10–20%. This means that all three models satisfactorily describe the dynamics of water flow.

Results of calculations of the main parameters of water flow for the 3D model (19) using relationships

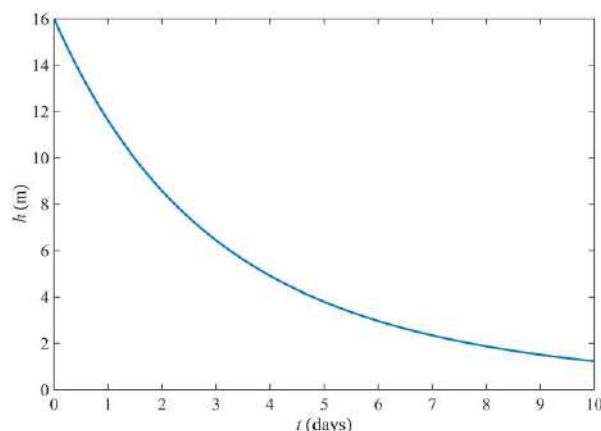


Fig. 4. Temporal dependence of the water level in the Kakhovske reservoir

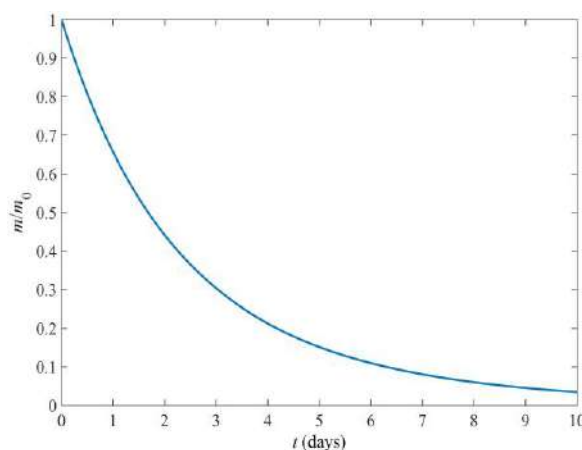


Fig. 6. Temporal dependence of the relative mass of water in the Kakhovske reservoir

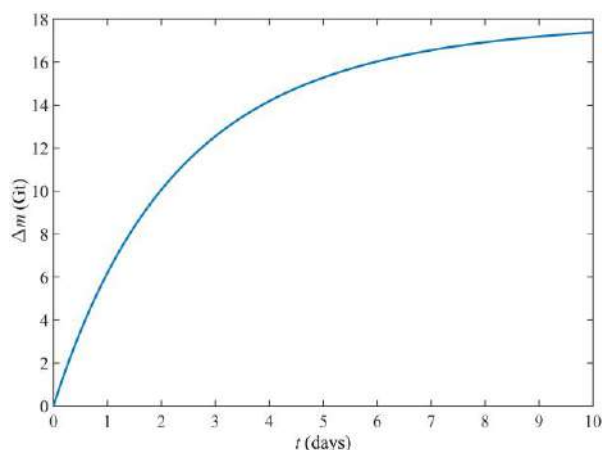


Fig. 7. Temporal dependence of water deficit in the Kakhovske reservoir

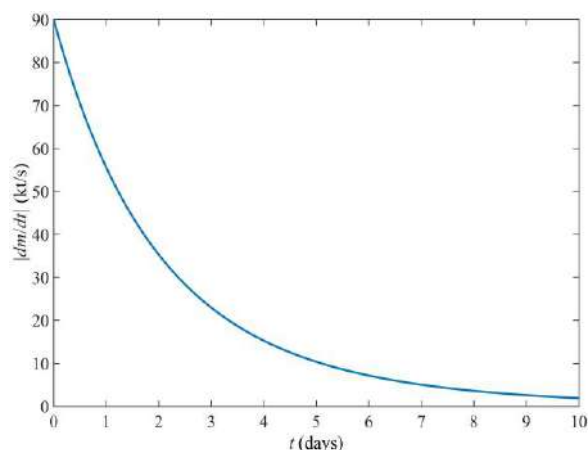


Fig. 8. Temporal dependence of the water flow modulus in the Kakhovske reservoir

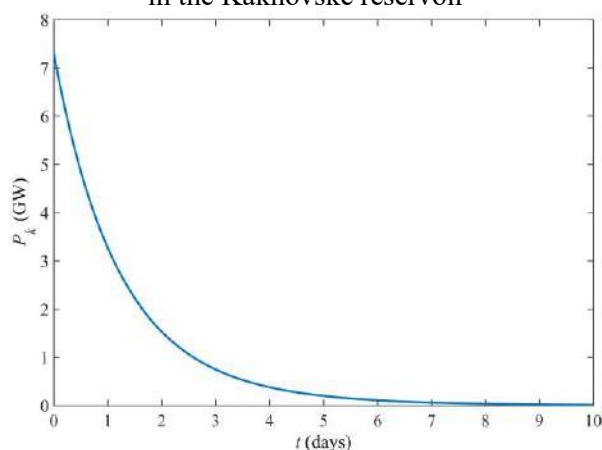


Fig. 9. Temporal dependence of the power of water flow from the Kakhovske reservoir

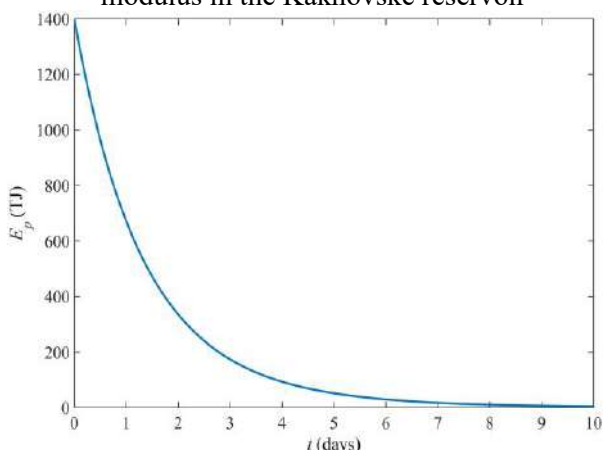


Fig. 10. Temporal dependence of the potential energy of water mass in the Kakhovske reservoir

for water flow speed (11), water outflow rate (13), water flow power (15) and relative mass of water in the reservoir

$$\frac{m}{m_0} = H^{1+\nu} = \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\nu+1}{\nu-0.5}},$$

water deficit in the reservoir

$$\Delta m = m_0(1 - H^{1+\nu}) = m_0\left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\nu+1}{\nu-0.5}}\right]$$

and potential energy of the water mass in the reservoir

$$E_p = E_{p0} H^{\nu+2} = E_{p0} \left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^{\frac{\nu+2}{\nu-0.5}}$$

are given in Table 2. The data in Table 2 show that over 10 days, the height of the water column in the reservoir decreased from 16 to ~1 m, the water outflow speed from 12.7 to 3.4 m/s, the mass of water from 18 to ~0.4 Gt, water outflow rate from 90 to 1.7 kt/s, water flow power from 7.3 to 0.01 GW, and energy E_p decreased from 1400 to ~2 TJ. Thus, the re-

Table 1

Temporal dependence of the relative height of the water column in the Kakhovske reservoir for three models (1D, 2D and 3D)

Number of days	Relative height of the water column		
	H_1	H_2	H_3
1	0.67	0.73	0.74
2	0.49	0.53	0.55
3	0.39	0.40	0.42
4	0.29	0.31	0.31
5	0.23	0.24	0.24
6	0.19	0.18	0.18
7	0.16	0.15	0.14
8	0.13	0.12	0.11
9	0.11	0.09	0.09
10	0.10	0.08	0.07

Table 2

Main parameters of water flow from the destroyed Kakhovka dam

Number of days	Main parameters of water flow						
	Height h , m	Speed v , m/s	Relative mass m/m_0	Mass deficit Δm , Gt	Outflow rate $ dm/dt $, kt/s	Flow power P_k , GW	Potential energy E_p , TJ
0	16	12.7	1	0	90	7.30	1400
1	11.8	10.9	0.65	6.3	57.3	3.44	678
2	8.8	9.4	0.43	10.3	36.7	1.64	331
3	6.7	8.2	0.29	12.8	24.5	0.84	173
4	5.0	7.1	0.19	14.6	15.5	0.39	83
5	3.7	6.2	0.13	15.7	10.6	0.21	45
6	2.9	5.4	0.09	16.4	6.9	0.10	22.5
7	2.2	4.8	0.06	16.9	4.7	0.055	12.3
8	1.8	4.2	0.04	17.3	3.3	0.03	6.9
9	1.4	3.8	0.03	17.5	2.4	0.02	4.2
10	1.1	3.4	0.02	17.6	1.7	0.01	2.3

sults of mathematical modeling and calculations show that in approximately 18 days, that is, on June 24, 2023, the unregulated water flow from the reservoir stopped. By the end of June 2023, the Kakhovske reservoir ceased to exist [2].

The next stage of the research was the assessment of flooding parameters. In approximately 200 s, the water flow traveled a distance from the nearest village (Kozats'ke village) $R \approx 2$ km. This means that its speed was $w \approx 10$ m/s. Since

$$\frac{dv}{dt} \approx S_w w \approx l_w h_w w,$$

where S_w is the cross-sectional area, l_w is the width, and height h_w of the water flow in the vicinity below the Kakhovka dam, then with a volumetric water outflow rate $dV/dt \approx 9 \cdot 10^4$ m³/s, a flow width $l_w \approx 1$ km, we have a flow height $h_w \approx 9$ m.

It is known that the water flow from the reservoir reached the city of Kherson ($R \approx 80$ km) in about 2 hours [2]. In this case, the water flow speed $w \approx 10$ m/s. The initial flooding rate was 0.2–0.3 m/h. The average flooding rate was close to 0.1 m/h. Over the course of two days, the height of the water column in the city reached $\Delta h \approx 5$ m. During this time, the water flow rate decreased almost three times and the value of Δh was gradually decreasing almost exponentially:

$$\Delta h = \Delta h_0 e^{-t/t_1},$$

where $\Delta h_0 \approx 5$ m at the beginning of June 08, 2023, $t_1 \approx 7$ –8 days. These estimates are in good agreement with the observational data [2, 3].

Mathematical modeling and numerical calculations showed that the potential energy of the water mass in the reservoir was 28 times higher than the energy release during the explosion of a nuclear bomb over Hiroshima. The power of the water flow reached the power of 7–8 NPP units. The initial speed of the water flow was close to 13 m/s, the water outflow rate was many times higher than the water out-

flow rate in the most powerful rivers and the strongest waterfalls. All this could not help leading to catastrophic consequences in the ecosystems located below the Kakhovske reservoir. There were also catastrophic consequences for what remained of the reservoir.

Ecological consequences of the Kakhovka reservoir dam catastrophic destruction. The results of mathematical modeling of water flow parameters from the reservoir showed that they were catastrophic. The destruction of the Kakhovka reservoir dam simply could not help causing very serious consequences and environmental hazards (and not only environmental).

The research and mathematical modeling carried out made it possible to substantiate the classification of the ecological consequences of the disaster by time. The following three categories are proposed: short-term, medium-term and long-term consequences.

The short-term consequences of the ecological situation lasted from the beginning of the disaster to ~10 days, that is, until the reservoir was empty. At the same time, nearby areas continued to be flooded. Infrastructure facilities in the territory were flooded, such as residential buildings, gas stations, landfills, sewers, cattle burial grounds, cemeteries and burial grounds, etc. 650 tons of petroleum products spilled into the water. More than 75 people and a large number of domestic and wild animals died. The flooding was accompanied by pollution of the Dnieper-Bug estuary and, finally, the Black Sea. The area of pollution was 7300 km² [2], dirt propagation speed was ~1 m/s. Flooding significantly affected the biodiversity in the Dnieper floodplain. The salinity of sea water in the northern part of the Black Sea decreased by 3–3.5 times (from 12–14 g/l to 4 g/l) [2]. The concentration of toxic substances (Cu, Zn, As, organochlorines, petroleum products) increased significantly [2].

Medium-term ecological consequences lasted from ~1 month to many months. They began with the complete depletion of the Kakhovske reservoir, the destruction of the water supply system of the cities of Kryvyi Rih, Marhanets, Berislav, Enerhodar and other settlements, where about 1 million inhabitants live, and the destruction of 31 irrigation systems in three regions (Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia and Kherson). Problems arose with cooling the equipment of the Zaporizhzhia NPP. On an area of 584 km² arable land has been significantly damaged as a result of the washout of the top fertile soil layer, therefore, there will be a noticeable decrease in the area of productive soils, which means that the parameters of land productivity in the region will decrease significantly. There have been significant losses to the fisheries industry. A threat has arisen to the existence and preservation of especially valuable ecosystems. These include the Nyzhn'odniprovs'kyi National Park, the Black Sea Biosphere Reserve, the Kinburn Spit, etc. Certain consequences are caused by active processes of eutrophication in water bodies. Other bi-hazardous consequences are caused by the decomposition of the remains of shellfish weighing 500 thousand tons remaining at the bottom of the former Kakhovske reservoir [28].

Long-term consequences (from ~0.5 to 10 years or more) are associated with the exposure and drying of the bottom of the former reservoir, which contained large amounts of pollutants, heavy metals, radioactive elements, etc. These substances can enter

the atmosphere, be transported by wind currents over significant distances, and finally appear in the food chain [29]. Irrigation systems have been destroyed over an area of 5840 km² [27], which will most likely ultimately lead to desertification, and this in turn will affect the intensity of dust storms. Eventually this will lead to significant climate change. Flooding can lead to the activation of dangerous geological processes. Flooding and emptying of the reservoir had a negative impact on land use in certain regions of the Dnipropetrovsk, Zaporizhzhia, Kherson and Mykolaiv regions.

Discussion. The modeling carried out in the paper showed that the destruction of the Kakhovka dam led to the release of an unregulated water flow with an initial power of about 7.3 GW, an initial water flow rate of $9 \cdot 10^4$ m³/s, while the water flow of the Dnieper River was on average $1.7 \cdot 10^3$ m³/s, that is, they were 53 times less. A powerful water flow about 10 m high led to flooding of large areas. The area of the mirror water surface was about 650 km². In approximately 1 day, the flow reached the Dnieper-Bug estuary, and in 2 days it reached the Odessa seaport. The flooding situation more or less stabilized in ~10–15 days. During this time, the reservoir lost most of its water volume. Its area decreased from 2155 to 261 km², that is, by 88%.

The total area of flooded lands is given in Table 3. The data presented in Table 3 shows that grassy wetlands, forests, meadows and pastures were most affected.

Table 3

Territorial distribution of lands in the flood zone as a result of the destruction of the Kakhovka HPP dam [27]

Land distribution	Area, ha	Relative area, %
Total	65004	100
Grassy wetlands	32473	50
Forests	13577	20.9
Meadows, pastures	12177	18.7
Buildings	4088	6.3
Arable land	3606	4
Other	82	0.1

The flooding led to a number of catastrophic ecological consequences: more than 75 people and a large number of wild and domestic animals died, buildings, industrial facilities, roads, arable land, etc. were damaged. Landfills, sewers, cattle burial grounds, and cemeteries were flooded, which became a biohazardous phenomenon in the region. The remains ended up in the Dnieper, Dnieper-Bug estuary and the Black Sea. The sanitary and epidemiological condition of the adjacent territories has significantly deteriorated.

The destruction of the Kakhovka dam led to short-term, medium-term and long-term socio-ecological, biohazardous, negative sanitary and hygienic

consequences, the significance of which remains to be determined. Now we can already state that they are catastrophic. There was a real ecocide. Nothing like this has happened in the world for decades.

Main results. 1. For the first time, a methodology has been developed for quantitative analysis of dynamic processes during the unregulated release of large masses of water from damaged dams. Simple analytical two- and three-dimensional models of water flow parameters from the destroyed Kakhovske reservoir have been proposed. Relationships were obtained to estimate the potential energy of the water mass in the reservoir, the kinetic energy of the water flow, the height of the level and mass of water in the

reservoir, flow speed, and water outflow. These relationships were used to assess the consequences of the disaster. The developed methodology can be used to predict the consequences of dam damage on other rivers and reservoirs.

2. Numerical modeling of the dynamics of the main parameters of water flow from the destroyed Kakhovske reservoir was carried out. It was established that in about ten days the height of the water column in the reservoir decreased by more than an order of magnitude, the flow speed by about 4 times, the volume by 45 times, water outflow rate by almost two orders of magnitude, the flow power and potential energy of water in the reservoir by almost by three orders of magnitude.

3. The reservoir lost approximately 18 Gt of water. An area of 650 km² was flooded. The height of the water column in the vicinity of the dam reached 10 m, and at a distance of ~80 km it was 5 m. The initial speed of the water flow below the dam was close to 10 m/s. This speed was maintained at a distance of ~80 km from the dam, which contributed to the rapid onset and inevitability of the disaster that took place in the dead of night (about 03:00).

4. The ecological consequences of the worst man-made disaster in decades were very significant. Certain consequences will be observed for ~10 years or more. It can be argued that irreparable damage has been caused to ecosystems, which is classified as ecocide.

Bibliography

1. Khilchevskiy V., Grebin V., Dubniak S., Zabokrytska M., Bolbot H. Large and small reservoirs of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*. 2022. Iss. 52. P. 101-107. DOI: <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140379>
2. Gleick P., Vyshnevskiy V., Shevchuk S. Rivers and water systems as weapons and casualties of the Russia-Ukraine war. *Earth's Future*. 2023. Vol. 11, Iss. 10. e2023EF003910. DOI: 10.1029/2023EF003910
3. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48, Iss. 5. P. 631-647. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
4. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. Natural Processes in the Area of the Former Kakhovske Reservoir After the Destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 147-164. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0014>
5. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. The Impact of the Kakhovka Dam Destruction on the Water Temperature in the Lower Reaches of the Dnipro River and the Former Kakhovske Reservoir. *Journal of Landscape Ecology*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0008>
6. Хільчевський В. К. Водні та збройні конфлікти – Класифікаційні ознаки: у світі та в Україні. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*. 2022. № 63(1). С. 6-19. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1>
7. Harada K. H., Soleman S. R., Ang J. S. M., Trzcinski A. P. Conflict-related environmental damages on health: Lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2022. Vol. 27. P. 35. DOI: <https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122>
8. Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 837. 155865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
9. Maxar publishes updated satellite imagery of Kakhovka dam destruction. *The Kyiv Independent* : вебсайт. URL: <https://kyivindependent.com/new-satellite-images-show-flooding-from-kakhovka-dam-destruction/> (дата звернення: 24.07.2023)
10. Satellite Imagery Gallery. *Planet* : вебсайт. URL: <https://www.planet.com/gallery/#!/post/destruction-of-the-kakhovka-dam> (дата звернення: 24.12.2023)
11. New damage to major dam near Kherson after Russian retreat - Maxar satellite. *Reuters* : вебсайт. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/new-damage-major-dam-near-kherson-after-russian-retreat-maxar-satellite-2022-11-11/> (дата звернення: 10.11.2023)
12. Ukraine says Kakhovka dam collapse caused 1.2 billion euros in damage. *Reuters* : вебсайт. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-says-kakhovka-dam-collapse-caused-12-billion-euros-damage-2023-06-20/> (дата звернення: 08.11.2023)
13. Why the Evidence Suggests Russia Blew Up the Kakhovka Dam. *The New York Times* : вебсайт. URL: <https://www.nytimes.com/interactive/2023/06/16/world/europe/ukraine-kakhovka-dam-collapse.html> (дата звернення: 08.11.2023)
14. Seismic signals recorded from an explosion at the Kakhovka Dam in Ukraine June 6th, 2023. *NORSAR* : вебсайт. URL: <https://www.norsar.no/in-focus/seismic-signals-recorded-from-an-explosion-at-the-kakhovka-dam-in-ukraine> (дата звернення: 24.12.2023)
15. Nova Kakhovka dam: Here are the key theories on what caused Ukraine's catastrophic dam collapse. *CNN* : вебсайт. URL: <https://www.cnn.com/2023/06/08/europe/nova-kakhovka-destruction-theories-intl/index.html> (дата звернення: 08.11.2023)
16. Ukraine dam: What we know about Nova Kakhovka incident. *BBC News* : вебсайт. URL: <https://www.bbc.com/news/world-europe-65818705> (дата звернення: 13.11.2023)
17. What attacks have there been on dams in Ukraine? *BBC News* : вебсайт. URL: <https://www.bbc.com/news/world-65753136> (дата звернення: 10.06.2023)

18. Dannenbaum T. What international humanitarian law says about the Nova Kakhovka dam. The Lawfare Institute : вебсайт. URL: <https://www.lawfareblog.com/what-international-humanitarian-law-says-about-nova-kakhovka-dam> (дата звернення: 09.06.2023)
19. Gleick P. H., Shimabuku M. Water-related conflicts: Definitions, data, and trends from the water conflict chronology. *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18, no. 3. 034022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbb8f>
20. Knight M. At least 16 dead in Kakhovka dam collapse flooding, Kyiv says. CNN : вебсайт. URL: <https://www.cnnphilippines.com/world/2023/6/18/death-toll-dam-collapse-ukraine.html> (дата звернення: 18.06.2023)
21. Tavakkoliestahbanati A., Milillo P., Kuai H. et al. Pre-collapse spaceborne deformation monitoring of the Kakhovka dam, Ukraine, from 2017 to 2023. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. P. 145. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01284-z>
22. Yang Q. et al. Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
23. Kadam P. B. et al. Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2024. Vol. XLVIII-3-2024. P. 251-256. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxviii-3-2024-251-2024>
24. Abou Samra R. M. et al. Assessing the Catastrophic Environmental Impacts on Dam Breach Using Remote Sensing and Google Earth Engine. *Water Resources Management*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03902-z>
25. Dari J., Filippucci P., Brocca L. The development of an operational system for estimating irrigation water use reveals socio-political dynamics in Ukraine. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2024. Vol. 28, no. 12. P. 2651-2659. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-28-2651-2024>
26. Дорош Й. М., Ібатулін Ш. І., Дорош О. С., Сакаль О. В., Дорош А. Й. Застосування геоінформаційних технологій при визначенні площ підтоплених земель унаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2023. № 3. С. 98-109. DOI: <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2023.03.09>
27. Саніна І. В., Люта Н. Г. Екологічні наслідки підризу греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*. 2023. № 2. С. 50-55. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>
28. Linnik P. M., Zubenko I. B. Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*. 2000. Vol. 5, Iss. 1. P. 11-21. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

References

1. Khilchevskiy, V., Grebin, V., Dubniak, S., Zabokrytska, M., & Bolbot, H. (2022). Large and small reservoirs of Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52, 101-107. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.140379>
2. Gleick, P., Vyshnevskiy, V., & Shevchuk, S. (2023). Rivers and water systems as weapons and casualties of the Russia-Ukraine war. *Earth's Future*, 11(10), Article e2023EF003910. <https://doi.org/10.1029/2023EF003910>
3. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Olynyk, Y., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48(5), 631-647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
4. Vyshnevskiy, V., & Shevchuk, S. A. (2024). Natural Processes in the Area of the Former Kakhovske Reservoir After the Destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*, 17(2), 147-164. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0014>
5. Vyshnevskiy, V., & Shevchuk, S. A. (2024). The Impact of the Kakhovka Dam Destruction on the Water Temperature in the Lower Reaches of the Dnipro River and the Former Kakhovske Reservoir. *Journal of Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0008>
6. Khilchevskiy, V. K. (2022). Water and armed conflicts—Classification features in the world and in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 63(1), 6-19. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1> [in Ukrainian]
7. Harada, K. H., Soleman, S. R., Ang, J. S. M., & Trzcinski, A. P. (2022). Conflict-related environmental damages on health: Lessons learned from the past wars and ongoing Russian invasion of Ukraine. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 27, Article 35. <https://doi.org/10.1265/ehpm.22-00122>
8. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837, Article 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
9. The Kyiv Independent. (2023). Maxar publishes updated satellite imagery of Kakhovka dam destruction. <https://kyivindependent.com/new-satellite-images-show-flooding-from-kakhovka-dam-destruction/>
10. Planet. (n.d.). Satellite Imagery Gallery. <https://www.planet.com/gallery#!/post/destruction-of-the-kakhovka-dam>
11. Reuters. (2022). New damage to major dam near Kherson after Russian retreat - Maxar satellite. <https://www.reuters.com/world/europe/new-damage-major-dam-near-kherson-after-russian-retreat-maxar-satellite-2022-11-11/>
12. Reuters. (2023). Ukraine says Kakhovka dam collapse caused 1.2 billion euros in damage. <https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-says-kakhovka-dam-collapse-caused-12-billion-euros-damage-2023-06-20/>

13. The New York Times. (2023). Why the Evidence Suggests Russia Blew Up the Kakhovka Dam. <https://www.ny-times.com/interactive/2023/06/16/world/europe/ukraine-kakhovka-dam-collapse.html>
14. NORSAR. (2023). Seismic signals recorded from an explosion at the Kakhovka Dam in Ukraine June 6th, 2023. <https://www.norsar.no/in-focus/seismic-signals-recorded-from-an-explosion-at-the-kakhovka-dam-in-ukraine>
15. CNN. (2023). Nova Kakhovka dam: Here are the key theories on what caused Ukraine's catastrophic dam collapse. <https://www.cnn.com/2023/06/08/europe/nova-kakhovka-destruction-theories-intl/index.html>
16. BBC News. (2023, June 10). What attacks have there been on dams in Ukraine? <https://www.bbc.com/news/world-65753136>
17. BBC News. (2023). Ukraine dam: What we know about Nova Kakhovka incident. <https://www.bbc.com/news/world-europe-65818705>
18. Dannenbaum, T. (2023, June 9). What international humanitarian law says about the Nova Kakhovka dam. The Lawfare Institute. <https://www.lawfareblog.com/what-international-humanitarian-law-says-about-nova-kakhovka-dam>
19. Gleick, P. H., & Shimabuku, M. (2023). Water-related conflicts: Definitions, data, and trends from the water conflict chronology. *Environmental Research Letters*, 18(3), Article 034022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbb8f>
20. Knight, M. (2023, June 18). At least 16 dead in Kakhovka dam collapse flooding, Kyiv says. CNN Philippines. <https://www.cnnphilippines.com/world/2023/6/18/death-toll-dam-collapse-ukraine.html>
21. Tavakkoliestahbanati, A., Milillo, P., Kuai, H., Liang, C., Bekaert, D., Manipon, G., Hua, H., Huffman, O., Hook, S., & Zebker, H. (2024). Pre-collapse spaceborne deformation monitoring of the Kakhovka dam, Ukraine, from 2017 to 2023. *Communications Earth & Environment*, 5, Article 145. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01284-z>
22. Yang, Q., Yan, Y., Wang, R., Li, L., Huang, S., Yang, G., Wang, H., Zhuo, L., Lei, X., & Xiao, J. (2024). Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
23. Kadam, P. B., Thakkar, K., Chaudhary, S., Dhage, P., & Tiwari, M. K. (2024). Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-3-2024, 251-256. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-3-2024-251-2024>
24. Abou Samra, R. M., Abou El-Magd, I., Hermas, E. S. A., & El Kafrawy, S. B. (2024). Assessing the Catastrophic Environmental Impacts on Dam Breach Using Remote Sensing and Google Earth Engine. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03902-z>
25. Dari, J., Filippucci, P., & Brocca, L. (2024). The development of an operational system for estimating irrigation water use reveals socio-political dynamics in Ukraine. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(12), 2651-2659. <https://doi.org/10.5194/hess-28-2651-2024>
26. Dorosh, Y., Ibatullin, Sh., Dorosh, O., Sakal, O., & Dorosh, A. (2023). Application of geo-information technologies in determining the area of flooded lands as a result of the destruction of the Kakhovska HPP. *Land Management, Cadastre and Land Monitoring*, (3), 98-109. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2023.03.09> [in Ukrainian]
27. Sanina, I. V., & Lyuta, N. G. (2023). Environmental consequences of the Kakhovka hydroelectric power plant dam explosion and ways to improve water supply to the population. *Mineral resources of Ukraine*, (2), 50-55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55> [in Ukrainian]
28. Linnik, P. M., & Zubenko, I. B. (2000). Role of bottom sediments in the secondary pollution of aquatic environments by heavy-metal compounds. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 5(1), 11-21. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1770.2000.00094.x>

Екологічні наслідки катастрофічного руйнування греблі Каховського водосховища

Леонід Чорногор¹

д. фіз.-мат. н., професор, член-кор. НАН України,
зав. кафедри космічної радіофізики

¹ Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;

Алла Некос¹

д. геогр. н., професор,
зав. кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти;

Ганна Тітенко¹

к. геогр. н., доцент,
директор навчально-наукового інституту екології;

Леонід Чорногор¹,

студент магістратури навчально-наукового інституту екології

Актуальність обумовлена необхідністю детального фізико-математичного моделювання для кількісної оцінки жакливих екологічних наслідків катастрофічного руйнування греблі Каховського водосховища (Херсонська область, Україна) 06 червня 2023 р. Метою роботи є визначення екологічних наслідків шляхом числового моделювання параметрів нерегульованого скиду надпотужного водного потоку, що стався внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища. Для досягнення мети використовувалися багатофакторний аналіз, математичне моделювання, аналітичні та числові розрахунки. Головні результати полягають у наступному. Вперше розроблено математичні 1D, 2D- та 3D-моделі динаміки водного потоку з Каховського водосховища, що дозволяють оцінити екологічні наслідки затоплення значних територій країни. Проведено обчислення часових залежностей основних параметрів водного потоку зі зруйнованого Каховського водосховища. Встановлено, що приблизно за десять діб висота стовпа води у водосховищі зменшилася більше, ніж на порядок, швидкість потоку – приблизно у 4 рази, об'єм – у 45 разів, витрати води – майже на два порядки, потужність потоку та потенціальна енергія води у водосховищі – майже на три порядки. Водосховище втратило близько 18 Гт води. Була затоплена територія площею у 650 км². Висота стовпа води в околицях греблі сягала 10 м, а на відстані ~80 км – 5 м. Початкова швидкість потоку води нижче греблі була близькою до 10 м/с. Така швидкість зберігалася на відстані ~80 км від греблі, що сприяло швидкому настанню та неминучості катастрофи, яка мала місце глибокої ночі (близько 03 годин). Екологічні наслідки найбільшої в світі техногенної катастрофи за десятиліття були дуже значними. Певні наслідки будуть спостерігатися ~10 років і більше. Можна стверджувати, що екосистемам України нанесено непоправну шкоду, яка кваліфікується як екоцид.

Ключові слова: Каховське водосховище, руйнування греблі, математичні моделі, водний потік, витрата води, швидкість витікання, енергетичні характеристики.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Надійшла 8 лютого 2024 р.

Прийнята 23 березня 2024 р.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ПОДАЮТЬСЯ ДО «ВІСНИКА ХАРКІВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ»

До Вісника Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна серія «Геологія. Географія. Екологія», приймаються наукові статті обсягом біля 40 тис. знаків, присвячені дослідженням у галузях геології, геохімії, гідрогеології, географії, економічної та соціальної географії, екології, а також суміжних дисциплін. Матеріали можуть бути представлені українською або англійською мовами. Перевага надається англомовним статтям. Рішення про публікацію приймається редакційною колегією „Вісника”, при цьому кожна стаття рецензується двома вченими-фахівцями у даній тематиці.

Матеріали подаються в електронному вигляді та надсилаються на електронну пошту geoseries@karazin.ua. Електронна версія оформлюється у форматі Microsoft Word, шрифт Times New Roman, розмір 14, міжрядковий інтервал 1,5, всі поля по 2 см, відступ для абзацу – 0,75 см. **Жирним** шрифтом виділяються підзаголовки у статті. Ілюстрації, включаючи графіки і схеми, мають бути розміщені безпосередньо в тексті, а також подані окремими файлами. Скрізь, де можливо, доцільніше використовувати графіки, а не таблиці. Орієнтація сторінок – книжкова. Вирівнювання слід робити по ширині сторінки. Якщо стаття українською, є необхідним дублювання підписів до рисунків та назв таблиць і діаграм англійською.

Згідно вимог МОН України оригінальна стаття у фаховому виданні має складатися з таких розділів:

1. **Постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.
2. **Аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання порушеної проблеми, на які спирається автор.
3. **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**, яким присвячується стаття;
4. **Формулювання мети статті** (постановка завдання).
5. **Виклад основного матеріалу дослідження** з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.
6. **Висновки** з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

Для статей необхідно вказати УДК, подати назву (до 10 слів), анотацію (1800-2500 знаків) та ключові слова (8-10).

На окремому аркуші надається інформація про авторів (прізвище, ім'я та по-батькові, повна назва організації, посада, вчений ступінь і звання, поштова адреса, телефон, e-mail, ORCID) українською й англійською мовами. Перелік посилань оформлюється згідно міжнародного стандарту APA (American Psychological Association). До переліку обов'язково повинна бути включена література за останні п'ять років, у тому числі закордонна та включена до наукометричних баз Scopus та WoS, а сам перелік повинен містити не менше ніж 20 посилань. Також обов'язково необхідно додавати номери DOI (за наявності).

Також є необхідним розгорнутий реферат англійською мовою, оформлений згідно міжнародних вимог до наукових видань. Реферат повинен мати:

- обсяг 2500-3500 знаків,
- змістовність (відображати головний зміст статті та результати досліджень),
- структурованість (наявність обов'язкових елементів: *мета, методика, результати, наукова новизна, практична значимість, ключові слова*).

Після реферату необхідно навести **References** – перекладений англійською список використаних джерел. В кінці джерела вказується мова оригіналу у квадратних дужках, наприклад [in Ukrainian].

Рукописи, не оформлені належним чином, не приймаються до публікації.

Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку рукопису.

У разі переробки статті авторами датою надходження рукопису статті в редакцію приймається дата її повторного надсилання.

При підтвердженні позитивного рішення на публікацію статті, автор має оформити та надіслати згоду на публікацію та оприлюднення персональних даних.

Зразок оформлення статті :

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-08>

UDC 528.8+551.4

Received 23 April 2023

Accepted 12 May 2023

Integrating remote sensing and aeromagnetic data for lithological and structural lineaments mapping in Abu Ghaylan - Kiklah - Tighrinna, northwest Libya

Nureddin Saadi ¹

PhD (Geological Engineering), Lecturer, Department of Geological Engineering,

¹ University of Tripoli, Tripoli, Libya,

e-mail: n.saadi@uot.edu.ly, <https://orcid.org/0000-0003-0593-8578>;

Ousama Elkoul ²

...

ABSTRACT

Problems Statement and Purpose. Libya is the fourth-largest country in Africa and the seventeenth-largest country in the world with area of 1,759,540 sq. km. Most of Libya is located in the Sahara Desert and known for being the driest and most remote regions with limited accessibility. ...

Keywords: Libya, Remote Sensing, Digital Elevation, Lineaments, Lithological Mapping, Aeromagnetic, Data Integration.

Introduction

Integration approach of multi-source data can improve geological interpretation and provide detailed information on unexplored areas [1–3]. The remote sensing satellites (sensors) can detect and map geological surface based on the spectral and spatial resolution [4, 5]. ...

References

1. Thiele, S.T., Lorenz, S., Kirsch, M., Cecilia Contreras Acosta, I., Tusa, L., Herrmann, E., Möckel, R., Gloaguen, R. (2021). Multi-Scale, Multi-Sensor Data Integration for Automated 3-D Geological Mapping. *Ore Geology Reviews*, 136, 104252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104252>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Інтеграція дистанційного зондування та аеромагнітних даних для картографування літологічних і структурних ліній в Абу-Гайлан - Кікла - Тігрінна, північно-західна Лівія

Нуреддін Сааді ¹

доктор філософії (геологічна інженерія), викладач кафедри геологічної інженерії,

¹ Університет Тріполі, Тріполі, Лівія;

Усама Елкул ²

...

У 1970-х роках Центр промислових досліджень у Лівії розпочав створювати геологічні карти всіх лівійських земель, отриманих з аналогових (друкованих) аерофотознімків і геологічних польових поїздок у деякі доступні місця. ...

Ключові слова: Лівія, дистанційне зондування, цифровий рельєф, лінеamenti, літологічне картування, аеромагнітний, інтеграція даних.

Список використаної літератури

1. Multi-Scale, Multi-Sensor Data Integration for Automated 3-D Geological Mapping / S.T. Thiele et al. *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 136. P. 104252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104252>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Надійшла 23 квітня 2023 р.

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Прийнята 12 травня 2023 р.

Наукове видання

ВІСНИК
ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В. Н. КАРАЗІНА

серія
«ГЕОЛОГІЯ. ГЕОГРАФІЯ. ЕКОЛОГІЯ»

Випуск 61

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Українською та англійською мовами

Редактор В. Г. Суярко
Технічний редактор О. В. Чуєнко
Комп'ютерне верстання О. В. Чуєнко
Відповідальний за випуск В. Г. Суярко

Підписано до друку 25.11.2024 р. Формат 60x84/8. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 40,4. Обл.-вид. арк. 46,9.
Наклад 100 пр. Зам. № 40/24. Ціна договірна.

Видавець та виготовлювач
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
61022, Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.09.