



ISSN 2310-4678

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

2/2025



ЗБАЛАНСОВАНЕ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Виходить 4 рази на рік

№ 2/2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

ДРЕБОТ ОКСАНА ІВАНІВНА

д.е.н., професор, академік НААН

Відповідальний секретар

ВИСОЧАНСЬКА Марія Ярославівна

д.е.н., с.д.

- Антоненко Ірина Ярославівна** • д.е.н., професор (Київ)
- Бадрі Гечбая** • д.е.н., професор (Грузія)
- Вежбінський Богдан** • д.е.н., професор (Республіка Польща)
- Грановська Людмила Миколаївна** • д.е.н., професор,
член-кореспондент НААН (Одеса)
- Дем'янюк Олена Сергіївна** • д.с.-г.н., професор,
член-кореспондент НААН (Київ)
- Добряк Дмитро Семенович** • д.е.н., професор, член-кореспондент НААН
- Дубас Ростислав Григорович** • д.е.н., професор (Київ)
- Ілієв Іван Олександрович** • д. н., професор (Болгарія)
- Йошіхіко Окабе** • д.е.н., професор (Японія)
- Копій Леонід Іванович** • д.с.-г.н., професор (Львів)
- Кузін Наталія Василівна** • д.е.н., доцент, професор (Біла Церква)
- Москаленко Анатолій Михайлович** • д.е.н., професор,
член-кореспондент НААН (Чернігів)
- Мудрак Олександр Васильович** • д.с.-г.н., професор (Вінниця)
- Новаковська Ірина Олексіївна** • д.е.н., професор, член-кореспондент НААН
(Київ)
- Паляничко Ніна Іванівна** • д.е.н., старший науковий
співробітник (Київ)
- Собчик Вікторія** • д.с.-г.н., професор (Республіка Польща)
- Тараріко Олександр Григорович** • д.с.-г.н., професор, академік НААН (Київ)
- Фурдичко Орест Іванович** • д.е.н., д.с.-г.н., професор, академік НААН
(Київ)
- Шерстобоева Олена Володимирівна** • д.с.-г.н., професор (Київ)
- Шершун Микола Харитонович** • д.е.н., професор (Київ)
- Юхновський Василь Юрійович** • д.с.-г.н., професор (Київ)

Засновники:

Інститут агроекології і природокористування НААН

ТОВ “Екоінвестком”

Свідоцтво про реєстрацію

КВ № 18960-7750 Р від 29.05.2012 р.

Видавець:

ТОВ “Екоінвестком”

Свідоцтво про реєстрацію

ДК № 4293 від 02.04.2012 р.

Адреса редакції:

03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 12

тел./факс: (044) 526-33-36

www.natureus.org.ua

e-mail: nature_us@ukr.net

Журнал включено

до Переліку наукових фахових видань України (Категорія “Б”)

згідно з наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р.

за такими спеціальностями: 051 — Економіка, 101 — Екологія,

201 — Агрономія, 205 — Лісове господарство.

Журнал включено

до міжнародних інформаційних та наукометричних баз:

RePEc, Research Bible, Google Scholar,

Advanced Science Index, Polska Bibliographia Naukowa.

Рекомендовано до друку

Вченою радою Інституту агроекології

і природокористування НААН

(протокол № 6 від 16.05.2025 р.).

Відповідальність за добір і викладення фактів несуть автори.

Точка зору редколегії не завжди збігається з позицією авторів.

Підписано до друку 30.06.2025 р. Формат 60×84/8. Друк офсетний.

Ум. друк. арк. 15,12. Наклад 300 прим. Зам. № ЗП-02-25.

Оригінал-макет та друк ТОВ “ДІА”. 03022, Київ-22, вул. Васильківська, 45.

ЗМІСТ

**Дребот О. І., Мішенін Є. В., Шершун М. Х.,
Сахарнацька Л. І., Боцула О. І.**

Циркулярна економіка в контексті
еколого-економічного механізму
комплексного використання
лісоресурсного потенціалу. 5

**Палапа Н. В., Шевченко Т. Л.,
Мішенін Є. В., Височанська М. Я.**

Агроекологічні та економіко-технологічні
аспекти захисту лікарських культур
при вирощуванні їх на сільських
селітебних територіях. 13

Приведенюк Н. В., Глущенко Л. А.

Ризик забруднення лікарської рослинної
сировини піролізидиновими алкалоїдами. . . 23

Ше В. В.

Еколого-економічний моніторинг
сільських територій із застосуванням
програмних інструментів
(на прикладі Тернопільської області). 31

Мороз В. В., Криницький Г. Т.

Вплив сонячної активності
на санітарний стан лісів. 40

Мудрак О. В., Дубровський В. Ю.

Раритетне фіторізноманіття
ключових територій екологічної мережі
Центрального Придніпров'я. 53

Ільєнко Т. В., Васильєв Д. П.

Порівняльний аналіз спектральних
індексів для виявлення забудови на основі
супутникових знімків Sentinel-2. 64

**Совгіра С. В., Душечкіна Н. Ю.,
Кочубей О. В.**

Формування екомереж у контексті впливу
неорганічних забруднювачів. 79

**Разанов С. Ф., Матусяк М. В.,
Бондар А. О., Врадій О. І.**

Біоекологічний та енергетичний
потенціал деревостанів
Robinia pseudoacacia L.
в умовах Вінницького надлісництва
ДП "Ліси України". 85

CONTENTS

**Drebot O., Mishenin Ye., Shershun M.,
Sakharnatska L., Botsula O.**

Circular economy in the context
of the ecological-economic mechanism
of comprehensive use of forest
resource potential. 5

**Palapa N., Shevchenko T.,
Mishenin Ye., Vysochanska M.**

Agroecological and economic-technological
aspects of medicinal plant protection
in the cultivation of medicinal crops
in rural settlements. 13

Pryvedeniuk N., Hlushchenko L.

Risk of contamination of medicinal plant
raw materials with pyrrolizidine alkaloids. . . 23

She V.

Ecological and economic
monitoring of rural areas
using software tools
(on the example of Ternopil region). 31

Moroz V., Krynytskyi H.

Influence of solar activity
on the sanitary condition of forests. 40

Mudrak O., Dubrovskiy V.

Rare phytodiversity of key areas
of the ecological network
of the Central Dnipro region. 53

Iliencko T., Vasiliev D.

Comparative analysis of spectral indices
for building detection based on Sentinel-2
satellite images. 64

**Sovhira S., Dushechkina N.,
Kochubei O.**

Formation of econetworks in the context
of the impact of inorganic pollutants. 79

**Razanov S., Matusiak M.,
Bondar A., Vradii O.**

Bioecological and energy potential
of *Robinia pseudoacacia* L. stands
under the conditions
of the Vinnytsia Forestry District
of SE "Forests of Ukraine". 85

ЗМІСТ

Махінько Р. Г., Дунаєвська О. Ф.

Радіонуклідне забруднення
річок Житомирського Полісся:
аналіз біоаккумуляції в гідробіонтах. 94

Карачинська Н. В., Ліщук А. М.

Оптимізація фізіологічного стану
рослин як основа екологічно безпечного
агровиробництва 102

**Дубовий В. І., Будак О. О.,
Холоденко І. В., Ляшинська О. В.**

Роль мулових мас стічних вод
у розширенні асортименту
органо-мінеральних добрив 113

**Овчарук О. В., Бабій Я. В.,
Овчарук В. І., Аветісян Г. А.,
Ткач О. В., Кічігіна О. О.**

Вплив температури ґрунту на ріст
і розвиток рослин квасолі за різних
строків сівби в умовах Правобережного
Лісостепу України. 120

Правила для авторів. 129

CONTENTS

Makhinko R., Dunaievska O.

Radionuclide contamination
of rivers in Zhytomyr Polissia:
analysis of bioaccumulation in hydrobionts. . . 94

Karachynska N., Lishchuk A.

Optimization of plant physiological status
as a basis for environmentally safe
agricultural production. 102

**Dubovyi V., Budak O.,
Kholodenko I., Liashynska O.**

The role of sewage sludge masses
in expanding the range
of organo-mineral fertilizers 113

**Ovcharuk O., Babii Ya.,
Ovcharuk V., Avetisian G.,
Tkach O., Kichigina O.**

Influence of soil temperature on the growth
and development of bean plants at different
sowing dates in the conditions of the Right-
Bank Forest-Steppe of Ukraine 120

Rules for authors. 129

ЦИРКУЛЯРНА ЕКОНОМІКА В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЛІСОРЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ

О. І. Дребот

доктор економічних наук, професор, академік НААН
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: drebotoksana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>

Є. В. Мішенін

доктор економічних наук, професор
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: eugeniy_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>

М. Х. Шершун

доктор економічних наук, професор
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: M.X.SHERSHUN@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-8949>

Л. І. Сахарнацька

кандидат економічних наук, доцент
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: liudmyla.sakharnatska@uzhnu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-4917>

О. І. Боцула

кандидат економічних наук, старший дослідник
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: botsulaiap@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-0102>

У статті сутнісно-змістовна основа циркулярної економіки розкривається через її центральну складову — біоекономіку, яка зосереджується переважно на відновлюваних ресурсах. Визначено, що багатофункціональність сировинних, побічних та екосистемних послуг лісових ресурсів, а також їхнє міжгалузеве значення формують основу біоекономіки та визначають необхідність комплексного використання лісоресурсного потенціалу. Стверджується, що принципова схема розвитку лісової біоекономіки може бути побудована на основі моделі EMF. Окреслено загальні та проектні завдання щодо комплексного використання лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки. Наголошується, що в умовах глобальних кліматичних змін стратегічною метою сталого розвитку циркулярної економіки в лісовому господарстві має стати збільшення потенціалу вуглецевого депонування. Розкрито основний зміст еколого-економічного механізму управління комплексним використанням лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки: сформовано поняття, визначено цільову функцію та основні завдання. Обґрунтовано, що в межах екосистемного менеджменту лісова біоекономіка повинна охоплювати стратегію розвитку екосистемних технологій для забезпечення комплексної, багатоцільової та інтегрованої реалізації екосистемних послуг лісів. Визначено основні організаційно-економічні аспекти стимулювання комплексного використання лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки.

Ключові слова: біоекономіка, еколого-економічні основи, побічне лісокористування, промислові відходи, фінансова політика, сталий розвиток, інноваційно-інвестиційний аспект, лісові ресурси.

ВСТУП

У межах методології та практик природокористування спостерігається зростаючий інтерес до концепції циркулярної економіки як до інструменту комплексного й ефективного використання природоресурсного потенціалу в кон-

тексті принципів сталого розвитку. У 2015 році Європейською комісією було прийнято послання до Європарламенту та Ради Європи “Замикання ланцюга — План дій ЄС щодо циркулярної економіки” [1], яке визначило нові завдання та програму дій у напрямі сталого розвитку.

Лісовий комплекс і лісогосподарювання найбільшою мірою відповідають концепції циркулярної економіки, зважаючи на можливість реалізації виробничих, організаційно-технологічних та еколого-економічних рішень, що дозволяють комплексно й “циркулярно” використовувати лісоресурсний потенціал. Йдеться насамперед про використання доступного обсягу сировинних функцій лісових ресурсів (деревини та її відходів, продуктів побічного лісокористування) та екосистемних послуг лісів. В умовах кліматичних та екологічних викликів суттєво зростає роль комплексного урахування та використання соціально-еколого-економічних функцій лісів у контексті сталого розвитку. Необхідність узгодження багатоцільового, інтегрованого та комплексного використання лісових ресурсів на різних ієрархічних рівнях просторового природокористування (глобальному, національному, регіональному, локальному) обумовлює нові вимоги до лісової економіки та політики [2].

Переорієнтація лісового комплексу та лісогосподарювання на принципи циркулярної економіки й біоекономіки, яка є її центральною складовою, вимагає розроблення нового теоретико-концептуального та методичного підходу до формування еколого-економічних механізмів управління сталим розвитком лісового комплексу в контексті багатоцільового, інтегрованого та комплексного використання лісоресурсного потенціалу. Отже, виникає завдання визначити сутнісно-змістовну основу, а також розкрити наявні принципи циркулярної економіки та біоекономіки в контексті розвитку еколого-економічного механізму комплексного використання лісоресурсного потенціалу.

Метою статті є визначення еколого-економічних та організаційно-технологічних особливостей (переваг, проблем, механізмів) розвитку циркулярної економіки в контексті комплексного використання лісоресурсного потенціалу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сутнісно-змістовна основа, принципи та особливості розвитку циркулярної економіки й біоекономіки в різних секторах господарювання досліджувалися в низці наукових працях як зарубіжних [3–6], так і вітчизняних учених [7–11]. Проведений аналіз засвідчив, що методологічні та організаційні аспекти розвитку циркулярної економіки, зокрема біоекономіки, потребують більш детального вивчення в контексті перспектив і механізмів реалізації ідеї “циркулярності” ресурсів у сфері лісогосподарювання та комплексного використання лісо-

ресурсного потенціалу. На сьогодні ці питання залишаються недостатньо розглянутими в наукових публікаціях і потребують подальших досліджень.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Методологія дослідження ґрунтується на діалектичному методі пізнання, а також системному та комплексному підході до вивчення розвитку циркулярної економіки в лісогосподарстві, зокрема в комплексному використанні лісоресурсного потенціалу.

Для досягнення поставленої мети та вирішення завдань дослідження використовувалися такі основні наукові методи: абстрактно-логічний — для формування основних теоретико-концептуальних, методичних і практичних положень щодо визначення еколого-економічних та організаційно-технологічних факторів (параметрів) циркулярної економіки, які впливають на результативність комплексного використання лісоресурсного потенціалу; системно-структурний — для виявлення ключових положень, що визначають біотехнологічну особливість використання лісоресурсного потенціалу; монографічний — для вивчення та узагальнення різноманітних принципів, факторів і процесів, що визначають особливості розвитку циркулярної економіки та біоекономіки як її центральної складової.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Циркулярна економіка, а її центральна складова — біоекономіка, зосереджуються переважно на відновлюваних ресурсах, що особливо актуально для лісових ресурсів.

Застосування інноваційно спрямованих біотехнологій передбачає усунення токсичних матеріалів, уникнення утворення відходів, комплексне та повторне використання природних ресурсів, виробництво “зеленої” енергії і зміну моделей виробництва, споживання та розподілу.

Циркулярна економіка характеризується розвитком як природної, так і соціальної складової, за якого відтворення різноманітних ресурсів, енергії та інформації в природно-господарчій системі здійснюється на високо-технологічних засадах завдяки багатократному використанню. Циркулярна (кругова, замкнута) еколого-економічна система є результатом застосування потоково-процесного підходу у виробництві та обороті матеріально-сировинних, енергетичних та інформаційних ресурсів у межах простору природного господарювання [2]. Зокрема, впровадження концепції цирку-

лярної економіки в лісопромисловому виробництві дозволить організувати багатократне каскадне використання деревної сировини завдяки впровадженню інноваційних технологій біорефайнінгу деревини.

У роботі [13] обґрунтовано та визначено, що циркулярна економіка є не тільки сферою, а й формою природно-суспільного розвитку, у якій на інноваційній основі забезпечується відтворення ресурсів, інформації та енергії, формуються та розвиваються механізми й інструменти їх повторного (циклічного) залучення до системи економічних відносин.

Спрощена концепція циркулярної економіки (економіки замкнутого циклу) описує цикл, що охоплює виробництво, споживання та повторне використання, ремонт чи утилізацію. До складніших схем належить модель, розроблена ЕМФ, у якій детально відображено такі принципи:

1) збереження та примноження природного капіталу через контроль за кінцевими запасами й координацію потоків відновлюваних ресурсів;

2) оптимізація використання ресурсів шляхом циркуляції продуктів, компонентів і матеріалів з максимальною корисністю;

3) підвищення ефективності системи через виявлення та виключення негативних зовнішніх чинників на стадії проектування [12].

Окреслені принципи можуть бути ефективно адаптовані до лісової циркулярної економіки та біоекономіки.

Концепція біоекономіки перебуває в центрі моделі економіки замкнутого циклу, яка передбачає оптимізацію процесів вилучення ресурсів у межах біологічних і технічних циклів. Термін “біоекономіка” означає виробництво і споживання товарів, послуг та енергії, в основі яких лежить використання біомаси. Біоекономіка охоплює такі сектори, як лісове господарство, виробництво целюлози та паперу, сільське господарство, рибне господарство та харчова промисловість. Концепція розвитку біоекономіки передбачає створення системи, у якій харчові продукти, сировина, хімічні речовини та енергія виробляються на основі відновлюваних біологічних ресурсів. Це дозволить економіці поступово відмовитися від використання викопних видів палива. На думку Продовольчої і сільськогосподарської організації Об'єднаних Націй (ФАО), біоекономіка, яка ґрунтується на стійкому та замкнутому циклі використання біологічних ресурсів і процесів, має величезний незатребуваний потенціал для пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до них [6].

Важливим напрямом розвитку циркулярної економіки та біоекономіки, як уже зазна-

чалось, є лісовий сектор, який охоплює лісове господарство, лісопромисловий комплекс та ліси (лісоресурсний потенціал), що визначають простір лісогосподарювання (лісоресурсний простір). Ключова роль лісової біоекономіки полягає у тому, що лісові екосистеми можуть одночасно функціонувати як засоби, предмети та продукти праці в різних секторах економіки. Багатофункціональність сировинних, побічних та екосистемних послуг лісових ресурсів, а також їхнє міжгалузеве значення формують опорний каркас біоекономіки. Важливо відзначити, що обсяг, ступінь та якість комплексного використання лісоресурсного потенціалу залежать від рівня розвитку продуктивних сил суспільства на інноваційній основі та його виробничих (організаційно-економічних) відносинах. Удосконалення техніки та технологій лісогосподарювання й комплексного використання лісоресурсного потенціалу на біотехнологічній основі, відповідних організаційно-економічних форм лісогосподарського виробництва створюють можливості для покращення регулювання використання, зростання та розвитку лісів, а також для більш повного використання лісоресурсного потенціалу та еколого-соціальних функцій лісових біогеоценозів. У цьому контексті застосування біотехнологій у лісовому секторі є необхідною умовою для сталого просторового розвитку лісогосподарювання на всіх рівнях господарювання: глобальному, національному, регіональному та локальному.

Концепція циркулярної економіки органічно поєднується з соціально-еколого-економічною парадигмою переходу господарських систем різного ієрархічного рівня від природокористування до природогосподарювання, оскільки вона зорієнтована не тільки на ресурсокористування, а більшою мірою на ресурсоформування та ресурсостворення. Така методологія природогосподарювання закладає методологічне підґрунтя менеджменту ресурсів, співмірного цілям і завданням “зеленої” економіки та сталого (збалансованого) розвитку.

Структурними елементами (напрямами) лісогосподарювання є:

- використання лісів за функціональним призначенням (багатоцільове, інтегральне лісокористування);
- освоєння лісоресурсного простору, лісоспоживання (сировинної продукції, продукції побічного лісокористування, екосистемних послуг);
- відтворення лісових ресурсів, лісоперетворення, лісооблаштування, збереження лісів, охорона лісів, захист лісів;
- інформаційна діяльність, інтелектуалізація, культурні та духовні процеси [14].

Лісова біоекономіка замкнутого циклу пов'язана з економічним оборотом різноманітної лісової продукції та екосистемних послуг лісів, інноваційними біотехнологіями та принципами сталого просторового лісогосподарювання, що базуються на комплексному, багатоцільовому та інтегрованому використанні економічних та еколого-соціальних функцій лісових ресурсів. В умовах глобальних кліматичних змін *стратегічною метою сталого розвитку циркулярної економіки в лісовому господарстві має стати збільшення потенціалу вуглецевого деponування*. Лісове господарство, з одного боку, є джерелом екологічно безпечної відтворюваної сировини — деревини та продуктів її переробки, а з іншого боку — виконує екосистемні функції та здатне забезпечувати деponування вуглецю у вигляді деревини. Важливо врахувати, що сировинні та екосистемні функції лісів взаємопов'язані, і підвищення продуктивності лісових біогеоценозів сприяє збільшенню сировинної продукції та посиленню екосистемних послуг.

У лісовому господарстві основними завданнями впровадження принципів циркулярної економіки в контексті комплексного використання лісоресурсного потенціалу є:

- оптимізація рівня використання відходів лісозаготівель і деревообробки з урахуванням їхньої екологічної та економічної цінності;
- використання місцевих видів палива (пелет, тріски);
- розширення альтернативного використання лісоресурсного потенціалу для отримання доданої вартості за умови збереження лісів (зокрема через використання рекреаційних та оздоровчих функцій тощо);
- використання лісових ресурсів для підвищення стійкості та продуктивності територіально-просторових екосистем, зокрема агролісових ландшафтів.

У лісоресурсних регіонах проєктні напрямки сталого розвитку лісового господарства необхідно пов'язувати з лісовою біоекономікою через такі біотехнології:

1. Біотехнології для управління лісовими насадженнями — використання ДНК-маркерів або молекулярно-генетичних маркерів для оцінки генетичних ресурсів основних лісоутворюючих порід у форматі моніторингових систем, а також контролю нелегальних рубок.

2. Біотехнології для збереження та відтворення лісових ресурсів.

3. Створення біотехнологічних форм дерев із заданими ознаками.

4. Застосування біологічних засобів захисту лісу.

5. Створення біотехнологічних комплексів для глибокої переробки лісової біомаси та утилізації відходів.

6. Розвиток біорефайнінга на основі застосування целюлози.

7. Дерев'яне домобудівництво.

8. Виробництво електроенергії та тепла з біомаси й енергетична утилізація відходів / залишків деревини [2].

Вирішення проєктних завдань щодо комплексного використання лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки потребує наявності відповідних еколого-економічних механізмів.

Еколого-економічний механізм управління комплексним використанням лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки трактується нами як цілісна та збалансована система форм, методів, інструментів і способів організаційно-економічного та соціального впливу на екологічно орієнтовану підприємницьку поведінку суб'єктів лісогосподарювання у напрямі підвищення еколого-економічної ефективності комплексного використання лісоресурсного потенціалу на основі застосування біотехнологій щодо сировинно-головних (деревина), сировинно-побічних (продукція побічного лісокористування, різноманітні відходи біомаси) та екосистемних функцій лісів переважно шляхом застосування мотиваційно-стимулюючих, компенсаційних підмеханізмів та економіко-правового механізму екологічної відповідальності. Цільова функція цього механізму полягає в узгодженні екологічних, еколого-економічних і соціальних інтересів усіх зацікавлених сторін, а також у вирішенні протиріч та конфліктів, що виникають у сфері комплексного використання лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки. Таким чином, забезпечується належний рівень екологізації лісогосподарювання та відтворення лісоресурсного потенціалу як специфічного соціально-еколого-економічного суспільного блага.

Основними завданнями еколого-економічного механізму управління комплексним використанням лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки є такі:

1. Забезпечення сталого (збалансованого) використання і відтворення лісоресурсного потенціалу на багатоцільовій та інтегрованій основі з урахуванням сучасних глобальних кліматичних й екологічних викликів, а також воєнного стану в Україні.

2. Забезпечення реалізації екологічно спрямованих біотехнологічних напрямів комплексного та збалансованого використання лісоресурсного потенціалу щодо продукції основного (деревинного) користування, продукції побічного

(недеревинного) користування та екосистемних послуг лісів.

3. Сприяння екологізації лісгосподарсько-го та лісопромислового виробництва.

4. Розвиток підприємницьких ініціатив щодо комплексного та збалансованого використання лісоресурсного потенціалу на інноваційно-інвестиційній основі.

На етапі розвитку екосистемного менеджменту у сфері лісгосподарювання необхідно оцінювати ефективність надання лісами екосистемних послуг. Лісова біоекономіка повинна передбачати стратегію розвитку екосистемних технологій для забезпечення багатоцільової та інтегрованої реалізації екосистемних послуг лісів:

- технології підвищення біорізноманіття лісових екосистем для забезпечення їхнього стійкого розвитку як основи ефективного функціонування лісової біоекономіки;
- технології посилення синергії між різноманітними екосистемними послугами;
- технології оцінки конфліктів і пошуку компромісів між екологічними та сировинними функціями лісових біогеоценозів у системі збалансованого просторового лісгосподарювання;
- технології територіально-просторового планування та зонування щодо відтворення і використання екосистемних послуг;
- методи вартісної оцінки біорізноманіття та екосистемних послуг лісів для забезпечення економічної оцінки територіального лісового капіталу.

Отже, лісова біоекономіка, як складова циркулярної економіки, поряд з активізацією розроблення різноманітних біопродуктів, повинна бути спрямована на подальшу ефективну реалізацію екосистемних послуг лісів.

Слід відзначити, що циркулярна економіка та її складова — біоекономіка — спрямовані на зменшення зниження лісоресурсного потенціалу, проявами якого є незворотні негативні зміни біорізноманіття унікальних лісових біогеоценозів, виснаження та втрата багатьох корисних властивостей природних екосистем лісу, зменшення обсягів поглибленої лісопереробки, а відтак і потенційних додаткових доходів лісокористувачів. Впровадження різноманітних біотехнологій потребує наявності стимулюючих механізмів еколого-економічного спрямування. У цьому контексті слід зауважити недосконалість існуючої системи мотивації лісокористувачів до збалансованого природогосподарювання і відсутність ринковоорієнтованого механізму стимулювання комплексного використання лісоресурсного потенціалу. Сьогодні держава та інші зацікавлені суб'єкти природокористуван-

ня використовують обмежений набір еколого-економічних стимулів, здебільшого фіскального характеру, що значно обмежує спектр їхніх можливостей не лише щодо підтримання стабільності роботи наявних виробництв, а й щодо розвитку нових напрямів комплексного використання лісоресурсного потенціалу. Низькою залишається інноваційно-інвестиційна привабливість лісгосподарських і лісопереробних об'єктів, зокрема тих, що перебувають у державній власності та на повному бюджетному утриманні, не створено належних стимулів для залучення зовнішніх інвестицій у розбудову лісгосподарської інфраструктури, необхідної для впровадження біотехнологій.

Отже, організаційно-економічний спектр проблем стимулювання розвитку лісових біотехнологій у контексті комплексного використання лісоресурсного потенціалу є надзвичайно багатоаспектним і потребує застосування інтегрованого еколого-економічного інструментарію.

ВИСНОВКИ

Циркулярна економіка та її складова — біоекономіка, зосереджуються переважно на відновлюваних ресурсах, зокрема лісових. Концепція біоекономіки є центральною в моделі економіки замкнутого циклу, яка передбачає оптимізацію процесів вилучення ресурсів у межах біологічних і технічних циклів.

Багатофункціональність сировинних, побічних та екосистемних послуг лісових ресурсів, а також їхнє міжгалузеве значення формують опорний каркас біоекономіки та визначають необхідність комплексного використання лісоресурсного потенціалу.

Принципова схема розвитку лісової біоекономіки економіки може бути побудована на основі моделі ЕМФ. В умовах глобальних кліматичних змін стратегічною метою сталого розвитку циркулярної економіки в лісовому господарстві має стати збільшення потенціалу вуглецевого депонування.

Вирішення загальних і проєктних завдань щодо комплексного використання лісоресурсного потенціалу на засадах біоекономіки потребує наявності відповідного еколого-економічного механізму.

Лісова біоекономіка повинна передбачати стратегію розвитку екосистемних технологій для забезпечення багатоцільової та інтегрованої реалізації екосистемних послуг лісів.

Процеси стимулювання розвитку лісових біотехнологій у контексті комплексного використання лісоресурсного потенціалу потребують застосування інтегрованого еколого-економічного інструментарію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Closing the Loop — an EU Action Plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF (accessed: 27.03. 2025).
2. Мішенін Є. В., Ярова І. Є., Жилінська О. І., Степаненко Є. С. Лісова біоекономіка в системі сталого просторового розвитку: глобальні та регіональні орієнтири. *Вісник СумДУ*. 2021. Вип. 2. С. 183–194. URL: https://visnyk.fem.sumdu.edu.ua/issues/2_2021/23.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
3. Böcher M., Tölle A., Perbandt D., Beer K. Research trends: Bioeconomy politics and governance. *Forest Policy and Economics*. 2020. Vol. 118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102219>
4. Biber-Freudenberger L., Basukala A. K., Bruckner M., Börner J. Sustainability Performance of National Bio-Economies. *Sustainability*. 2018. Vol. 10, iss. 8. 2705. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10082705> (accessed: 22.03.2025).
5. Renewable Carbon by nova-Institute. 2018. URL: http://bio-based.eu/?did=120804&vp_edd_act=show_download (accessed: 22.02.2025).
6. Развитие устойчивой биоэкономики замкнутого цикла посредством практики ведения сельского хозяйства в Восточной Европе и Центральной Азии. Будапешт: ФАО, 2024. 12 с. URL: <https://openknowledge.fao.org/items/84733256-4123-459d-a05a-197d36ac7411> (дата обращения: 22.02.2025).
7. Бутенко В. М. Основи формування організаційно-економічного механізму розвитку біоекономіки в Україні. *Економіка і суспільство*. 2018. Вип. 18. С. 107–114. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2018-18-16>
8. Мешко Н., Ніколаєнко А. Аналіз впливу екологізації бізнесу на засадах циркулярної економіки на сталий розвиток туризму країн Європи. *European Journal of Management Issues*. 2021. Т. 29, № 3. С. 162–170. DOI: <https://doi.org/10.15421/192116>
9. Нагара М. Б. Циркулярна економіка: генезис, структура, особливості. *Економіка та держава*. 2021. № 10. С. 68–73. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6806.2021.10.68>
10. Набока Р. Ю. Концептуальні засади державного регулювання розвитку циркулярної економіки в Україні. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. № 15. С. 136–139. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2021_15_22 (дата звернення: 10.03.2025).
11. Олешко А. А., Ольшанська О. В., Будякова О. Ю., Бебко С. В. Напрями розвитку біоекономіки в перспективі післявоєнного відновлення України. *Проблеми інноваційно-інвестиційного розвитку*. 2022. № 8. С. 18–28. URL: <https://stud.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/20333/3/2-18-28-28.pdf> (дата звернення: 22.02.2025).
12. Экономика замкнутого цикла и здоровье: возможности и риски. Копенгаген : Европейское региональное бюро ВОЗ, 2019. URL: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326859/9789289054300-rus.pdf> (дата обращения: 10.03.2025).
13. Мишенін Е. В., Коблянська І. І. Перспективи і механізми розвитку “циркулярної” економіки в глобальній середі. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2017. № 2. С. 329–343. DOI: <https://doi.org/10.21272/mmi.2017.2-31>
14. Ярова І. Є. Лісогосподарювання як нова соціо-еколого-економічна парадигма. *Механізм регулювання економіки*. 2013. № 2 (60). С. 45–52.

CIRCULAR ECONOMY IN THE CONTEXT OF THE ECOLOGICAL-ECONOMIC MECHANISM OF COMPREHENSIVE USE OF FOREST RESOURCE POTENTIAL

Drebot O.

Doctor of Economic Sciences, Professor, Academician of NAAS
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: drebotoksana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>

Mishenin Ye.

Doctor of Economic Sciences, Professor
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: eugeny_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>

Shershun M.

Doctor of Economic Sciences, Professor
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: M.X.SHERSHUN@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-8949>

Sakharnatska L.

Candidate of Economic Science, Associate Professor
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: ostapchik81@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-4917>

Botsula O.

Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: botsulaiap@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-0102>

The article reveals the essential and substantive basis of the circular economy through its central component, bioeconomy, which focuses mainly on renewable resources. It is determined that the multifunctionality of raw material, secondary and ecosystem services of forest resources, as well as their cross-sectoral significance, form the basis of the bioeconomy and determine the need for the integrated use of forest resource potential. It is argued that the principle scheme for the development of the forest bioeconomy can be built on the basis of the EMF model. General and project tasks for the integrated use of forest resource potential on the basis of bioeconomy are outlined. It is emphasized that in the context of global climate change, the strategic goal of sustainable development of the circular economy in forestry should be to increase the potential for carbon deposition. The main content of the ecological and economic mechanism for managing the integrated use of forest resource potential on the basis of bioeconomy is revealed: the concept is formed, the target function and main tasks are determined. It is substantiated that within the framework of ecosystem management, forest bioeconomy should encompass a strategy for the development of ecosystem technologies to ensure the comprehensive, multi-purpose and integrated implementation of forest ecosystem services. The main organizational and economic aspects of stimulating the integrated use of forest resource potential on the basis of bioeconomy are identified.

Keywords: bioeconomy, ecological and economic foundations, secondary forest use, industrial waste, fiscal policy, sustainable development, innovation and investment aspect, forest resources.

REFERENCES

1. European Commission. (2015). Closing the loop — An EU action plan for the circular economy: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF
2. Mishenin, Ye. V., Yarova, I. Ye., Zhylynska, O. I., & Stepanenko, Ye. S. (2021). Forest bioeconomy in the system of sustainable spatial development: global and regional orientations. *Bulletin of Sumy State University*, 2, 183–194. Retrieved from https://visnyk.fem.sumdu.edu.ua/issues/2_2021/23.pdf
3. Böcher M., Tölle A., Perbandt D., & Beer K. (2020). Research trends: Bioeconomy politics and governance. *Forest Policy and Economics*, 118. doi: 10.1016/j.forpol.2020.102219
4. Biber-Freudenberger, L., Basukala, A. K., Bruckner, M., & Börner, J. (2018). Sustainability performance of national bio-economies. *Sustainability*, 10(8), 2705. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2705>
5. Nova-Institute. (2018). Renewable Carbon. Retrieved from http://bio-based.eu/?did=120804&vp_edd_act=show_download
6. FAO. (2024). Development of sustainable circular bioeconomy through agricultural practices in Eastern Europe and Central Asia. Budapest: FAO. 12 p. Retrieved from <https://openknowledge.fao.org/items/84733256-4123-459d-a05a-197d36ac7411>
7. Butenko, V. M. (2018). The bases of formation of organizational-economic mechanism of development of the bioeconomy in Ukraine. *Economics and Society*, 18, 107–114. doi: 10.32782/2524-0072/2018-18-16
8. Meshko, N., & Nikolaienko, A. (2021). Analysis of the impact of business ecologization based on circular economy principles on sustainable tourism development in European countries. *European Journal of Management Issues*, 29(3), 162–170. doi: <https://doi.org/10.15421/192116>
9. Nahara, M. B. (2021). Circular economy: genesis, structure, features. *Economics and State*, 10, 68–73. doi: 10.32702/2306-6806.2021.10.68
10. Naboka, R. Yu. (2021). Conceptual framework of state regulation of the development of the circular economy in Ukraine. *Investments: Practice and Experience*, 15, 136–139. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2021_15_22
11. Oleshko, A. A., Olshanska, O. V., Budiakova, O. Yu., & Bebko, S. V. (2022). Directions of bioeconomy development in the perspective of postwar recovery of Ukraine. *Problems of Innovative and Investment Development*, 8, 18–28. Retrieved from <https://stud.knntd.edu.ua/bitstream/123456789/20333/3/2-18-28-28.pdf>
12. World Health Organization. (2019). Circular economy and health: Opportunities and risks. Copenhagen: WHO European Regional Office. Retrieved from <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/326859/9789289054300-rus.pdf>
13. Mishenin, Ye. V., & Koblianska, I. I. (2017). Perspectives and mechanisms of circular economy global development. *Marketing and Management of Innovations*, 2, 329–343. doi: 10.21272/mmi.2017.2-31
14. Yarova, I. Ye. (2013). Forest management as a new socio-ecological-economic paradigm. *Mechanism of Economic Regulation*, 2(60), 45–52.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ДРЕБОТ Оксана Іванівна — доктор економічних наук, професор, академік НААН, заслужений діяч науки і техніки України, директор, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: drebotoksana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>).

МІШЕНІН Євген Васильович — доктор економічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу економіки природокористування в агросфері, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: eugenyi_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>).

ШЕРШУН Микола Харитонович — доктор економічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу інституціонального забезпечення природокористування, Інститут агро-екології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: M.X.SHERSHUN@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9947-8949>).

САХАРНАЦЬКА Людмила Іванівна — кандидат економічних наук, доцент, старший науковий співробітник сектору розвитку сільських територій, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: ostapchik81@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5863-4917>).

БОЦУЛА Олександр Іванович — кандидат економічних наук, старший дослідник, завідувач відділу агроекології і біобезпеки, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: botsulaiap@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-0102>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

З березня 2025 року світ відзначатиме Всесвітній день дикої природи під гаслом “Фінансування охорони дикої природи: Інвестиції в людей та планету” — дату, проголошену ООН у 2013 році на знак підтримки Конвенції CITES про захист зникаючих видів. Для України цей день набуває особливого значення: за оновленими даними RDNA4, на відновлення екосистем після російської агресії потрібно понад 2,8 мільярда доларів протягом десяти років. Це нагадування світові, що збереження біорізноманіття — не добродіяльність, а критично важлива інвестиція в стабільне майбутнє.

АГРОЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАХИСТУ ЛІКАРСЬКИХ КУЛЬТУР ПРИ ВИРОЩУВАННІ ЇХ НА СІЛЬСЬКИХ СЕЛІТЕБНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Н. В. Палапа

доктор сільськогосподарських наук, професор

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: palapa60@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3748-6414>

Т. Л. Шевченко

кандидат сільськогосподарських наук

Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроекології
і природокористування НААН (с. Березоточа, Полтавська обл., Україна)
e-mail: tshevchenko367@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4248>

Є. В. Мішенін

доктор економічних наук, професор

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: eugeniy_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>

М. Я. Височанська

доктор економічних наук, старший дослідник

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: mariya_vysochanska@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2116-9991>

У статті наголошено, що вирощування лікарської сировини в Україні має важливе соціально-економічне значення в контексті збалансованого розвитку різних секторів економіки, насамперед сільськогосподарського рослинництва, а також покращення життєдіяльності сільського населення. Дослідження агроекологічних та економіко-технологічних особливостей застосування препаратів захисту рослин від шкідників і хвороб при вирощуванні лікарських культур на сільських селітебних територіях здійснено з позиції необхідності збільшення виробництва екологічно чистої лікарської рослинної сировини. Метою статті є розкриття змісту агроекологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей застосування хімічних і біологічних препаратів захисту рослин від шкідників та хвороб при вирощуванні лікарських культур на сільських селітебних територіях на прикладі конкретних приватних господарств. Методологія дослідження базується на системному та комплексному підході (зокрема на основі анкетування) до розкриття змісту агроекологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей застосування хімічних і біологічних препаратів захисту рослин від шкідників та хвороб при вирощуванні лікарських рослин на прикладі приватних господарств Лубенського району Полтавської області. Певний акцент зроблено на еколого-економічних особливостях застосування добрив. Проведений моніторинговий аналіз застосування мінеральних та органічних добрив показав, що в досліджуваних господарствах, які вирощують лікарські культури на постійній основі, здебільшого використовуються мінеральні добрива. Розкрито суть агроекологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей захисту лікарських рослин від шкідників і хвороб на основі застосування хімічних та біологічних препаратів, у тому числі народних методів боротьби. Окреслено необхідність здійснення екологічного контролю за внесенням добрив і засобів захисту рослин, а також розвитку механізму соціальної відповідальності за еколого-економічні ризики хімізації вирощування лікарських рослин у контексті забезпечення необхідної якості рослинної сировини та охорони навколишнього природного середовища.

Ключові слова: сільськогосподарські землі, екологічна якість, лікарське рослинництво, захист рослин, організаційно-технологічні особливості, приватні господарства, еколого-економічна ефективність, еколого-економічний механізм.

ВСТУП

Вирощування лікарської сировини в Україні має вагомe соціально-економічне значення в аспекті збалансованого розвитку різних

секторів економіки, насамперед сільськогосподарського рослинництва, а також покращення життєдіяльності сільського населення. Лікарські рослини використовують у фармацевтич-

ній і харчовій промисловості, парфумерії, тваринництві та інших галузях господарювання. Особливо активно їх застосовують у народній медицині. Так, згідно зі статистичними даними, з лікарських рослин виготовляють понад 40% усіх медикаментів, зокрема 75% ліків для лікування серцево-судинних захворювань, 60% кровоспинних і маткових лікувальних препаратів, 73% відхаркувальних, 72% антигельмінтних, 57% проносних засобів. І це далеко не повний перелік. Ветеринарна медицина застосовує майже 150 лікарських рослин, а в народній медицині для лікування людей використовують їх удвічі більше. Понад 30% усіх лікарських препаратів у тваринництві отримують з рослинної сировини, оскільки вона є джерелом вітамінно-мінерального комплексу та інших складових речовин [1].

На території України поширено близько 6 тисяч видів лікарських рослин, але більшість з них використовується тільки в народній медицині, тобто не має ринкового попиту ані для комерційної заготівлі, ані для промислового вирощування. Є лікарські рослини, попит на які порівняно невеликий: на рік по всій Україні їх заготовляють не більше 200–300 кг. Однак є 25–30 видів лікарських рослин, на які існує значний попит як серед вітчизняних, так і зарубіжних споживачів. Основними з них є: мак олійний, валеріана лікарська, беладона, м'ята перцева, алтея лікарська, марена красильна, подорожник великий, шавлія лікарська, чебрець звичайний, безсмертник піщаний (цмин), ромашка лікарська, ромашка далматська, календула тощо, які ринок вимагає в тоннах. Ці рослини затребувані як вітчизняною фармацією, так і зарубіжними споживачами. [2].

Вітчизняний ринок лікарських культур експерти оцінюють у 6 тис. т, тоді як світовий ринок становить не менше 600 тис. т. Протягом 2017–2019 років експорт лікарської сировини з України зріс на 35%, а виручка від поставок — більш ніж удвічі. Наразі Україна експортує втричі більше лікарських рослин, ніж споживає. У 2017 році Україна експортувала 3 731 т (на 8% більше порівняно з 2016 р.) на суму 197 млн грн; у 2018 році — 4 450 т (+ 19% порівняно з 2017 р.) на суму 334 млн грн (~12,4 млн дол.). У 2019 р. Україна експортувала приблизно 6000 т на суму 16 млн дол., що на 35% більше, ніж у 2018 р. 90% всього експорту лікарської рослинної сировини з України становлять дикороси. Органічна продукція майже не експортується. Середня вартість експортного кілограма з України — 2,79 дол., з Болгарії — 3,47 дол., з Польщі — 4,28 дол. При цьому обсяг споживання всередині України становить близько 1,5–2,0 тис. т [3].

Найважливішими чинниками, що впливають на результативність та ефективність вирощування сільськогосподарських культур (зокрема лікарських), є глобальні зміни клімату, ресурсний потенціал ґрунтів та еколого-економічні умови господарювання [4]. При виробництві лікарської рослинної сировини, особливо в промислових масштабах, важливе значення мають культури, стійкі до стресових умов вирощування (аномальних температур, зниженої відносної вологості повітря та ін.), які відрізняються високою продуктивністю та підвищеними якісними екологічними характеристиками сировини.

Як видно з вищенаведеного, вирощування лікарських культур останніми роками набуває дедалі більшої популярності як серед фермерських, так і серед приватних домашніх господарств. При вирощуванні лікарських культур на сільських селітебних територіях об'єктивно виникають питання щодо екологічно спрямованого їх захисту від шкідників і хвороб. Це, безумовно, актуалізує необхідність досліджень, пов'язаних з агроекологічними, організаційно-технологічними та економічними особливостями застосування препаратів захисту лікарських рослин при вирощуванні їх на сільських селітебних територіях. Важливо акцентувати увагу на тому, що застосування хімічних і біологічних препаратів захисту рослин може суттєво впливати на загальну та екологічну якість лікарської рослинної сировини.

Метою статті є розкриття змісту агро-екологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей застосування препаратів захисту рослин від шкідників і хвороб при вирощуванні лікарських культур на сільських селітебних територіях на прикладі конкретних приватних господарств.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Важливість дослідження агроекологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей застосування препаратів захисту рослин від шкідників і хвороб при вирощуванні лікарських культур на сільських селітебних територіях зумовлена певною мірою необхідністю збільшення виробництва екологічно чистої лікарської рослинної сировини.

Так, зокрема, Т. В. Мірзоева наголошує, що вітчизняний ринок лікарських рослин на сьогодні не насичений необхідною сировиною, а наявні виробництва не задовольняють попит. Вирішення нагальних агроекологічних, еколого-економічних та організаційних проблем у галузі лікарського рослинництва дасть змогу суттєво збільшити обсяги заготівлі лікарської сировини

та забезпечити нею вітчизняну фармацевтичну промисловість та інші галузі. При цьому актуалізується розвиток підприємницького фермерства щодо вирощування лікарських рослин на сільських селітебних територіях у межах приватних домашніх господарств [5].

У цьому контексті зроблено аналіз стратегій розвитку галузі лікарського рослинництва в Індії, Китаї, В'єтнамі та Таїланді. На основі цього аналізу окреслено низку організаційно-інституціональних та еколого-економічних інструментів, що можуть бути застосовані в Україні для розвитку лікарського рослинництва в повоєнний період [6].

У роботах [7–8] проаналізовано сучасний економічний стан виробництва лікарських рослин в Україні, встановлено низку чинників, які, з одного боку, стимулюють виробників до розвитку трав'яного агробізнесу (зокрема високий рівень рентабельності), з іншого — стримують розвиток ринку лікарської сировини (зокрема дорогий насіннєвий матеріал, спеціальна техніка та обладнання, ручна праця та ін.).

С. А. Сегеда запропонував та обґрунтував необхідність активізації виробництва альтернативних джерел палива, власного виробництва ефіроолійних і лікарських рослин, мінеральних добрив та засобів механізації. Автор зазначає, що зовнішньоекономічна діяльність охоплює також значні імпорتنі закупівлі фармацевтичної продукції та лікарських засобів, на які витрачаються великі обсяги валютних коштів. Їх виробництво в Україні можливе за умови відродження та модернізації галузей ефіроолійного та лікарського рослинництва [9].

В. В. Мойсієнко та О. П. Назарчук досліджували продуктивність ромашки лікарської залежно від удобрення та строків сівби в умовах змін клімату. Вони встановили, що рослини добре реагують на листкове підживлення азотом у дозі 10 кг/га. Застосування добрив підвищило урожайність готової лікарської сировини на 0,1–0,3 т/га. Було з'ясовано, що осінній посів цієї культури має значно вищі показники врожайності, ніж весняний, унаслідок чого культура має більший вегетаційний період, краще засвоює добрива в післяпосівний період, а на момент весняного відростання швидко нарощує масу та домінує над бур'янами [10].

Р. А. Вожегова, П. В. Лиховид та І. М. Біляєва проаналізували сучасний агроекологічний стан лікарського рослинництва в Україні. У роботі особливу увагу приділено видовому та сортовому складу лікарських культур. Встановлено недостатню забезпеченість лікарського рослинництва України як за видовим, так і за сортовим складом культур. Запропоновано перегляд районування сортів, включених до дер-

жавного реєстру, з урахуванням поточних агрокліматичних умов на території країни [11].

Важливе місце при вирощуванні лікарських культур займає їх захист від шкідників і хвороб. Система захисту лікарських культур від шкідників і хвороб передбачає насамперед дотримання комплексу заходів, спрямованих на профілактику. Суттєве значення має попередник, що запобігає накопиченню на полі шкідників і збудників захворювань тієї чи іншої лікарської культури. Вчасна боротьба з бур'янами теж потрібна, адже саме вони є резерватом більшості шкідливих видів комах і патогенних мікроорганізмів. Особливо важливий профілактичний захід — низьке скошування стерні багаторічних лікарських рослин (зокрема на насіннєвих ділянках валеріани, алтеї, вовчуга польового), видалення з плантації та спалення пожнивних решток [12]. На жаль, загальні фітосанітарні заходи не завжди вирішують ентомологічні та фітопатологічні проблеми. І тоді, як свідчить практика сільськогосподарського рослинництва, доводиться застосовувати більш дієві способи захисту у вигляді біологічних засобів, а в окремих випадках — і деяких хімічних, дозволених до використання на лікарських культурах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Загальна методологія нашого дослідження базується на діалектичному методі пізнання, системному й комплексному підході до вивчення агроекологічної, організаційно-технологічної та економічної проблеми захисту лікарських культур від шкідників і хвороб при вирощуванні їх на сільських селітебних територіях.

Для досягнення мети та вирішення поставлених завдань дослідження використовували такі наукові методи: *абстрактно-логічний* — для формування основних науково-методичних і практичних положень щодо визначення агроекологічних та економіко-технологічних факторів, які впливають на результативність хімічного й біологічного захисту лікарських культур на сільських селітебних територіях у межах приватних домашніх господарств; *системно-структурний* — для встановлення основних положень, які визначають агроекологічну, еколого-економічну та технологічну основу структурної організації хімічного й біологічного захисту лікарських культур; *розрахунковий і порівняльний* — для оцінки системи результативних показників захисту лікарських культур у межах досліджуваних господарств; *монографічний* — для узагальнення різноманітних факторів і процесів, що визначають агроекологічну та еколого-економічну результативність й

ефективність хімічного та біологічного захисту лікарських культур на сільських селітебних територіях.

Інститутом агроекології і природокористування НААН та Дослідною станцією лікарських рослин ІАП НААН проводились агроекологічні дослідження щодо вирощування лікарських рослин на сільських селітебних територіях у населених пунктах Березоточа, Литвяки та Вовчик Лубенського району Полтавської області.

Як відомо, умови сільських селітебних територій відрізняються значною неоднорідністю. Для забезпечення достовірності результатів дослідження в межах обраних сільських населених пунктів було виділено 4 категорії репрезентативних господарств, а саме:

- I категорія — вирощування однорічних лікарських культур на присадибних ділянках;
- II категорія — вирощування багаторічників на присадибних ділянках;
- III категорія — вирощування однорічних лікарських культур на орендованих землях;
- IV категорія — вирощування багаторічників на орендованих землях.

При зборі агроекологічної інформації про особливості захисту лікарських культур від шкідників і хвороб при вирощуванні їх на сільських селітебних територіях було розроблено анкету, згідно з якою проведено анкетування господарів приватних господарств у межах виділених сільських населених пунктів. Основними питаннями анкети були: перелік лікарських рослин, які вирощуються і для яких цілей; площі земельних наділів; витрати на мінеральні та органічні добрива, а також захист лікарських культур від шкідників і хвороб; інша важлива агроекологічна та організаційно-технологічна інформація для встановлення відповідності процесів вирощування вимогам належної екологічно орієнтованої господарської практики.

Так, варто зауважити, що основний обробіток ґрунту — оранка, яка майже в усіх господарствах проводилася за допомогою найманої техніки. Усі господарства мали необхідний інвентар для догляду за посівами. Догляд за посівами господарі здійснювали самотужки, а процес збирання, сушіння та дробки сировини проводився на засадах сімейного підраду.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В основу визначення оптимальної структури сільськогосподарських земель на сільських селітебних територіях покладені принципи екологічної і економічної доцільності та максимального використання ґрунтово-кліматичних чинників. Оптимізація структури посівних площ

є основним, найбільш дешевим та екологічним засобом підвищення продуктивності агроєкосистем. Правильно сформувавши перелік вирощуваних у господарстві культур, які мають різні фітосанітарні та ґрунтозахисні властивості, можна регулювати процеси поширення фітопатогенів, шкідників і бур'янів, позитивно впливати на продуктивність і родючість ґрунту, створювати найбільш раціональну для конкретних умов структуру посівних площ, направлену на всебічне використання потенціалу ґрунту та рослин.

Загальні агроекологічні та організаційно-технологічні особливості вирощування лікарських культур. Одним зі способів ефективного і раціонального використання сільськогосподарських земель на селітебних територіях є вирощування не лише овочевої та зернової продукції, а й перехід до їх комплексного використання, залучивши в сівозміни багаторічні рослини, зокрема лікарські культури. Необхідно зазначити, що проблемою багатьох фармацевтичних підприємств, які працюють у сфері виробництва лікарських препаратів рослинного походження, є гарантії якості сировини, виробленої в умовах особистих селянських господарств. Тому кожен етап виробництва потрібно аналізувати та контролювати з метою ідентифікації потенційних еколого-економічних ризиків.

Нові методи вирощування, технології переробки лікарської сировини не повинні порушувати лікувальні властивості, а кінцевий продукт має відповідати загальним та екологічним параметрам, дотримання яких є обов'язковим. Якість фармацевтичної сировини залежить не лише від генетично обумовлених особливостей рослини, а й від комплексу факторів навколишнього середовища, що сформовані людиною працею і природними умовами, а також від реакцій рослинного організму на зовнішні подразники. Тому вирощування лікарських рослин — тривалий і складний процес, пов'язаний із різними екологічними чинниками зовнішнього середовища, які постійно змінюються, є важко прогнозованими та часто нерегульованими.

Крім того, при вирощуванні лікарської рослинної сировини середній і дрібнотоварний виробники стикаються з відсутністю стандартизованих підходів щодо вирощування сировини високої якості в умовах особистих домашніх господарств, пов'язаних з удобренням ґрунту, захистом рослин, первинною дробкою сировини, та забезпечення відповідних умов зберігання фармацевтичної сировини. Усе це суттєво впливає на прибуток домашніх господарств і певною мірою знижує привабливість лікарського рослинництва.

При виборі сільськогосподарських культур та їх чергуванні необхідно враховувати екологічні особливості ґрунтів і специфіку рельєфу селітебних територій. Тому актуальною залишається проблема раціонального розміщення культур у невеликих за площею господарствах. Сьогодні сівозміна є основою будь-якої системи землеробства, в оцінці ролі якої лежать такі критерії, як: регулювання режиму органічної речовини ґрунту і мінеральних елементів живлення; підтримка задовільного структурного стану ґрунту; регулювання водного балансу агроценозів; запобігання процесам ерозії та вивітрювання; зменшення засміченості посівів; регулювання фітосанітарного стану ґрунту.

Встановлено, що в приватних господарствах, які мають не одну земельну ділянку, господарі застосовують сівозміни. А переважна більшість господарств, які вирощують лікарську рослину сировину, використовуює насіння та садивний матеріал власної репродукції, що, своєю чергою, впливає як на якість сировини, так і на її асортимент. Серед причин такого явища називають високу вартість посівного та садивного матеріалу з достовірним походженням, відсутність достатньої кількості пропозицій насінневого й садивного матеріалу тощо.

Добрива. Серед проблем, які стримують вирощування лікарських рослин у межах сільських селітебних територій, вказують на деградацію ґрунту під посівами багаторічників та особливий контроль споживачів фітосировини щодо норм внесення добрив. Проте внесення добрив у рекомендованих нормах і підживлення під час вегетації позитивно впливають на імунітет рослин, покращують умови їхнього росту й розвитку. Усе це підвищує стійкість рослин до пошкоджень шкідниками та уражень захворюваннями.

Серед господарів репрезентативних господарств, у межах земельних ділянок яких вирощуються лікарські культури на постійній основі, регулярно проводилося анкетування щодо застосування мінеральних та органічних добрив, засобів захисту від бур'янів, шкідників і хвороб. За опрацьованими результатами анкетування було встановлено, що в 5 господарствах, де вирощуються однорічні та багаторічні лікарські культури, на присадибних ділянках вносили органічні добрива, отримані переважно в межах власних господарств (компост, гній, перегній у нормі 30–35 ц/га), що суттєво зменшувало витрати. У рослин, які культивувалися без внесення органічних добрив спостерігалось уповільнення росту, що в кінцевому підсумку вплинуло на обсяги сировинної продукції при зборі врожаю, які знизилися майже на 40% порівняно з удобреними площами. Крім того,

серед загальної кількості господарств, де вирощувалися однорічні і багаторічні лікарські культури, маємо такі дані: 15% господарств вносили органічні, 38% — мінеральні добрива (аміачна селітра, нітроамофоска, нітроамофос) тощо. Активніше почали застосовувати підживлення рослин під час вегетації комплексними мінеральними та органо-мінеральними добривами.

Захист рослин. Захист рослин під час росту та розвитку лікарських видів — одна з нагальних проблем вирощування екологічно чистої фармацевтичної сировини на сільських селітебних територіях. Важливо зазначити, що препарати, дозволені для овочевих культур, не завжди є допустимими для застосування при вирощуванні лікарських рослин.

У чотирьох господарствах II-ї категорії (вирощування багаторічників на присадибних ділянках) с. Вовчик та у двох господарствах с. Березоточа, де вирощувалася алтея лікарська, під час моніторингу посівних площ лікарських рослин у межах репрезентативних господарств було зафіксовано пошкодження рослин такими шкідниками, як алтейна попелиця та мальвовий жук. На присадибній ділянці с. Вовчик на посівах м'яти перцевої виявлено передпорогову чисельність м'ятної попелиці та м'ятного листюїда. На орендованих землях IV-ї категорії с. Березоточа на ділянках з ехінацеєю пурпурою було зафіксовано ушкодження цикадами. Кількість усіх виявлених шкідників не перевищувала порогу шкідливості, проте при вирощуванні багаторічників їхня чисельність у подальшому може збільшитися.

Було також виявлено, що в чотирьох господарствах II-ї категорії (вирощування багаторічників на присадибних ділянках) в с. Вовчик, де вирощуються алтея лікарська та ехінацея лікарська, використовували протизлакові гербіциди “Галера Супер” і “Гезагарт”, які не є рекомендованими для застосування на лікарських культурах. Тому були надані роз'яснення та рекомендації господарям щодо правильного застосування засобів захисту на присадибних ділянках та орендованих землях.

З'ясовано, що в господарствах застосовуються не лише хімічні засоби захисту рослин, а й інші засоби, зокрема, у числі заходів, що забезпечують збереження та підвищення врожаю лікарських культур, важливе місце займає захист посівів від шкідників і хвороб із застосуванням біопрепаратів, а також народних традиційних засобів. Для захисту рослин від шкідників і хвороб у господарствах широко застосовуються біопрепарати різнопланової дії: інсектициди, фунгіциди та про-

труювачі. Встановлено, що близько 80% господарств II-ї категорії, де вирощується алтея лікарська, використовували новий системно-контактний інсектицид “Енжіо”, який містить дві діючі речовини, має широкий спектр дії проти шкідників на різних стадіях їхнього розвитку та побічну дію на дорослі стадії кліщів. На відміну від інших інсектицидів, препарат ефективно діє за підвищених і низьких температур повітря та посушливих умов, що, за відгуками господарів, має відчутний прояв на ділянках. Але, відповідно до діючих речовин, цей препарат не рекомендовано застосовувати на посівах лікарських культур. Власникам було доведено, що якщо препарат використовувався на багаторічних видах, то такі посіви можуть бути використані для одержання насіння в поточному році, а сировину можна збирати лише наступного року.

Рідше господарі використовували препарати “Актара”, “Фастак” та “Актеллік”, які діють проти комплексу шкідників. Переважна більшість опитаних знає, що “Актеллік” дозволений для використання на лікарських рослинах у рекомендованих виробником дозах.

Встановлено, що на присадибних ділянках у господарствах II-ї категорії с. Вовчик посіви ехінацеї пурпурової обробляли фунгіцидом широкого спектру дії — “Квадріс”, який використовують для захисту від борошнистої роси, фітофторозу, макроспоріозу, несправжньої борошнистої роси, плямистості. Не так часто застосовували препарати “Мікосан В” “Альто Супер”, “Квадріс Топ” та інші.

На присадибних ділянках I-ї категорії с. Березоточа на посівах нагідок лікарських використовували стимулятор росту “Оксігумат”, який прискорює дозрівання рослини та підвищує їхню поживну цінність. Встановлено, що після застосування препарату рослини на 15–20% краще розвиваються порівняно з необробленими.

Відповідно до настанови ВООЗ з належної практики вирощування та збору лікарських рослин зазначається, що застосування будь-яких агрохімічних речовин, призначених для сприяння зростанню або захисту лікарських рослин, має бути зведене до мінімуму; їх слід використовувати лише за відсутності альтернативних методів. Де це можливо, треба застосовувати комплексну боротьбу зі шкідниками. За необхідності можна використовувати виключно схвалені пестициди та гербіциди, але на мінімально ефективному рівні, відповідно до маркування та/або інструкції-вкладиша певного продукту, а також регуляторних вимог, що висуваються країною вирощування та країною кінцевого споживання.

Під час використання пестицидів і гербіцидів повинен бути задіяний лише кваліфікований персонал, озброєний офіційно затвердженим для застосування обладнанням. Усі процедури повинні бути відповідним чином задокументовані. Мінімальний інтервал часу між такими процедурами та збиранням врожаю має співпадати зі вказаним на маркуванні та/або в інструкції-вкладиші до продукту рослинного захисту. До того ж ці процедури варто здійснювати після консультацій та узгодження з покупцем лікарської рослинної сировини. Виробники лікарської сировини зобов'язані забезпечувати максимально низький граничний рівень домішок пестицидів і гербіцидів, що вимагають місцеві, регіональні та/або національні регуляторні органи як країн та/або регіонів вирощування, так і країн та/або регіонів кінцевого споживання. При застосуванні пестицидів і гербіцидів слід також звірятися з такими міжнародними угодами, як Міжнародна конвенція захисту рослин (англ. *International Plant Protection Convention*) та Кодекс Аліментаріус (англ. *Codex Alimentarius*). У цьому аспекті важливо акцентувати увагу на необхідності формування та розвитку системи соціальної відповідальності за еколого-економічні ризики застосування хімічних засобів при вирощуванні лікарських рослин, щоб забезпечити необхідну якість рослинної сировини, а також охорону довкілля [13–15].

Рекомендації щодо застосування та приготування відварів і настоїв. Відповідно до зібраної інформації під час анкетування, надано рекомендації щодо застосування на присадибних ділянках та орендованих землях народних засобів захисту і профілактики пошкоджень та уражень лікарських рослин. Це переважно настої та відвари, виготовлені з диких і культурних рослин, що мають інсектицидні властивості. Ці препарати є менш ефективними, ніж хімічні засоби, тому їх доцільно застосовувати при невисокій чисельності шкідників і для профілактики хвороб. Основна перевага засобів захисту рослинного походження полягає в тому, що в рекомендованих концентраціях вони екологічно безпечні для людей, тварин, особливо комах-запилювачів, а також для навколишнього природного середовища. Їхні токсичні властивості на відкритому повітрі зберігаються порівняно недовго. Крім того, рослинні препарати захисту рослин можна використовувати на пізніших строках вегетації рослин (перед збиранням врожаю) порівняно з хімічними засобами, які мають пролонговану дію. Відомості про екологічну ефективність настоїв і відварів із рослин децю суперечливі та ґрунтуються, зокрема, на досвіді й спостереженнях садоводів-аматорів. Настої та

відвари більш ефективні проти сисних шкідників, зокрема попелиці й гусениць на початкових фазах розвитку, та багатьох інших шкідливих фітофагів. Найбільш вживаними для таких цілей рослинами є перець стручковий чи гіркий, часник, полин, надземна частина картоплі та томатів, тютюн, махорка, хвоя сосни і ялини, щавель, коноплі, чистотіл, пижмо, чорнобривці, цибуля, гірчиця та інші. Норми витрати настоїв і відварів домашнього приготування встановлюють з орієнтовного розрахунку 600–1000 л/га і збирати лікарську сировину можна через 1–5 днів. Якщо ж для приготування засобів захисту були використані відвари чи настої отруйних рослин, таких як тютюн, махорка, дурман чи інші, то збір лікарських рослин варто відкласти на 15 днів. Для закріплення ефекту від використання відварів і настоїв обробку необхідно проводити 2–3 рази, а за необхідності — до 4–5 разів. Серед недоліків рослинних препаратів найчастіше згадують, що настої та відвари швидко псуються при зберіганні. Рекомендується готувати більш концентровані відвари та настої і перед використанням розбавляти їх водою до необхідної концентрації. Економічні переваги в застосуванні рослинних препаратів домашнього приготування полягають у тому, що процес їх приготування є маловитратним і доступним.

Таким чином, можна констатувати, що застосування комплексної екологічно спрямованої системи добрив і засобів захисту при вирощуванні лікарських рослин в умовах домашніх господарств впливає на собівартість їхнього вирощування, врожайність, що, своєю чергою, визначає обсяги реалізації рослинної сировини. Необхідно акцентувати увагу на проведенні екологічного контролю за внесенням добрив при вирощуванні лікарських рослин на сільських селітебних територіях.

Останніми роками в органічному землеробстві та захисті рослин розвивається напрям, що базується на створенні сприятливих умов для місцевих ентомофагів (хижих і паразитарних комах). Для збільшення чисельності, довговічності та плодючості корисних комах — жужелиць, сонечок, джмелів, бджіл тощо, варто на ділянці збільшувати кількість рослин-нектароносів — фенхелю, анісу, фацелії, нектар яких приваблює корисних комах, що знищують шкідників. Ефективним є і заселення посівів лікарських рослин трихограмою.

Не менш ефективним є й інший напрям, за якого шкідливі комахи дезорієнтуються або відлякуються. Кожен вид рослин має свій характерний запах, який приваблює комах-фітофагів. Якщо поряд з рослинами зі слабким запахом ростуть рослини з сильним запахом, це дезорієнтує комах-шкідників. Тому

на ділянках, де вирощується декілька видів лікарських рослин, що мають сильний запах, чисельність шкідливих комах завжди нижча, і шкоди вони завдають менше, ніж на ділянках, де вирощується лише один вид. Так, на ділянках, заселених ґрунтовими нематодами, варто додатково висівати чорнобривці та нагідки, які звільняють ґрунт від небезпечних шкідників. За спостереженнями господарів, нагідки також забезпечують захист від кліщів, фузаріозу, бактеріозу, корневих гнилей і відлякують багатьох сисних комах, зокрема блішку хрестоцвітних.

ВИСНОВКИ

Вирощування лікарських культур у фермерських і домашніх господарствах на сільських селітебних територіях має достатньо вагоме соціально-економічне значення для різних секторів економіки, а також для населення, яке там проживає, передусім з погляду його зайнятості. Таке підприємницьке виробництво лікарської рослинної сировини потребує ретельного урахування агроекологічних, організаційно-технологічних та економічних особливостей вирощування лікарських культур на різних етапах цього процесу. Визначальним етапом забезпечення загальної та екологічної якості лікарської рослинної сировини є процес застосування комплексної екологічно спрямованої системи добрив і засобів захисту рослин.

Проведений моніторинговий аналіз застосування мінеральних та органічних добрив показав, що в досліджуваних господарствах, які вирощують лікарські культури на постійній основі, переважно використовуються мінеральні добрива. Основну увагу було приділено агро-екологічним, організаційно-технологічним та економічним особливостям захисту лікарських рослин від шкідників і хвороб, оскільки це має суттєвий вплив на екологічну якість сировини. Під час дослідження надавались рекомендації щодо заміни хімікатів на народні методи боротьби з хворобами рослин і шкідниками.

Застосування комплексної екологічно спрямованої системи добрив і захисту рослин в умовах приватних та домашніх господарств впливає на собівартість вирощування лікарських рослин, їхню врожайність і визначає обсяги реалізації рослинної сировини. Зроблено акцент на необхідності проведення екологічного контролю за внесенням добрив і засобів захисту рослин. Потрібно формувати та розвивати механізми соціальної відповідальності за еколого-економічні ризики хімізації вирощування лікарських рослин у контексті забезпечення необхідної якості рослинної сировини, а також охорони навколишнього природного середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Крижак Л. М., Гуцол Н. В., Мисенко О. О. Використання лікарських рослин в якості біологічно активних добавок у тваринництві. *Корми і кормовиробництво*. 2020. Вип. 90. С. 134–144. DOI: <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnystvo202090-12>
2. Заробити на траві. Чому м'яту вирощувати вигідніше, ніж пшеницю. *UkrLandFarming*. 2019. 4 бер. Вип. 8. URL: <https://www.ulf.com.ua/ua/press-centre/press-about-us/ukraine-agricultural/04031903/> (дата звернення: 21.04.2025).
3. Гаврилюк А. Експорт лікарських рослин з України зріс на 35%. *AgroTimes*. 2020. 14 груд. URL: <https://agrotimes.ua/agromarket/eksport-likarskyh-roslyn-z-ukrayiny-zris-na-35/> (дата звернення: 21.04.2025).
4. Ушкаренко В. О., Чабан В. О., Чабан О. В. Аналіз формування урожаю та ефірної олії на посівах шавлії мускатної в умовах Півдня України. *Агробіологія*. 2019. № 1. С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2019-146-1-38-46>
5. Мірзоева Т. В. Особливості вітчизняного ринку лікарських рослин в умовах сьогодення. *Інноваційна економіка*. 2013. № 6. С. 209–212. http://nbuv.gov.ua/UJRN/inek_2013_6_51 (дата звернення: 24.04.2025).
6. Мірзоева Т. В. Аналітична оцінка стратегій розвитку лікарського рослинництва. *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 48. С. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-28>
7. Бойко Л. О. Економічна ефективність виробництва лікарських рослин та перспективи трав'яного бізнесу. *Таврійський науковий вісник. Серія : Економіка*. 2021. № 9. С. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.32851/2708-0366/2021.9.2>
8. Федько Р. М., Шевченко Т. Л., Калініна М. А., Федько Л. А. Вирощування лікарських рослин на сільських селітебних територіях: переваги та проблеми. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 7. С. 68–74. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovistnyk201907-10>
9. Сегеда С. А. Аналіз і оцінка тенденцій та структури імпорту засобів виробництва аграрного сектору економіки. *Агросвіт*. 2020. № 3. С. 27–37. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.3.27>
10. Мойсієнко В. В., Назарчук О. П. Урожайність ромашки лікарської залежно від строків сівби та удобрення в умовах змін клімату. *Наукові горизонти*. 2019. № 2 (75). С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.332491/2663-2144-2019-75-2-3-12>
11. Вожегова Р. А., Лиховид П. В., Біляєва І. М. Сучасний стан, перспективи та напрями розвитку виробництва лікарських рослин в Україні. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 118. С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2021.118.7>
12. Фокін А. Біологічний захист лікарських культур. *Пропозиція*. 2008. 1 жовт. URL: <https://propozitsiya.com/articles/tekhnolohiyi-vyroschchuvannya/biolohichnyy-zakhyst-likarskykh-kultur/> (дата звернення: 07.05.2025).
13. Мішенін Є. В., Ярова І. Є. Еколого-економічна та соціальна відповідальність в управлінні сільськогосподарським землекористуванням. *Детермінанти соціально-економічного розвитку підприємств : монографія*. Вип. 3 / за наук. ред. Н. І. Строченко, В. В. Пилипенка, О. М. Ковальової. Суми : СНАУ, 2016. С. 99–109. https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/5270/1/_2016_2.pdf (дата звернення: 07.05.2025).
14. Мішенін Є. В., Височанська М. Я., Палапа Н. В. та ін. Сучасний стан і стратегічні орієнтири повоєнного розвитку ринку лікарських рослин: еколого-економічний аспект. *Збалансоване природокористування*. 2025. № 1. С. 14–24. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.324374>
15. Палапа Н. В., Шевченко Т. Л., Мішенін Є. В., Височанська М. Я. Еколого-економічні та організаційно-технологічні особливості вирощування лікарських рослин на сільських селітебних територіях. *Агросвіт*. № 10. 2025. С. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.10.33>

AGROECOLOGICAL AND ECONOMIC-TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MEDICINAL PLANT PROTECTION IN THE CULTIVATION OF MEDICINAL CROPS IN RURAL SETTLEMENTS

Palapa N.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: palapa.60@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3748-6414>

Shevchenko T.

Candidate of Agricultural Sciences

Research Station of Medicinal Plants

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

e-mail: tshevchenko367@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4248>

Mishenin Ye.

Doctor of Economic Sciences, Professor

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: eugeniya_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>

Vysochanska M.

Doctor of Economic Sciences, Senior Research Fellow

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: mariya_vysochanska@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2116-9991>

The article emphasizes that the cultivation of medicinal raw materials in Ukraine has a fairly significant socio-economic significance in the context of the balanced development of various sectors of the economy and, above all, agricultural crop production, as well as improving the livelihoods of the rural population. The study of agroecological, economic and technological features of the use of plant protection products against pests and diseases when growing medicinal crops in rural residential areas was carried out from the perspective of the need to increase the production of environmentally friendly medicinal plant raw materials. The aim of the article is to reveal the content of agroecological, organizational, technological and economic features of the use of chemical and biological plant protection products against pests and diseases when growing medicinal crops in rural residential areas using the example of specific private farms. The research methodology is based on a systematic and comprehensive approach (in particular, based on a questionnaire) to revealing the content of agroecological, organizational-technological and economic features of the use of chemical and biological preparations for plant protection from pests and diseases when growing medicinal plants on the example of private farms in the Lubny district of Poltava region. A certain emphasis is placed on the ecological and economic features of the use of fertilizers. The monitoring analysis of the use of mineral and organic fertilizers showed that the studied farms that grow medicinal crops on a permanent basis use mineral fertilizers in the vast majority. The content of agroecological, organizational-technological and economic features of the protection of medicinal plants from pests and diseases based on the use of chemical and biological preparations, including folk methods of control, is revealed. The need for environmental control over the application of fertilizers and plant protection products, as well as the development of a mechanism of social responsibility for the environmental and economic risks of chemicalization of medicinal plant cultivation in the context of ensuring the required quality of plant raw materials, as well as environmental protection, is outlined.

Keywords: agricultural land, ecological quality, medicinal plant production, plant protection, organizational and technological features, private farms, ecological and economic efficiency, ecological and economic mechanism.

REFERENCES

1. Kryzhak, L. M., Hutsol, N. V., & Mysenko, O. O. (2020). The use of medicinal plants as biologically active additives in livestock production. *Feeds and Feed Production*, 90, 134–144. doi: 10.31073/kormovyrobnytstvo202090-12
2. Make money on grass. Why growing mint is more profitable than wheat. (2019, March 4). *UkrLandFarming*, 8. Retrieved from <https://www.ulf.com.ua/ua/press-centre/press-about-us/ukraine-agricultural/04031903/>
3. Havryliuk, A. (2020, December 14). Exports of medicinal plants from Ukraine increased by 35%. *AgroTimes*. Retrieved from <https://agrotimes.ua/agromarket/eksport-likarskyh-roslyn-z-ukrayiny-zris-na-35/>
4. Ushkarenko, V. O., Chaban, V. O., & Chaban, O. V. (2019). Analysis of yield and essential oils formation on clary sowings in the conditions of the south of Ukraine. *Agrobiology*, 1, 38–46. doi: 10.33245/2310-9270-2019-146-1-38-46
5. Mirzoieva, T. V. (2013). Peculiarities of the domestic market of medicinal plants in the conditions of the agreement. *Innovative economy*, 6, 209–212. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/inek_2013_6_51
6. Mirzoieva, T. V. (2023). Analytical assessment of medicinal plant development strategies. *Economy and society*, 48, 1–7. doi: 10.32782/2524-0072/2023-48-28
7. Boiko, L. O. (2021). Economic efficiency of the production of medicinal plants and prospects of herb business. *Tavria Scientific Bulletin. Series: Economics*, 9, 17–25. doi: 10.32851/2708-0366/2021.9.2
8. Fedko, R. M., Shevchenko, T. L., Kalinina, M. A., & Fedko, L. A. (2019). Cultivation of medicinal plants in rural residential areas: advantages and problems. *Bulletin of Agricultural Science*, 7, 68–74. doi: 10.31073/agrovisnyk201907-10
9. Sehed, S. A. (2020). Analysis and evaluation of trends and structures imports of agricultural economy production products. *Agrosvit*, 3, 27–37. doi: 10.32702/2306-6792.2020.3.27
10. Moisiienko, V. V., & Nazarchyk, O. P. (2019). Yield of chamomile medicinal depending on sowing date and fertilizing in terms of climate change. *Scientific Horizons*, 2(75), 3–12. doi: 10.48077/2663-2144-2019-75-2-3-12
11. Vozhehova, R. A., Lykhovyd, P. V., & Biliaieva, I. M. (2021). Current state, prospects and directions of the development of medicinal plant growing in Ukraine. *Tavria Scientific Bulletin*, 118, 57–66. doi: 10.32851/2226-0099.2021.118.7
12. Fokin, A. (2008, October 1). Biological protection of medicinal crops. (2008). *Propozitsiya*. Retrieved from <https://propozitsiya.com/articles/tekhnohii-vyroshchuvannya-biologichnyy-zakhyst-likarskykh-kultur/>
13. Mishenin, Ye. V., & Yarova, I. Ye. (2016). Ecological-economic and social responsibility in agricultural land use management. In N. I. Strochenko, V. V. Pylypenko, & O. M. Kovaliova (Eds.). *Determinants of socio-economic development of enterprises* (Vol. 3, pp. 99–109). Sumy: Sumy National Agrarian University. Retrieved from https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/5270/1/_2016_2.pdf
14. Mishenin, Ye. V., Vysochanska, M. Ya., Palapa, N. V., Zinovchuk, N. V., & Bendasiuk, O. O. (2025). The current state and strategic guidelines for the post-war development of the medicinal plant market: ecological and economic aspect. *Balanced nature using*, 1, 14–24. doi: 10.33730/2310-4678.1.2025.324374
15. Palapa, N. V., Shevchenko, T. L., Mishenin, Ye. V., & Vysochanska, M. Ya. (2025). Ecological-economic and organizational-technological features of growing medicinal plants in rural settlement areas. *Agrosvit*, 10, 33–41. doi: 10.32702/2306-6792.2025.10.33

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ПАЛАПА Надія Василівна — доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач сектору розвитку сільських територій, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: palapa60@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3748-6414>).

ШЕВЧЕНКО Тетяна Леонідівна — кандидат сільськогосподарських наук, заступник директора з наукової роботи, Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроекології і природокористування НААН (вул. Покровська, 16 а, с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна, 37535; e-mail: tshevchenko367@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4248>).

МІШЕНІН Євген Васильович — доктор економічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу економіки природокористування в агросфері, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: eugeni_y_mishenin@yahoo.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-3270>).

ВИСОЧАНСЬКА Марія Ярославівна — доктор економічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи та інноваційного розвитку, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: mariya_vysochanska@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2116-9991>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

За результатами дослідження вчених Массачусетського технологічного інституту (США), опублікованого в IFL Science, озонна діра над Антарктикою, яка тривалий час становила глобальну екологічну загрозу, демонструє стабільну тенденцію до відновлення. Статистично достовірні дані підтверджують, що динаміка регенерації озонного шару обумовлена саме антропогенним зниженням викидів хлорфторвуглеводнів (CFC), а не природною кліматичною мінливістю. *“Це перше дослідження, яке кількісно підтверджує відновлення озонної діри, — зазначає Сьюзан Соломон, автор роботи та експерт з хімії атмосфери. — Отримані результати доводять, що скоординовані міжнародні зусилля, такі як Монреальський протокол, можуть ефективно вирішувати масштабні екологічні виклики”*. Це відкриття є важливим прецедентом для подальших кліматичних ініціатив, демонструючи, що науково обґрунтована екологічна політика здатна досягати вимірюваних позитивних результатів.

РИЗИК ЗАБРУДНЕННЯ ЛІКАРСЬКОЇ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ ПІРОЛІЗИДИНОВИМИ АЛКАЛОЇДАМИ

Н. В. Приведенюк

кандидат сільськогосподарських наук

Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроекології

і природокористування НААН (с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна)

e-mail: privedenyuk1983@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0748-8083>

Л. А. Глущенко

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник

Дослідна станція лікарських рослин Інституту агроекології

і природокористування НААН (с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна)

e-mail: L256@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2329-5537>

Піролізидинові алкалоїди (далі — ПА) є вторинними метаболітами деяких видів рослин, зокрема представників родин *Boraginaceae* (налічує 115 родів і близько 2500 видів), *Asteraceae* (1000 родів і 20000 видів) та *Fabaceae* (700 родів і 17 000 видів), і мають виражену гепатотоксичну, генотоксичну та потенційну канцерогенну дію. Потрапляння ПА до лікарської рослинної сировини можливе як унаслідок забруднення рослинними фрагментами представників указаних родин під час збирання, так і через горизонтальне перенесення речовин у ґрунті. У статті проаналізовані деякі властивості ПА, зокрема токсикологічні, а також механізми їх потрапляння до лікарської рослинної сировини, найпоширеніші джерела та ризики, пов'язані з використанням фітосировини, яка може містити ці сполуки. Особлива увага приділена біорізноманіттю рослин, що зростають в Україні й здатні накопичувати ПА, зокрема живокосту лікарському (*Symphytum officinale*), а також видам сировини, яка потенційно може бути забрудненою ПА. Оцінено ризики перехресного забруднення лікарської сировини під час збирання, сушіння, транспортування та первинної обробки. Обґрунтовано доцільність впровадження міжнародних стандартів GACP для зниження ризиків контамінації. Наведено приклади економічних наслідків забруднення продукції ПА та наголошено на необхідності комплексного підходу до контролю якості лікарської рослинної сировини. Результати досліджень указують на важливість системного контролю за вмістом ПА у лікарській рослинній сировині як на етапі процесів, пов'язаних зі збиранням дикорослих рослин, так і на етапі фармацевтичного виробництва, з метою забезпечення безпечності та ефективності фітотерапевтичних засобів.

Ключові слова: *Symphytum officinale* L., гепатотоксичність, якість, фармакологічна безпека, токсичні сполуки, канцерогенність, контамінація, економічні наслідки.

ВСТУП

Піролізидинові алкалоїди — це природні токсичні сполуки, що входять до складу деяких видів рослин, зокрема представників родин *Boraginaceae* (налічує 115 родів і близько 2500 видів), *Asteraceae* (1000 родів і 20000 видів) та *Fabaceae* (700 родів і 17000 видів) [1; 2]. Їхній синтез пов'язаний із системою захисту від фітофагів, проте і для людини ці сполуки становлять суттєву токсикологічну загрозу [3]. Потрапляння ПА до лікарської рослинної сировини може відбуватися через забруднення рослинними фрагментами представників указаних родин під час збирання або переробки, а також унаслідок горизонтального перенесення речовин у ґрунті, що ускладнює контроль за їх наявністю в кінцевому продукті — фітозасабах [4].

У зв'язку зі зростанням попиту на лікувальні і профілактичні фітопрепарати та через їхнє значне різноманіття, забезпечення якості та безпечності лікарської рослинної сировини, а також продукції, виготовленої на її основі, набуває особливого значення. Контроль вмісту ПА є критично важливим, оскільки навіть у низьких концентраціях вони можуть спричинити тяжкі ураження печінки, генотоксичність, канцерогенну дію та інші негативні ефекти, що підтверджується численними науковими дослідженнями. Вивчення ризиків, пов'язаних із забрудненням сировини ПА, є актуальним завданням для фармацевтичної та медичної галузей [2; 3; 4].

ПА здатні викликати як гострі, так і хронічні інтоксикації. Одним із найбільш відомих клінічних проявів є синдром венозної обструкції

печінки (VOD), що характеризується некрозом, фіброзом і гіперплазією жовчних протоків. Довготривале вживання продуктів, забруднених ПА, може призвести до розвитку гепатоцелюлярної карциноми та інших онкологічних захворювань [3; 5; 6; 7].

Метою роботи є оцінка ризиків забруднення лікарської рослинної сировини піролізидиновими алкалоїдами, виявлення джерел їх надходження, аналіз токсичних властивостей, а також обґрунтування заходів щодо мінімізації контамінації для безпечного використання фітотерапевтичних засобів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Токсичність ПА залежить від їхньої хімічної структури. Найбільш небезпечними вважають циклічні діестери, тоді як моноестери мають значно нижчу токсичність. Наприклад, лазіокарпін і сенеціонін є найтоксичнішими ПА, тоді як лікопсамін характеризується порівняно низькою токсичністю [8].

Механізм токсичної дії ПА пов'язаний з їхньою метаболічною активацією в печінці. Унаслідок біотрансформації утворюються реактивні проміжні сполуки, які взаємодіють із макромолекулами, такими як ДНК і білки, спричиняючи клітинні uszkodження та патологічні процеси. Основні шляхи дезінтоксикації включають гідроліз до менш токсичних сполук і окиснення до N-оксидів, які легше виводяться з організму [3; 6].

ПА є термостабільними сполуками, здатними витримувати високі температури. Це ускладнює їх видалення під час термічної обробки, тому вони можуть зберігати активність у продуктах, таких як трав'яні збори та фітосаї або рослинні екстракти [9].

За даними Європейського органу з безпеки харчових продуктів (англ. *European Food Safety Authority, EFSA*), середній рівень хронічної експозиції до ПА через споживання натуральних продуктів рослинного походження, зокрема меду, фітосаїв і харчових добавок, становить для дорослих від 0,1 до 7,4 нг/кг маси тіла на добу, тоді як для осіб із високим рівнем споживання цей показник може досягати 17,6 нг/кг/добу. У дітей ці рівні можуть бути значно вищими — до 27 нг/кг/добу і більше, що пояснюється меншою масою тіла та вищим відносним споживанням таких продуктів [6; 10].

Яскравим прикладом масової інтоксикації є випадок в Афганістані у 1974 році, коли було зафіксовано близько 7800 випадків отруєння, з яких 1600 мали летальний наслідок. Причиною стало споживання хліба з борошна, забрудненого насінням *Heliotropium popovii*. Цей випадок

підтверджує нагальну необхідність пильного контролю якості рослинної сировини, зокрема щодо наявності домішок, які містять ПА [11].

З огляду на те, що фармакологічна дія значної кількості лікарських рослин і фітопрепаратів пов'язана з тривалим застосуванням, накопичення ПА в організмі може становити серйозну загрозу для пацієнтів, які регулярно вживають фітопродукти та фітопрепарати. Це вимагає комплексного підходу до контролю безпеки фітотерапії на всіх етапах — від збирання дикорослої сировини до виготовлення кінцевого продукту [6; 7].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Робота виконувалася у два етапи за класичними методичними підходами [12]. Перший етап полягав у польових дослідженнях, картографуванні виявлених видів за маршрутами, під час яких здійснювалися описи та відбирався матеріал. Другий етап зосереджувався на стаціонарних дослідженнях зібраного матеріалу, визначенні видів судинних рослин за відібраними зразками (сировина, гербарій) за потреби, а також на статистичній обробці зібраного матеріалу [13].

Для дослідження було використано 247 описів рослинності з участю живокосту лікарського (*Symphytum officinale*), виконаних упродовж 2015–2021 рр. на території України під час щорічних експедицій [14–19].

Описи виконані із зазначенням проективного покриття всіх видів судинних рослин у відсотках незалежно від сировинної значущості ценопопуляцій живокосту лікарського [20; 21].

Для визначення географічних координат і висоти використовували GPS-навігацію в програмному комплексі NextGIS. Номенклатура видів судинних рослин наведена за *Vascular Plants of Ukraine* [22], визначення проводили класичним методом із застосуванням сучасних визначників [23].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На території України зростає значна кількість видів рослин, які здатні накопичувати ПА та становлять токсикологічну загрозу при потраплянні до лікарської сировини. Проте цей напрям потребує пильної уваги та поглибленого вивчення.

Серед представників родини Шорстколистих (*Boraginaceae*) флори України — огірочник лікарський (*Borago officinalis*), живокіст лікарський (*Symphytum officinale*), чорнокорінь лікарський (*Cynoglossum officinale*), синяк звичайний (*Echium vulgare*) представники роду во-

ловик (*Anchusa*) та інші, а також інтродуковані види: алкана фарбувальна (*Alkanna tinctoria*), геліотроп деревовидний (*Heliotropum arborescens*) та інші. До складу родини Айстрових (*Asteraceae*) також входять види, здатні накопичувати ПА: 6 видів роду жовтозілля (*Senecio*), підбіл звичайний або мати-й-мачуха (*Tussilago farfara*) та інші. Деякі представники родини Бобових (*Fabaceae*) також здатні синтезувати і накопичувати ПА, як-от *Crotalaria* spp. Проте представники цього численного роду (понад 700 видів) на території України в дикому стані не зустрічаються — вони можуть культивуватися або випадково потрапляти до сировини.

Зазначені види рослин і деякі інші рослини можуть потрапляти до лікарської рослинної сировини різними шляхами, але найчастіше — як домішка під час збирання сировини або внаслідок забруднення під час первинної обробки, пакування, транспортування, зберігання тощо. Враховуючи високу токсичність ПА, надзвичайно важливо розробити доступні заходи для убезпечення виробничих процесів, здійснювати постійний і суворий контроль якості лікарської рослинної сировини та запровадити поетапне виключення з використання у фітотерапії видів лікарських рослин із підвищеним вмістом ПА.

ПА містяться переважно в коренях, листках і квітах рослин, причому їх концентрація може значно варіювати залежно від виду рослини та її віку. Наприклад, у молодому листі *Synoglossum officinale* концентрація ПА може бути у 190 разів вищою, ніж у старому листі. Це вказує на важливість здійснення контролю за розвитком рослин, під час вирощування або виділення порівняно безпечних фаз розвитку при збиранні лікарської рослинної сировини в природних умовах [24].

Проведені дослідження були спрямовані на оцінку потенційного ризику забруднення лікарської рослинної сировини рослинними домішками, що містять ПА.

У межах рекогносцирувальних досліджень на основі 247 описів рослинності було проаналізовано видовий склад угруповань, до яких входив живокіст лікарський (*Symphytum officinale* L.) — один із найбільш відомих джерел ПА, що активно використовують у фітотерапії. В Україні зростає 11 видів роду *Symphytum*, які заготівельники здебільшого не розрізняють.

Symphytum officinale — рослина з кількома розгалуженими стеблами заввишки до 1,5 м, із розвиненою кореневою системою, яка складається з короткого багатоголового кореневища та довгого розгалуженого майже чорного зовні й жовтуватого всередині кореня. Листки яйцеподібно-ланцетні, завдовжки до 25–30 см, поступово звужуються по черешку. Рослина

густо опушена довгими жорсткими волосками. Квітки завдовжки 1–2 см, з дзвоникоподібним п'ятилопатеvim віночком, забарвлення якого варіює від майже білого до жовтуватого або від фіолетового до пурпурово-червоного. Цвіте у травні–липні. Сировиною є корені — *Radices Symphyti*, які збирають на початку вегетації (квітень–травень) або восени, в кінці вегетації. Корені містять природні речовини багатьох класів, що є доволі специфічними та відзначаються переважно в рослинах родини *Boraginaceae*.

Корені *Radices Symphyti* містять азотвмісні сполуки, зокрема алкалоїди (0,13–0,32%): ехімідин, симфітин, симландин, інтермедин, лікопсамін, лазіокарпін, асперумін, а також амінокислоти — треонін, валін, метіонін — та білки, зв'язані з вуглеводами. Вуглеводи становлять 18–29%: фруктоза (0,7%), сахароза (1,2%), глюкоманани, водорозчинні полісахариди, які гідролізуються до глюкози (0,43–2,62%), арабінози, ксилози, рамнози, уронові кислоти. До складу сировини входять також пектинові речовини і крохмаль (4,25%). Характерного забарвлення сировини надають ліпофільні речовини (хлорофіли, каротиноїди, токоферолі), а також антоціанові пігменти (глікозиди ціанідину, дельфінідину, мальвідину). Окрім того, у складі сировини наявні стерини, тригліцериди жирних кислот, монотерпеноїди. До фенольних сполук належать літоспермова кислота, дубильні речовини (2,4%) [25].

Серед виявлених алкалоїдів найпоширенішими є симфітин, інтермедин, ехімідин і лазіокарпін. Ці сполуки мають гепатотоксичну, генотоксичну та потенційно канцерогенну дію. Через високий рівень токсичності внутрішнє застосування *Radices Symphyti* заборонене або суворо обмежене в багатьох країнах світу. Зовнішнє використання допустиме лише під наглядом лікаря та за чітко визначених умов і дозування.

Польові дослідження показали, що *Symphytum officinale* переважно приурочений до формацій *Alneta glutinosae* (асоціації *Alnetum filipendulosum* (*ulmariae*), *A. athyriosum* (*filix-feminae*), *A. deschampsiosum* (*caespitosae*)), а також до класів формацій *Prata paludosa*, *Prata genuine*, де може виступати субдомінантом.

Представники роду *Symphytum* зустрічаються і в горах, у межах субальпійського поясу, переважно у вологих місцях: уздовж канав, поблизу водойм, у знижених ділянках серед чагарників і високотрав'я. Іноді на полонинах разом з *Urtica dioica* та *Rumex confertus* вони утворюють щільні зарості на місці старих загонів для худоби.

Встановлено також, що *Symphytum officinale* зростає разом з 451 видом рослин, серед

яких 89 активно застосовуються в народній та офіційній медицині, а також у ветеринарії.

Найпоширенішими супутніми видами є 18 видів, що входять до Європейської фармакопеї та Державної фармакопеї України і сировину яких збирають переважно в природних угрупованнях:

- алтея лікарська (*Althaea officinalis*), сировиною якої є *Althaeae radix*, *Althaeae folium*, *Althaeae herba*;
- валеріана лікарська (*Valeriana officinalis*) — *Valerianae radix*;
- вербена лікарська (*Verbena officinalis*) — *Verbenae herba*;
- гадючник в'язолистий (*Filipendula ulmaria*) — *Filipendulae ulmariae herba*;
- гадючник звичайний (*Filipendula hexapetala*) — *Filipendulae hexapetalae rhizoma et radix*;
- гірчак зміїний (*Persicaria bistorta*) — *Bistortae rhizoma*;
- дягель лікарський (*Angelica archangelica*) — *Angelicae archangelicae radix*;
- кропива дводомна (*Urtica dioica*) — *Urticae folium*, *Urticae radix*, *Urticae herba*;
- кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale*) — *Taraxaci officinalis radix*, *Taraxaci officinalis herba cum radice*;
- плакун верболистий (*Lythrum salicaria*) — *Lythri herba*;
- подорожник ланцетолистий (*Plantago lanceolata*) — *Plantaginis lanceolatae folium*;
- подорожник великий (*Plantago major*) — *Plantaginis majoris folium*;
- приворотень звичайний (*Alchemilla vulgaris*) — *Alchemillae herba*;
- родовик лікарський (*Sanguisorba officinalis*) — *Sanguisorbae radix*;
- лепеха звичайна (*Acorus calamus*) — *Acorus calamus rhizomata*;
- лопух справжній (*Arctium lappa*) — *Arctii radix*;
- оман високий (*Inula helenium*) — *Inulae rhizomata et radices*;
- череда трироздільна (*Bidens tripartita*) — *Bidentis tripartitae herba* [26; 27; 28].

Вказані рослини мають доведену ефективність та є об'єктом промислу. Їх часто збирають як для забезпечення особистих потреб, так і для продажу заготівельним організаціям як лікарської та харчової сировини. Нерідко населення одночасно проводить збирання лікарської рослинної сировини різних видів, зокрема разом із коренями живокосту лікарського. З огляду на морфологічну подібність із коренями інших видів, існує підвищений ризик випадкового потрапляння (неумисного забруднення)

фрагментами живокосту лікарського (коренів, листків, квітів) до іншої лікарської сировини.

Забруднення лікарської рослинної сировини ПА може відбуватися на різних етапах виробничого процесу:

- на етапі збирання — через механічне перемішування рослин при зрізуванні або транспортному пакуванні;
- під час сушіння та транспортування — якщо різні види транспортуються, висушуються разом або зберігаються одночасно без належного розподілу;
- під час подрібнення та фасування — у разі використання обладнання та багаторазового використання пакувальної тари без належного очищення.

Особливу небезпеку становлять корені *Radices Symphyti*, які містять найвищі концентрації ПА. Оскільки у фітотерапії широко використовуються також корені інших згаданих вище видів лікарських рослин, зокрема *Radices Urticae*, *Radices Althaeae officinalis*, *Radices Rumicis*, *Rhizomata et radices Inulae* тощо, існує висока ймовірність їх помилкового збирання під час заготівлі або обробки, що може призвести до небажаного контамінаційного ефекту.

Останні наукові дослідження доводять, що ПА можуть передаватися до лікарських рослин не лише внаслідок контамінації під час збирання сировини, а й через природне горизонтальне перенесення з ґрунту. Під час розкладання решток рослин, що містять ПА, ці алкалоїди потрапляють у ґрунтове середовище та можуть поглинатися іншими рослинами-акцепторами, які самі не синтезують ПА, але здатні поглинати їх та накопичувати. Експерименти в умовах спільного культивування та мульчування доводять, що таке перенесення відбувається саме через ґрунт, без прямого фізичного контакту між рослинами. Це свідчить про необхідність ретельного контролю в процесі збирання сировини в природних умовах та агротехнічних практик, особливо під час заготівлі лікарських рослин на ділянках, де раніше зростали або ростуть поруч ПА-вмісні види [1].

З метою мінімізації забруднення лікарської рослинної сировини ПА пропонуємо дотримуватися комплексу заходів, що охоплюють усі етапи — від збирання до первинної обробки.

Насамперед необхідною умовою є суворий контроль і попередній огляд місць запланованого збирання сировини. Слід за можливості уникати збирання сировини в місцях масового зростання дикорослих видів рослин, що здатні накопичувати ПА (наприклад, представники родин *Asteraceae*, *Boraginaceae*). На етапі збирання важливе значення має первинне сортування сировини безпосередньо на місці

збору, ще до підв'ялювання і сушіння (коли свіжозібрані сировинні органи ще зберігають діагностичні ознаки рослин) — з метою своєчасного видалення домішок видів рослин, що містять токсикологічну загрозу.

Ключовим напрямом упередження є інформування місцевого населення, збирачів і заготівельників лікарської рослинної сировини щодо ризиків забруднення ПА та навчання їх базовим методам ідентифікації токсичних видів.

Ефективним інструментом системного підходу до контролю якості є впровадження міжнародних стандартів GACP (англ. *Good Agricultural and Collection Practices*). Ці стандарти регламентують усі етапи — від вирощування і збору до первинної обробки та зберігання лікарської сировини [29]. Їх дотримання надає можливість суттєво знизити ризики контамінації ПА.

Забруднення ПА має не лише медичні, а й значні економічні наслідки. З метою зниження ризиків виробники змушені впроваджувати додаткові заходи контролю якості, що призводить до збільшення виробничих витрат. Наприклад, зростання обсягу ручного сортування та видалення домішок може підвищити собівартості продукції на 20–30%.

ВИСНОВКИ

Сьогодні у всьому світі широко застосовують фітопрепарати як основні, доповнюючі та/або альтернативні засоби для лікування і профілактики найрізноманітніших захворювань. Проте аналіз останніх досліджень вказує на певні ризики застосування цих засобів, які можуть спричинити порушення роботи систем та органів людини.

ПА є серйозною токсикологічною загрозою, що потребує особливої уваги при заготівлі

та контролі якості лікарської рослинної сировини. Враховуючи високу біологічну активність ПА, здатність викликати гепатотоксичні, генотоксичні та канцерогенні ефекти, а також терmostійкість, забезпечення безпечності фітопрепаратів є критично важливим завданням фармацевтичної галузі. Потраплення домішок ПА-вмісних рослин до сировини можливе на всіх етапах виробничого процесу — від збору до фасування, що обумовлює необхідність комплексного підходу до профілактики контамінації.

Проведений аналіз видового складу угруповань, до складу яких входить живокіст лікарський (*Symphytum officinale*) — один із найвідоміших джерел ПА, засвідчив високу ймовірність перехресного забруднення, зокрема при одночасному збиранні лікарської рослинної сировини декількох видів. Особливу небезпеку становлять корені рослин, які найчастіше містять найбільшу концентрацію ПА.

Для зниження ризиків забруднення доцільним є розроблення, удосконалення і впровадження комплексу заходів: попередній огляд місць збору, сортування сировини безпосередньо на місці заготівлі, суворий контроль на всіх етапах роботи з сировиною та інформування збирачів і заготівельників щодо дотримання стандартів GACP. Ці заходи дозволяють запобігти потрапленню алкалоїдів до кінцевої продукції та суттєво знизити потенційні ризики забруднення ПА.

Отже, забезпечення якості та безпеки лікарської рослинної сировини в умовах зростаючого попиту на фітотерапевтичні засоби можливе лише за умов постійного вдосконалення запобіжних заходів та інтегрованого контролю, що поєднує науково обґрунтовані підходи, технічне оснащення і професійну підготовку учасників процесу збирання й обробки сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Данилко Р., Ключевич М. Контроль піролізидинових алкалоїдів у лікарській рослинній сировині. *Наукові горизонти XXI століття: мультидисциплінарні дослідження: матеріали міжнародної наукової конференції* (Ужгород, 16–17 травня 2024 р.). Ужгород, 2024. С. 139.
2. Kopp T., Abdel-Tawab M., Mizaikoff B. Extracting and analyzing pyrrolizidine alkaloids in medicinal plants: a review. *Toxins*. 2020. Vol. 12, no. 5. P. 320. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins12050320>
3. Al-Subaie S. F., Alowaiifeer A. M., Mohamed M. E. Pyrrolizidine alkaloid extraction and analysis: Recent updates. *Foods*. 2022. Vol. 11, no. 23. P. 3873. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11233873>
4. Steinhoff B. Pyrrolizidine alkaloid contamination in herbal medicinal products: Limits and occurrence. *Food and Chemical Toxicology*. 2019. Vol. 130. P. 262–266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2019.05.026>
5. Jayawickreme K., Świstak D., Ozimek E. et al. Pyrrolizidine alkaloids — Pros and cons for pharmaceutical and medical applications. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, no. 23. P. 16972. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242316972>
6. Wiesner J. Regulatory perspectives of pyrrolizidine alkaloid contamination in herbal medicinal products. *Planta Medica*. 2022. Vol. 88, no. 2. P. 118–124. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1494-1363>
7. Wang W., Chen Y., Yin Y. et al. A TMT-based shotgun proteomics uncovers overexpression of thrombospondin 1 as a contributor in pyrrolizidine alkaloid-induced hepatic sinusoidal obstruction syndrome. *Archives of Toxicology*. 2022. Vol. 96, no. 7. P. 2003–2019.

8. Tábuas B., Cruz Barros S., Diogo C. et al. Pyrrolizidine alkaloids in foods, herbal drugs, and food supplements: Chemistry, metabolism, toxicological significance, analytical methods, occurrence, and challenges for future. *Toxins*. 2024. Vol. 16, no. 2. P. 79. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins16020079>
9. Fernández-Pintor B., Casado N., Morante-Zarero S., Sierra I. Evaluation of the thermal stability and transfer rate of pyrrolizidine alkaloids during the brewing of herbal infusions contaminated with *Echium vulgare* and *Senecio vulgaris* weeds. *Food Control*. 2023. Vol. 154. 109926. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109926>
10. Steinhoff B. Pyrrolizidine alkaloid contamination in medicinal plants: Regulatory requirements and their impact on production and quality control of herbal medicinal products. *Planta Medica*. 2022. Vol. 88, no. 2. P. 125–129. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-1494-3623>
11. Kakar F., Akbarian Z., Leslie T. et al. An outbreak of hepatic veno-occlusive disease in western Afghanistan associated with exposure to wheat flour contaminated with pyrrolizidine alkaloids. *Journal of Toxicology*. 2010. Vol. 2010. 313280. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/313280>
12. Григора І. М., Соломаха В. А. Основи фітоценології. Київ: Фітосоціоцентр, 2000. 240 с.
13. Попович С. Ю., Байрак О. М., Вашека Л. В. та ін. Геоботаніка. Методичні аспекти досліджень. Київ: Ліра, 2018. 316 с.
14. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Тригуб О. В., Богуславський Р. Л. Генетичні ресурси культурних і дикорослих рослин Центрального Лісостепу України (за результатами експедицій 2016). *Генетичні ресурси рослин*. 2017. № 2. С. 11–26.
15. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Богуславський Р. Л. Генофонд рослин Лісостепу України. *Генетичні ресурси рослин*. 2018. № 23. С. 11–31.
16. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Богуславський Р. Л., Глущенко Ю. В. Генетичне різноманіття рослин Північно-Східних районів України (за результатами експедицій 2018 року). *Генетичні ресурси рослин*. 2019. № 2 (24). С. 26–46.
17. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Глущенко Ю. В., Богуславський Р. Л. Генетичні ресурси рослин Поділля України (за результатами експедиції 2019 року). *Генетичні ресурси рослин*. 2019. № 3 (25). С. 41–61.
18. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Богуславський Р. Л. Генетичні ресурси рослин Дніпропетровської та Харківської областей. *Генетичні ресурси рослин*. 2021. № 1 (28). С. 19–35. DOI: <https://doi.org/10.36814/pgr.2021.28.02>
19. Кир'ян В. М., Глущенко Л. А., Богуславський Р. Л. Генетичне різноманіття рослин Чернівецької та Тернопільської областей України. *Генетичні ресурси рослин*. 2022. № 1 (30). С. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.36814/pgr.2022.30.02>
20. Дідух Я. П. Популяційна екологія. Київ: Фітосоціоцентр, 1998. 192 с.
21. Мінарченко В. М., Мінарченко О. М. Методика обліку рослинних ресурсів. Київ, 2004. 40 с.
22. Mosyakin S. L., Fedoronchuk M. M. Vascular plants of Ukraine: A nomenclatural checklist. Kyiv: M. G. Kholodny Institute of Botany, 1999. 345 p.
23. Котов М. І., Прокудін Ю. Н. та ін. Визначник вищих рослин України. Київ: Наукова думка, 1987. 548 с.
24. van Dam N. M., Verpoorte R., van der Meijden E. D. Extreme differences in pyrrolizidine alkaloid levels between leaves of *Cynoglossum officinale*. *Phytochemistry*. 1994. Vol. 37, no. 4. P. 1013–1016.
25. Попова Н. В., Литвиненко В. І., Куцаня А. С. Лекарственные растения мировой флоры: энциклопедический справочник. Харьков: Діса плюс, 2016. 540 с.
26. European Pharmacopoeia. 12th ed. Strasbourg: EDQM, 2025.
27. Державна фармакопея України. 2-е вид. Харків: ДП “НЕФЦ”, 2020.
28. Котов А. Г., Котова Є. Є., Соколова О. О. Атлас ілюстрацій до методів ідентифікації лікарської рослинної сировини в національних монографіях ДФУ. 2021. 256 с.
29. European Medicines Agency. Guideline on good agricultural and collection practice (GACP) for starting materials of herbal origin. London, 2006.

RISK OF CONTAMINATION OF MEDICINAL PLANT RAW MATERIALS WITH PYRROLIZIDINE ALKALOIDS

Pryvedeniuk N.

Candidate of Agricultural Sciences

Research Station of Medicinal Plants of IAEM of NAAS

(Berezotocha village, Lubny district, Poltava Region, Ukraine)

e-mail: privedenyuk1983@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0748-8083>

Hlushchenko L.

Candidate of Biological Sciences, Senior Research Fellow

Research Station of Medicinal Plants of IAEM of NAAS

(Berezotocha village, Lubny district, Poltava Region, Ukraine)

e-mail: 1256@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2329-5537>

Pyrrolizidine alkaloids (PAs) are secondary metabolites found in certain plant species, particularly members of the families Boraginaceae (comprising 115 genera and approximately 2,500 species), Asteraceae (1,000 genera and 20,000 species), and Fabaceae (700 genera and 17,000 species). These compounds exhibit pronounced hepatotoxic,

genotoxic, and potentially carcinogenic effects. The presence of PAs in medicinal plant raw materials can result from contamination by plant fragments from these families during harvesting, as well as horizontal transfer of compounds in the soil. This article analyzes several toxicological properties of PAs, along with their mechanisms of entry into medicinal plant raw materials, common sources, and risks associated with the use of phytomaterials that may contain these compounds. Special attention is given to the biodiversity of PA-accumulating plants in Ukraine, particularly common comfrey (*Symphytum officinale*), as well as plant materials that are potentially contaminated with PAs. The risks of cross-contamination during harvesting, drying, transportation, and initial processing of medicinal raw materials are evaluated. The study also emphasizes the necessity of implementing international GACP standards to reduce contamination risks. Examples of economic consequences resulting from PAs contamination are presented, and the importance of a comprehensive approach to quality control in medicinal plant raw materials is highlighted. The research findings underscore the need for systematic monitoring of PAs content in medicinal raw materials, both at the stage of wild plant collection and during pharmaceutical production, to ensure the safety and efficacy of herbal medicinal products.

Keywords: *Symphytum officinale* L., hepatotoxicity, quality, pharmacological safety, toxic compounds, carcinogenicity, contamination, economic consequences.

REFERENCES

1. Danylko, R., & Kliuchevych, M. (2024). Control of pyrrolizidine alkaloids in medicinal plant raw materials. In *Scientific Horizons of the 21st Century: Multidisciplinary Research: Proceedings of the International Scientific Conference (Uzhhorod, May 16–17, 2024)* (p. 139).
2. Kopp, T., Abdel-Tawab, M., & Mizaikoff, B. (2020). Extracting and analyzing pyrrolizidine alkaloids in medicinal plants: A review. *Toxins*, 12(5), 320. doi: 10.3390/toxins12050320
3. Al-Subaie, S. F., Alowaiifeer, A. M., & Mohamed, M. E. (2022). Pyrrolizidine alkaloid extraction and analysis: Recent updates. *Foods*, 11(23), 3873. doi: 10.3390/foods11233873
4. Steinhoff, B. (2019). Pyrrolizidine alkaloid contamination in herbal medicinal products: Limits and occurrence. *Food and Chemical Toxicology*, 130, 262–266. doi: 10.1016/j.fct.2019.05.026
5. Jayawickreme, K., Świstak, D., Ozimek, E., Reszczyńska, E., Rysiak, A., Makuch-Kocka, A., & Hanaka, A. (2023). Pyrrolizidine alkaloids — Pros and cons for pharmaceutical and medical applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(23), 16972. doi: 10.3390/ijms242316972
6. Wiesner, J. (2022). Regulatory perspectives of pyrrolizidine alkaloid contamination in herbal medicinal products. *Planta Medica*, 88(2), 118–124. doi: 10.1055/a-1494-1363
7. Wang, W., Chen, Y., Yin, Y., Wang, X., Ye, X., Jiang, K., ... Wang, Z. (2022). A TMT-based shotgun proteomics uncovers overexpression of thrombospondin 1 as a contributor in pyrrolizidine alkaloid-induced hepatic sinusoidal obstruction syndrome. *Archives of Toxicology*, 96(7), 2003–2019.
8. Tábuas, B., Cruz Barros, S., Diogo, C., Cavaleiro, C., & Sanches Silva, A. (2024). Pyrrolizidine alkaloids in foods, herbal drugs, and food supplements: Chemistry, metabolism, toxicological significance, analytical methods, occurrence, and challenges for future. *Toxins*, 16(2), 79. doi: 10.3390/toxins16020079
9. Fernández-Pintor, B., Casado, N., Morante-Zarero, S., & Sierra, I. (2023). Evaluation of the thermal stability and transfer rate of pyrrolizidine alkaloids during the brewing of herbal infusions contaminated with *Echium vulgare* and *Senecio vulgaris* weeds. *Food Control*, 154, 109926. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109926
10. Steinhoff, B. (2022). Pyrrolizidine alkaloid contamination in medicinal plants: Regulatory requirements and their impact on production and quality control of herbal medicinal products. *Planta Medica*, 88(2), 125–129. doi: 10.1055/a-1494-3623
11. Kakar, F., Akbarian, Z., Leslie, T., Mustafa, M. L., Watson, J., van Egmond, H. P., ... Mofleh, J. (2010). An outbreak of hepatic veno-occlusive disease in western Afghanistan associated with exposure to wheat flour contaminated with pyrrolizidine alkaloids. *Journal of Toxicology*, 2010, 313280. doi: 10.1155/2010/313280
12. Hryhora, I. M., & Solomakha, V. A. (2000). *Fundamentals of phytocenology*. Kyiv: Phytotsotsiocentr.
13. Popovych, S. Yu., Bairak, O. M., Vasheka, L. V., et al. (2018). *Geobotany: Methodological aspects of research*. Kyiv: Lira.
14. Kyrian, V. M., Hlushchenko, L. A., Tryhub, O. V., & Bohuslavskiy, R. L. (2017). Genetic resources of cultivated and wild plants of the Central Forest-Steppe of Ukraine. *Genetic Resources of Plants*, 2, 11–26.
15. Kirian, V. M., Hlushchenko, L. A., & Bohuslavskiy, R. L. (2018). Gene pool of plants of the Ukrainian Forest-Steppe. *Genetic Resources of Plants*, 23, 11–31.
16. Kyrian, V. M., Hlushchenko, L. A., Bohuslavskiy, R. L., & Hlushchenko, Yu. V. (2019). Genetic diversity of plants in the Northeastern regions of Ukraine. *Plant Genetic Resources*, 2(24), 26–46.
17. Kyrian, V. M., Hlushchenko, L. A., Hlushchenko, Yu. V., & Bohuslavskiy, R. L. (2019). Genetic resources of plants of Podillia region, Ukraine (based on the results of the 2019 expedition). *Plant Genetic Resources*, 3(25), 41–61.
18. Kyrian, V. M., Hlushchenko, L. A., & Bohuslavskiy, R. L. (2021). Genetic resources of plants in Dnipropetrovsk and Kharkiv regions. *Plant Genetic Resources*, 1(28), 19–35. doi: 10.36814/pgr.2021.28.02
19. Kyrian, V. M., Hlushchenko, L. A., & Bohuslavskiy, R. L. (2022). Genetic diversity of plants in Chernivtsi and Ternopil regions of Ukraine. *Plant Genetic Resources*, 1(30), 22–33. doi: 10.36814/pgr.2022.30.02
20. Didukh, Ya. P. (1998). Population ecology. Kyiv: Phytotsotsiocentr.
21. Minarchenko, V. M., & Minarchenko, O. M. (2004). *Methodology for accounting plant resources* (40 p.). Kyiv.

22. Mosiakin, S. L., & Fedoronchuk, M. M. (1999). *Vascular plants of Ukraine: A nomenclatural checklist*. Kyiv: M. G. Khodny Institute of Botany.
23. Kotov, M. I., Prokudin, Yu. N., et al. (1987). *Key to higher plants of Ukraine*. Kyiv: Naukova dumka.
24. van Dam, N. M., Verpoorte, R., & van der Meijden, E. D. (1994). Extreme differences in pyrrolizidine alkaloid levels between leaves of *Cynoglossum officinale*. *Phytochemistry*, 37(4), 1013–1016.
25. Popova, N. V., Lytvynenko, V. I., & Kutsanyan, A. S. (2016). *Medicinal plants of the world flora: Encyclopedic reference*. Kharkiv: Disa Plus.
26. European Pharmacopoeia (12th ed.). (2025). Strasbourg: EDQM.
27. State Pharmacopoeia of Ukraine. (2nd ed.). (2020). Kharkiv: SE “NEFC”.
28. Kotov, A. H., Kotova, Ye. Ye., & Sokolova, O. O. (2021). *Atlas of illustrations for methods of identification of medicinal plant raw materials in the national monographs of the State Pharmacopoeia of Ukraine*.
29. European Medicines Agency. (2006). *Guideline on good agricultural and collection practice (GACP) for starting materials of herbal origin*. London.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ПРИВЕДЕНЮК Назар Валерійович — кандидат сільськогосподарських наук, завідувач відділу технології вирощування лікарських рослин, Дослідна станція лікарських рослин Інституту агро-екології і природокористування НААН (с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна, 37535; e-mail: privedenyuk1983@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0748-8083>).

ГЛУЩЕНКО Людмила Анатолівна — кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу екології і фармакогнозії, Дослідна станція лікарських рослин Інституту агро-екології і природокористування НААН (с. Березоточа, Лубенський р-н, Полтавська обл., Україна, 37535; e-mail: L256@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2329-5537>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

За даними Кліматичного Центру Коперника (C3S), у лютому 2025 року площа морського льоду на обох полюсах досягла історичного мінімуму за весь період спостережень, причому в Арктиці вона скоротилася на 8% порівняно з середньою нормою, продовжуючи тримісячну тенденцію до рекордного танення. Як зазначила заступник голови C3S **Саманта Берджесс**, це безпосередньо пов'язано з глобальним потеплінням, оскільки середня температура планети минулої зими лише на 0,05°C відрізнялася від торішнього показника, що підтверджує прискорення кліматичних змін.

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ СІЛЬСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНИХ ІНСТРУМЕНТІВ (НА ПРИКЛАДІ ТЕРНОПІЛЬСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

В. В. Ше
аспірант

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: vvladimir1987@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5131-0234>

У статті проаналізовано сучасний еколого-економічний стан сільських територій і роль еколого-економічного моніторингу в забезпеченні їхнього екологічно збалансованого розвитку. Підтверджено необхідність проведення регулярного соціального, екологічного та економічного моніторингу для формування якісної інформаційної бази та ефективного розв'язання екологічних проблем. Окреслено регіональні особливості розвитку сільських територіальних громад Тернопільської області. Обґрунтовано доцільність впровадження програмного забезпечення для еколого-економічного моніторингу сільських територій Тернопільської області. Проаналізовано основні проблеми розвитку сільських громад, екологічні загрози та соціально-економічні виклики, що постають перед ними. Досліджено основні підходи і програмні інструменти для інтеграції екологічних та економічних показників. Запропоновано використання штучного інтелекту для підвищення ефективності еколого-економічного моніторингу в Тернопільській області.

Ключові слова: збалансований розвиток, якість довкілля, сільські територіальні громади, сучасні інформаційні технології, модернізація моніторингових досліджень, рівень добробуту сільського населення.

ВСТУП

Концепція сталого розвитку як на глобальному рівні, так і в межах територіальних громад передбачає раціональне використання природних ресурсів, що забезпечує не лише економічне зростання в сучасних умовах, а й збереження екосистем для гарантування добробуту майбутніх поколінь [1; 2]. Це вимагає комплексного підходу до управління природокористуванням, що поєднує економічні, екологічні та соціальні аспекти розвитку. Важливим завданням є впровадження інноваційних технологій і механізмів регулювання, що сприятимуть збереженню навколишнього середовища та підвищенню якості життя населення [3].

Військова агресія РФ спричинила надзвичайно важкі наслідки, які фактично призупинили розвиток нашої держави, штовхаючи українське суспільство в регресію. Це виражається в необхідності більшості чоловіків і частково жінок вступати до лав ЗСУ, а також у масовому переселенні цивільних жінок, дітей та людей літнього віку з окупованих територій. Це загостило вирішення демографічних і соціальних проблем, унеможливило забезпечення нормального проживання українців та доступу до задоволення їхніх базових потреб [2].

За даними Міністерства соціальної політики України, станом на 6 липня 2022 року в

Україні було зареєстровано 1 473 650 внутрішньо переміщених осіб, з яких понад 69 тисяч перебували на обліку в Тернопільській області. Це спричинило додаткове навантаження на місцеву інфраструктуру, соціальні служби та системи забезпечення якісного рівня життя, викликане воєнними діями, призвело до виникнення численних соціально-економічних проблем і конфліктних ситуацій [4; 5].

Основною метою нашого дослідження є встановлення регіональних особливостей розвитку сільських територіальних громад Тернопільської області, визначення основних еколого-економічних проблем і шляхів їх подолання за допомогою сучасних інструментів модернізованого еколого-економічного моніторингу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Відомо, що загальний соціально-еколого-економічний стан регіону суттєво впливає на рівень добробуту сільського населення. Необхідність дослідження та регулярного проведення соціального, екологічного й економічного моніторингу, а також забезпечення якісної інформаційної бази для вирішення екологічних проблем і розвитку сільських територій висвітлювали у своїх наукових працях В. І. Бойко, О. В. Вовна, А. А. Зорі, В. А. Порєв [6], М. Я. Височанська,

Н. В. Палапа, О. С. Дем'янчук, О. О. Кічигіна [7; 8], О. М. Нагорнюк, В. Т. Собчик, О. В. Устименко, С. М. Гончар, О. І. Дребот [1; 9], І. З. Сторонянська, І. Р. Залуцький, Х. О. Патицька [10] та ін.

Аналіз літературних джерел свідчить, що найпрогресивнішу систему моніторингу мають високорозвинені країни, де вона охоплює як державні установи, так і комерційні структури. Останні надають послуги з моніторингу на замовлення юридичних осіб, тоді як державні органи частково можуть виконувати комерційні завдання. Значна частина станцій належить приватним компаніям і підприємствам, які створили власні паралельні моніторингові мережі для врегулювання екологічних спірних питань через державні інституції. Низький рівень фінансування в країнах, що розвиваються, фактично унеможливило створення ефективної системи моніторингу, що є характерним і для України [3; 6; 11]. Тому через недофінансування, недостатню увагу з боку органів влади та штучне затягування процесів децентралізації, ускладнені поточними військовими діями в Україні, значна частина сіл перебуває в незадовільному стані. Це проявляється у відсутності робочих місць, недостатньо розвиненій інфраструктурі сільських територій, обмеженому доступі сільського населення до медичних, освітніх та інших послуг.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення моніторингу будь-якого рівня використовуються сучасні методи аналізу і контролю стану довкілля та якості життя людей, а саме: *методи структурного аналізу* — для якісної та кількісної оцінки структурних блоків соціо-еколого-економічної системи; *методи системного аналізу* — для з'ясування основних системоутворюючих зв'язків між структурними блоками, що детермінують результативність роботи соціо-еколого-економічної системи; *методи функціонального аналізу* — для визначення функціональних показників досліджуваної соціо-еколого-економічної системи [1].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Сільські території України займають значну площу поза межами міських агломерацій і мають свої специфічні характеристики, які вирізняють їх серед інших типів територій. Визначення сільських територій варіюється залежно від країни та нормативно-правової бази, але здебільшого охоплює такі аспекти, як тип використання землі, густина населення, харак-

тер зайнятості та рівень соціально-економічного розвитку в територіальних громадах [8; 10].

У міжнародній практиці, наприклад, тлумачення сільських територій часто базується на критеріях густоти населення та віддаленості від міських центрів. Організація Об'єднаних Націй та Європейський Союз визначають сільські території як такі, де щільність населення не перевищує певного порогу, а також де переважна частина землекористування спрямована на сільське господарство, лісництво або інші види сільськогосподарської діяльності, пов'язані з використанням природних ресурсів. У нормативно-правових документах багатьох країн сільські території охоплюють аграрні землі, ліси, водні об'єкти та населені пункти, що розташовані поза межами міських зон і мають відповідну інфраструктуру та соціально-економічну структуру [9; 12].

Екологічно збалансований розвиток сільських територій Тернопільської області є одним із ключових завдань розвитку держави та подолання сучасних соціально-еколого-економічних викликів, оскільки значна частина її населення проживає в сільських територіальних громадах. Загальний соціально-економічний та екологічний стан регіону суттєво впливає на рівень добробуту сільського населення та розвиток сільських територій. Проте через недофінансування, недостатню увагу з боку органів місцевої влади, затягування процесів децентралізації, що ускладнені військовою агресією проти України, значна частина сіл перебуває в незадовільному стані, що проявляється в безробітті, недостатньо розвиненій інфраструктурі та обмеженому доступі до медичних, освітніх та інших послуг. Ці та інші чинники впливають на те, що чимала частина населення змушена шукати заробітки далеко від місця проживання, залишаючи домівки та сім'ї.

У 2015 р. Парламент ухвалив Закон "Про засади державної регіональної політики", ратифікувавши Угоду про асоціацію з ЄС. З того часу Україна досягла значних результатів, зокрема у втіленні ключових пріоритетів Державної стратегії регіонального розвитку на період до 2020 року — здійснила успішну реформу місцевого самоврядування та територіальної організації влади, децентралізувала значну частину владних повноважень, а також провела фінансову децентралізацію [11].

Екологічні проблеми регіону можуть ефективно вирішувати лише кваліфіковані спеціалісти, які мають інтерес у розвитку своєї громади в усіх аспектах. Особливо це актуально з огляду на нагальні проблеми якості атмосферного повітря, водних і земельних ресурсів, поводження з відходами, збереження та відновлення

біорізноманіття і природно-заповідного фонду, мінімізації негативного впливу екологічних чинників на здоров'я населення, що потребують комплексного підходу.

Стан атмосферного повітря. Дослідження статистичних даних показують, що основним джерелом забруднення повітря в області є викиди автотранспорту, зростання якого спостерігається протягом останніх років, та підприємства, які займаються транспортуванням та розподілом газу (Тернопільське лінійно-виробниче об'єднання магістральних газопроводів, Кременецьке відділення з постачання та реалізації газу і Гусятинська газокompресорна станція). У зимовий період додатковими забруднювачами є котельні, приватні будинки та індивідуальні опалювальні системи. У 2023 році було проведено моніторинг 2 913 проб атмосферного повітря, з яких у міських населених пунктах 7,1% перевищували гранично допустимі концентрації, а в сільських — 2,1% [5; 13].

Згідно з даними Тернопільського обласного центру з гідрометеорології, у 2024 році середньомісячну концентрацію перевищували діоксид азоту та оксид вуглецю — 1,2 ГДК (табл. 1). Усі інші забруднюючі речовини були в межах допустимих норм. Індекс забруднення в Тернополі становив 3,88 [14].

Таблиця 1

Значення ГДК забруднюючих речовин атмосферного повітря в Тернопільській області в 2024 році

Забруднююча речовина	ГДК середньодобова, мг/м ³	Клас небезпеки
Пил (завислі речовини)	0,15	3
Діоксид сірки	0,05	3
Оксид вуглецю	3,0	4
Діоксид азоту	0,04	2
Оксид азоту	0,06	3
Формальдегід	0,003	2

Джерело: [14].

Стан водних ресурсів. Стан водойм області оцінюється як задовільний, що частково пояснюється їх передачею в оренду, завдяки чому покращився догляд за ними. Якість води у водоймах здебільшого відповідає нормативам, хоча спостерігаються окремі перевищення гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин. Водночас через неефективну роботу очисних споруд у громадах до поверхневих водойм потрапляє майже 2,3 млн м³ недостатньо очищених стічних вод. Стан очисних споруд у Тернопільській області до 2020 року характеризувався досить низькою ефективністю, про що

свідчать факти неможливості очищення комунальних стоків у Ланівцях, Кременці, Теребовлі, Шумську, Чорткові, Підволочиську та Бучачі [15]. Протягом року в Тернопільській області фіксувалося понад 226 випадків перевищення забруднення водойм відповідно до встановлених нормативів ГДК [14].

Важливим напрямом державного контролю за станом навколишнього природного середовища області є контроль ефективності роботи очисних споруд підприємств і житлово-комунальної служби та їхнього впливу на стан поверхневих вод. Цей напрям діяльності в Тернопільській області забезпечує відділ інструментально-лабораторного контролю Держекоінспекції в області. Крім того, державний моніторинг масивів поверхневих вод здійснюють Державне агентство водних ресурсів України та його басейнові управління [16].

У Тернопільській області встановлено 16 точок забору проб води, проте щомісячний відбір здійснюється лише з 6 із них. Крім того, здійснюється забір поверхневих вод басейну річки Дністер — 14 проб і 3 проби з поверхневих вод суббасейну річки Прип'ять. Для визначення хімічного стану природних вод проби

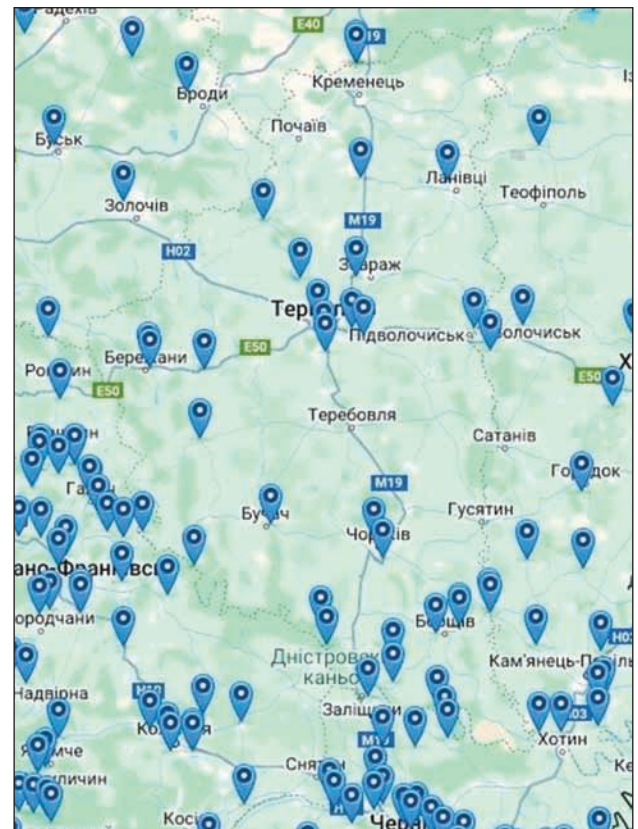


Рис. 1. Відбір проб води в Тернопільській області

Джерело: [13].

відбирають 12 разів на рік, для визначення біологічних показників — 1 раз на рік, а для гідроморфологічних показників — 1 раз на 6 років. Аналізуючи карту заборів проб води, можна помітити, що в Тернопільській області їх набагато менше, ніж у сусідніх областях (див. рис. 1) [5; 13].

Із 2021 року на території Тернопільської області розпочали роботу нові очисні споруди. Унаслідок цього вода в річках стала чистішою, почала збільшуватися локальна флора та фауна. Проте остаточне вирішення проблеми з водоочищенням знову наштовхується на людський чинник і риторичне питання: “Хто кому винен?” [15]. Це, на жаль, свідчить про низький рівень усвідомлення людьми відповідальності за вирішення проблем, що безпосередньо впливають на їхнє здоров’я та життя.

Утворення та поводження з відходами. Побутові відходи з міста Тернополя та Тернопільського району вивозяться на сміттєзвалище поблизу села Малашівці, яке досі функціонує як відкритий полігон. Це спричиняє пряме потрапляння токсичних речовин у відкриті ґрунти. Поверхнева рекультивация території, зрозуміло, не забезпечує повного знезараження відходів і не запобігає проникненню отруйних речовин у підземні води [13].

У 2023 році в Тернопільській області було утворено 1 354,4 тис. тонн відходів, з яких:

- видалено — 32,5 тис. тонн;
- спалено — 3,0 тис. тонн;

- передано іншим суб’єктам господарювання — 1 326,7 тис. тонн;
- відновлено — 93,4 тис. тонн;
- у тимчасовому зберіганні — 93,0 тис. тонн [14].

Рівень утилізації відходів у 2023 році становив 14,1% (табл. 2). Водночас на території області налічується 115 сміттєзвалищ, більшість з яких перенавантажені та не відповідають екологічним нормам. Значна частина з них не має відповідної документації щодо відведення земельних ділянок [5].

Стан природних ресурсів. Аналіз сучасного екологічного стану довкілля області дозволяє виділити найбільш актуальні і складні екологічні проблеми: забруднення атмосфери та гідросфери, проблеми зберігання та утилізації відходів, зокрема хімічних засобів захисту рослин. Головними причинами виникнення цих екологічних проблем є демографічна ситуація, яка ускладнена війною в Україні. Лише в березні 2024 року в Тернополі відбулося засідання круглого столу з питання поводження із відходами, де учасники заходу акцентували увагу на визначенні об’єктів оброблення побутового сміття в області та вимогах щодо роздільного збирання побутових відходів у межах місцевого управління. Варто зазначити, що ще у 2020 році науковці Західноукраїнського національного університету розробили проєкт регіонального плану управління відходами в Тернопільській області до 2030 року [5].

Таблиця 2

Динаміка утилізації відходів у Тернопільській області у 2020–2023 рр., тис. тонн

Критерії	2020	2021	2022	2023	Динаміка +/-
Утворилося	279,8	308,9	315,6	—	0,128
Утворилося відходів протягом року	—	—	—	1354,4	—
Забрано відходів, усього	—	—	—	251,3	—
Одержано від інших підприємств	73,1	153,7	232,5	—	2,181
Використано (утилізовано)	67,4	70,9	81	—	0,202
Спалено	2,1	1,9	1,9	3	-0,095
Направлено в сховища організованого складування (поховання)	36,2	51,9	47,6	—	0,315
Видалено відходів	—	—	—	32,5	—
Передано іншим підприємствам	206,3	166,3	270,8	—	0,313
Передано відходів іншим суб’єктам господарювання, усього	—	—	—	1326,7	—
Наявність відходів на кінець року	617,8	662,9	710,5	93	-0,849
Рівень утилізації відходів, %	24,84	23,5675	26,2674	14,1265	-0,431

Джерело: [5; 14].

Таблиця 3

Динаміка чисельності сільського населення Тернопільської області за 2015–2022 роки

Роки	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Динаміка +/-
Усього населення, млн осіб	1069,9	1065,7	1059,2	1052,3	1045,9	1038,7	1030,6	1021,7	-0,045
Сільське населення, тис. осіб	594,1	590,5	585,6	579,6	572,2	565	558	550,3	-0,073
Частка сільського населення до загальної чисельності, %	0,555	0,554	0,552	0,551	0,547	0,543	0,541	0,538	-0,030

Джерело: [4; 5; 14].

Аналіз даних про стан довкілля сільських територій станом на початок 2024 року показав певні позитивні тенденції щодо його покращення. Однак для забезпечення подальшого розвитку цих територій необхідно продовжувати моніторинг екологічних проблем, прогнозування змін і вирішенням цих проблем шляхом підвищення екологічної свідомості людей та модернізації об'єктів господарювання.

Соціально-економічні та екологічні виклики. Демографічна ситуація в сільських територіальних громадах Тернопільської області суттєво відрізняється за чисельністю населення, що свідчить про нерівномірний демографічний розподіл між територіями. За даними Головного управління статистики у Тернопільській області, станом на 1 січня 2022 року чисельність наявного населення області становила 1021,7 тис. осіб, з яких 550,3 тис. осіб (приблизно 53,9%) проживають у сільській місцевості [5]. Найбільшими територіальними громадами є Збаразька (53 тис. осіб) та Зборівська (52 тис. осіб), тоді як найменшими — Великобірівська (3 тис. осіб) та Козлівська (4 тис. осіб).

У таких сільських і селищних громадах, як Байковецька та Великогаївська, переважає сільське населення (до 100%), яке займається виключно сільськогосподарською діяльністю. У міських громадах, таких як Збаразька, Борщівська та Теребовлянська, значна частина населення — це також селяни. Це створює особливі виклики для місцевих органів влади, які повинні забезпечувати як міську, так і сільську інфраструктуру.

Динаміка чисельності населення Тернопільської області вказує на його скорочення, зокрема селян (табл. 3). Зменшення частки сільських жителів може бути наслідком міграції до міських територій або за межі області, що створює додаткові виклики для розвитку сільських територій і вимагає розроблення відповідних стратегій підтримки.

Критерії та показники стійкості соціально-економічного розвитку. Стійкість соціального розвитку сільських територій Тернопільської області залежить від таких основних чинників:

- *демографічна стабільність* — передбачає підтримку молодих сімей і створення умов для зменшення міграції за рахунок підвищення якості життя людей;
- *економічна стійкість* — базується на розвитку сільського господарства, підтримці малого бізнесу та підвищенні рівня зайнятості й ліквідації безробіття;
- *розвиток інфраструктури* — охоплює транспортне сполучення, медичне та освітнє забезпечення, що є критичними для підвищення якості життя населення;
- *соціальна інтеграція* — спрямована на зміцнення громадських зв'язків, підтримку традиційних форм господарювання та збереження культурної спадщини;
- *екологічна стійкість* — передбачає ефективне використання природних ресурсів, відтворення та збереження навколишнього середовища тощо (рис. 2).

Соціально-економічний розвиток регіону. Макроекономічні показники та аналіз динаміки соціально-економічного розвитку Тернопільської області за 2020–2024 роки показують такі тенденції:

- *валовий регіональний продукт (ВРП)* після незначного зниження у 2020 році (індекс 98,5%) демонструє стабільне зростання, досягнувши 93 930,4 млн грн у 2024 році;
- *середньомісячна заробітна плата* зросла з 10 500 грн у 2020 році до 14 726 грн у 2024 році, що свідчить про покращення рівня життя населення;
- *рівень безробіття* після пікового значення в 2020 році (10,5%) поступово знижується, досягнувши 9,0% у 2024 році (табл. 4).

Для забезпечення ефективного еколого-економічного моніторингу доцільно розробляти

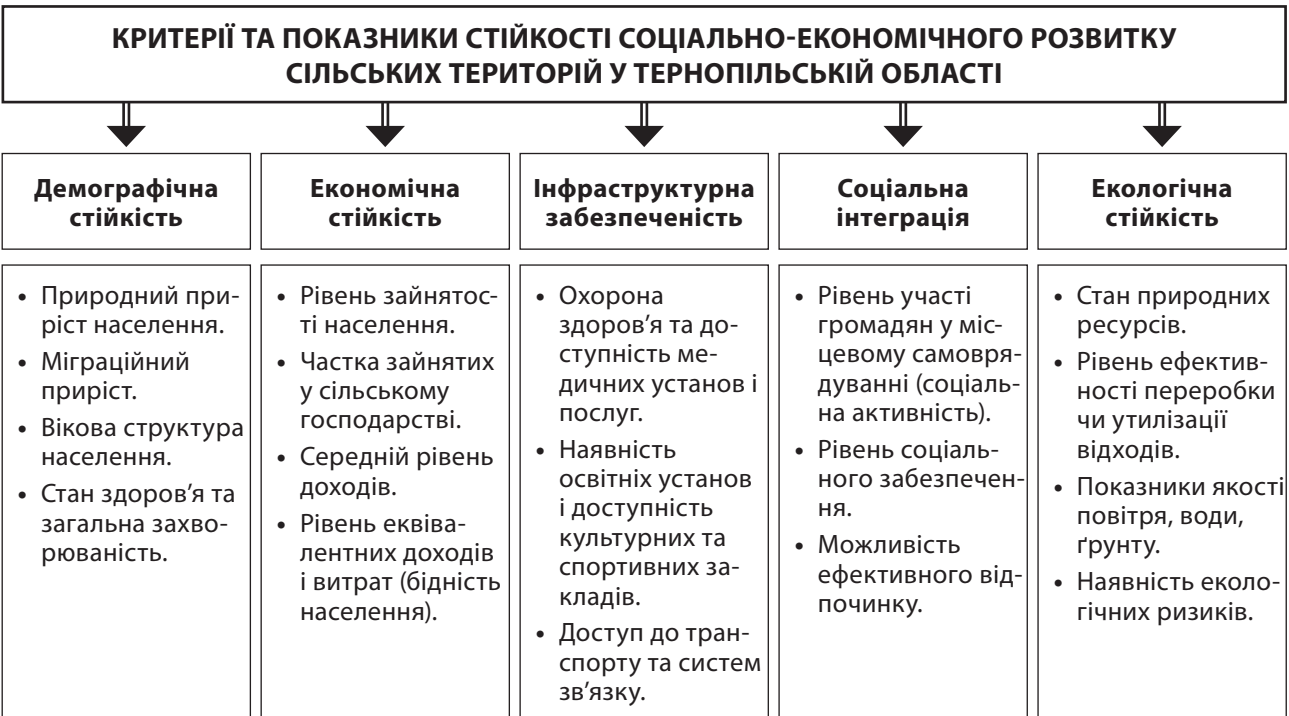


Рис. 2. Критерії та показники стійкості соціально-економічного розвитку сільських територій Тернопільської області

Джерело: розроблено автором на основі [4; 5; 13; 4; 17].

Таблиця 4

Динаміка соціально-економічного розвитку в Тернопільській області за 2020–2024 роки

Роки	Валовий регіональний продукт, млн грн	Індекс фізичного обсягу ВРП, %	Середньомісячна заробітна плата, грн	Рівень безробіття, %
2020	65000,0	98,5	10500	10,5
2021	70000,0	102,0	11500	10,0
2022	75758,3	104,1	12282	9,8
2023	84622,0	104,5	13510	9,2
2024	93930,4	104,6	14726	9,0

Джерело: [5; 14]

та впроваджувати спеціалізоване програмне забезпечення, яке дає змогу оперативно аналізувати великі масиви даних і своєчасно виявляти негативні тенденції у стані довкілля та економіки. Використання таких технологій є важливим інструментом для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на сталий розвиток сільських територій області.

Робота з комп'ютерними програмами для еколого-економічного моніторингу дозволяє користувачам оперативно приймати рішення, враховувати просторові співвідношення об'єктів, особливо якщо такі програми забезпечують можливість візуалізації результатів досліджень

безпосередньо в середовищі прикладних систем обробки тематичних даних [6].

Комп'ютерні програмами для еколого-економічного моніторингу надають користувачам такі можливості:

- створення таблиць даних і тематичних карт;
- редагування об'єктів — можливість створювати нові об'єкти на електронній карті, змінювати, видаляти або об'єднувати їх;
- візуалізація об'єктів на карті, їх вибір, робота з ними, вказування або окреслювання відповідної території;
- операції з шарами статистичної, географічної, екологічної та інших видів інфор-

мації, визначення способів відображення об'єктів, формування підписів, зміна масштабів, управління видимістю окремих шарів, визначення порядку показу та масштабних ефектів;

- *підтримка запитів до баз даних* дозволяє отримувати дані у всіх загальноживаних форматах;
- *доступ до сервера просторових даних* забезпечує доступ до інформації, що зберігається на віддаленому сервері просторових даних тощо [7].

Сьогодні існує значна кількість програмних рішень, орієнтованих на аналіз екологічних та економічних даних. Однак більшість із них зосереджені або на економічних, або на екологічних аспектах.

Наприклад:

- **ESdat, EnviData** — спеціалізуються на екологічному моніторингу, але не враховують економічні чинники.
- **Stata, SPSS** — потужні у сфері економічного аналізу, проте не охоплюють екологічні аспекти.

Інтеграція таких інструментів в єдину платформу сприятиме більш комплексному підходу до оцінки сталого розвитку сільських територіальних громад.

Упровадження алгоритмів штучного інтелекту в моніторингові дослідження дозволить:

- автоматизувати обробку великих масивів даних;
- виявляти приховані закономірності у змінах екологічних показників;
- прогнозувати економічні наслідки екологічних змін;
- оптимізувати управлінські рішення на основі реальних даних.

Це забезпечує ефективніше використання ресурсів і сприяє розробленню стратегій адаптації до змін у довкіллі та економіці.

Упровадження алгоритмів штучного інтелекту в систему моніторингу довкілля забезпечує високий рівень автоматизації обробки даних, виявлення прихованих закономірностей і прогнозування екологічних та економічних змін. Це підтверджує ухвалення обґрунтованих управлінських рішень, ефективне використання ресурсів і розроблення адаптивних стратегій розвитку, що є ключовим чинником сталого розвитку території в умовах динамічних змін довкілля.

ВИСНОВКИ

Отже, спираючись на досвід ЄС, ми маємо прагнути зробити заходи з розвитку сільських

територій більш ефективними та адаптивними до поточних і майбутніх викликів, водночас забезпечуючи підтримку фермерів у створенні стійкого та конкурентоспроможного сільськогосподарського сектору України та її громад. Ці заходи відіграють важливу роль у реалізації ключових стратегій, таких як Європейська “зелена” угода та програма “Від ферми до столу” [18].

Згідно з новою Спільною сільськогосподарською політикою ЄС (CAP ЕС), з 2023 року заходи щодо розвитку сільських територій включені в національні стратегічні плани розвитку сільської місцевості всіх країн Євросоюзу, співфінансуються з національних бюджетів і можуть бути підготовлені на національному або регіональному рівні.

В умовах українських реалій питання обмежених природних і ресурсних можливостей є особливо актуальним та вимагає відповідних зусиль для їх раціонального використання.

Підтримка, розбудова та відновлення сільських територіальних громад вимагають толерантності, людяності та високих моральних якостей, які допоможуть збереженню ресурсної бази територій і найціннішого капіталу нашого суспільства — людей.

Науково обґрунтована методика оцінювання поточного рівня якості життя в різних сільських територіальних громадах дозволить визначити пріоритетні сфери та напрями подальшого відновлення і розвитку. У цьому контексті важливим є застосування сучасних підходів до кількісного аналізу стану сільських територій на основі поєднання передових методів обробки геопросторових даних, машинного навчання та штучного інтелекту [8; 12].

Еколого-економічний моніторинг сільських територій є необхідним для інформаційного забезпечення їхнього збалансованого розвитку. Запровадження інтегрованого програмного забезпечення з використанням штучного інтелекту дозволить підвищити ефективність аналізу даних і сприятиме прийняттю зважених управлінських рішень. А доступ громадян до екологічної інформації сприятиме формуванню їхньої екологічної культури та свідомості, а також розумінню необхідності виховання самодостатньої особистості для зменшення антропогенного навантаження на середовище їхнього існування.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розроблення практичних моделей програмного забезпечення еколого-економічного моніторингу та його адаптацію до умов конкретних територій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нагорнюк О. М., Собчик В. Т. та ін. Методика соціально-екологічного моніторингу та формування екологічної культури сільського населення (на прикладі Східного Поділля): монографія. Херсон: Гринь Д. С., 2014. 136 с.
2. Ше В. В., Нагорнюк О. М., Палапа Н. В. Роль соціально-екологічного моніторингу в подоланні наслідків війни з РФ на сільських територіях. *Russia-Ukraine War: Consequences for the World: V Міжнародна науково-практична інтернет-конф.* (м. Дніпро, 30–31 січня 2025 р.). Дніпро, 2025. С. 262–265.
3. Дані про внутрішньо переміщених осіб. Міністерство соціальної політики України. 2022. URL: <https://www.msp.gov.ua/> (дата звернення: 15.11.2024).
4. Екологічний паспорт Тернопільської області. Управління екології та природних ресурсів Тернопільської обласної державної адміністрації. URL: <https://ecology.te.gov.ua/> (дата звернення: 15.11.2024).
5. Офіційний вебсайт Головного управління статистики у Тернопільській області. URL: <https://ternopil.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 15.11.2024).
6. Бойко В. І., Вовна О. В., Зорі А. А., Порєв В. А. Прилади і системи екологічного моніторингу (вступ до фаху): навчальний посібник. 3-є вид., доповн. і переробл. Донецьк: ДВНЗ “ДонНТУ”, 2013. 292 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi76/0056881.pdf> (дата звернення: 05.02.2025).
7. Височанська М. Я., Палапа Н. В., Ше В. В. Еколого-економічний моніторинг сільських територій за допомогою сучасних комп’ютерних технологій. *Пріоритетні напрями повоєнного відновлення аграрного сектору в аспекті досягнення цілей сталого розвитку*: Міжнародна науково-практична конференція (м. Біла Церква, 6–7 червня 2024 р.). Біла Церква: БНАУ, 2024. С. 155–158.
8. Концепція збалансованого розвитку сільських територій України з урахуванням досвіду європейських країн (наукове видання) / Н. В. Палапа, О. С. Дем’янюк, О. О. Кічігіна та ін.; за науковою редакцією О. І. Фурдичка; ІАП НААН. Київ: ДІА, 2020. 19 с.
9. Палапа Н. В., Нагорнюк О. М., Устименко О. В., Гончар С. М. Сільські території України в умовах воєнної агресії, що спричинена російською федерацією (науково-практичні рекомендації) / за ред. доктора економ. наук, проф., акад. НААН О. І. Дребот. Київ: ІАП НААН, 2023. 36 с.
10. Сільські території в Україні: практика ідентифікації та інструменти розвитку: науково-аналітична доповідь (Серія “Проблеми регіонального розвитку”) / І. З. Сторонянська, І. Р. Залуцький, Х. О. Патицька. Львів: ДУ “Інститут регіональних досліджень імені М. Долишнього НАН України”, 2021. 137 с.
11. Напрями та засоби розвитку сільських територій в контексті зміцнення соціально-економічної безпеки України: монографія. За ред. д.е.н., проф. Т. Г. Васильців, к.е.н., доц. В. В. Бойка. Львів: Ліга-Прес, 2016. 262 с.
12. Палапа Н. В., Ше В. В., Собчик В. Антропогенні причини деградації сільських територій. *Збалансоване природокористування: традиції, перспективи та інновації*: Міжнародна науково-практична конференція (м. Київ, 17–18.10.2024 р.). Київ: ІАП НААН, 2024. С. 125–127.
13. Екологічний паспорт Тернопільської області. Управління екології та природних ресурсів Тернопільської обласної державної адміністрації. URL: <https://ecology.te.gov.ua/> (дата звернення: 15.11.2024).
14. Стан довкілля у Тернопільській області: інформаційно-аналітичний огляд. Тернопіль: Управління екології та природних ресурсів Тернопільської обласної державної адміністрації, 2024. URL: <https://ecology.te.gov.ua/informaciya-pro-stan-dovkillya/2024/> (дата звернення: 15.11.2024).
15. Цвик О., Гадомська Л. Будівництво очисних споруд поблизу тернопільського водозабору: чи є загроза доквіллю. *Суспільне. Тернопіль*. 22 січня 2025. URL: <https://suspilne.media/ternopil/931133-na-ternopilsinsilrada-ne-planue-vidmovlatisa-vid-budivnictva-ocisnih-sporud-bila-vodozaboru/> (дата звернення: 25.02.2025).
16. Очисні споруди в Тернопільській області працюють неефективно: практично не очищаються комунальні стоки у Ланівцях, Кременці, Теребовлі, Шумську, Чорткові, Підволочиську і Бучачі. *ПРО ВСЕ*. 20.01.2011. URL: <https://provse.te.ua/2011/01/ochysni-sporudy-v-ternopilskij-oblasti-pratsyuyut-neefektyvno-praktychno-ne-ochyschayutsya-komunalni-stoky-u-lanivtsyah-krementsi-terebovli-shumsku-chortkovi-pidvolochysku-i-buchachi/> (дата звернення: 15.11.2024).
17. Максименко Н. В., Владимірова О. Г., Шевченко А. Ю., Кочанов Е. О. Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище: підручник для студентів ВНЗ. 3-тє вид., доп. і перероб. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2016. 264 с.
18. CAP performance: 2014–20. A summary of CAP performance and impact across the EU. *Agriculture and rural development*. 2021. URL: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cmef/cap-performance-2014-20_en (дата звернення: 19.02.2025).

ECOLOGICAL AND ECONOMIC MONITORING OF RURAL AREAS USING SOFTWARE TOOLS (ON THE EXAMPLE OF TERNOPIL REGION)

She V.

Postgraduate student

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: vvladimir1987@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5131-0234>

This article examines the current ecological and economic condition of rural areas and the role of ecological and economic monitoring in promoting their environmentally sustainable development. The necessity of regular social, ecological, and economic monitoring is confirmed in order to form a high-quality informational base and

to effectively address environmental issues. The regional features of the development of rural territorial communities in the Ternopil region are outlined. The feasibility of implementing software for ecological and economic monitoring of rural areas in Ternopil region is substantiated. The main problems in the development of rural communities, ecological threats, and socio-economic challenges they face are analyzed. Key approaches and software tools for integrating ecological and economic indicators are studied. The use of artificial intelligence is proposed to enhance the effectiveness of ecological and economic monitoring in Ternopil region.

Keywords: sustainable development, environmental quality, rural territorial communities, modern information technologies, modernization of monitoring research, living standards of the rural population.

REFERENCES

1. Nahorniuk, O. M., Sobchuk, V. T., et al. (2014). *Methodology of socio-environmental monitoring and formation of ecological culture of the rural population (on the example of Eastern Podillia)*. Kherson: Hryn D. S.
2. She, V. V., Nagorniuk, O. M., & Palapa, N. V. (2025). The role of socio-ecological monitoring in overcoming the consequences of the war with the Russian Federation in rural areas. In *Russia-Ukraine War: Consequences for the World: V International Scientific-Practical Internet Conference* (pp. 262–265). Dnipro, Ukraine.
3. Data on internally displaced persons. Ministry of Social Policy of Ukraine. (2022). Retrieved from <https://www.msp.gov.ua/>
4. Environmental passport of the Ternopil region. Department of Ecology and Natural Resources of the Ternopil Regional State Administration. (n.d.). Retrieved from <https://ecology.te.gov.ua/>
5. Official website of Main Department of Statistics in Ternopil Region. (n.d.). Retrieved from <https://ternopil.ukrstat.gov.ua>
6. Boiko, V. I., Vovna, O. V., Zori, A. A., & Porev, V. A. (2013). *Devices and systems of environmental monitoring (introduction to the profession)*: Textbook (3rd ed., supplemented and revised). Donetsk: State Higher Educational Institution "DonNTU".
7. Vysochanska, M. Ya., Palapa, N. V., & She, V. V. Ecological and economic monitoring of rural areas using modern computer technologies. In *Priority directions of post-war recovery of the agricultural sector in the context of achieving sustainable development goals: International scientific and practical conference* (pp. 155–158). Bila Tserkva: BNAU.
8. Palapa, N. V., Demianuk, O. S., Kichigina, O. O., Nagorniuk O. M., Ustymenko, O. V., & Tsybro, Yu. A. (2020). *The concept of sustainable development of rural areas of Ukraine taking into account the experience of European countries* (Scientific publication) (O. I. Furdychko, Ed.). Kyiv: DIA, Institute of Agricultural Economics of NAAS of Ukraine.
9. Palapa, N. V., Nagorniuk, O. M., Ustymenko, O. V., & Honchar S. M. (2023). *Rural areas of Ukraine under conditions of military aggression caused by the Russian Federation: Scientific and practical recommendations* (O. I. Drebot, Ed.). Kyiv: Institute of Agricultural Economics of NAAS of Ukraine.
10. Storonianska, I. Z., Zalutskyi, I. R., & Patytska, K. O. (2021). *Rural areas in Ukraine: Identification practice and development tools* (Scientific-analytical report, Series "Regional Development Issues"). Lviv: M. Dolishnyi Institute of Regional Research of the NAS of Ukraine.
11. Vasylytsiv, T. H., & Boiko, V. V. (Eds.). (2016). *Directions and means of rural development in the context of strengthening Ukraine's socio-economic security*: Monograph. Lviv: Liga-Press.
12. Palapa, N. V., She, V. V., & Sobchuk, V. (2024). Anthropogenic causes of degradation of rural areas. In *Balanced nature management: Traditions, prospects, and innovations*: International scientific-practical conference (pp. 125–127). Kyiv: Institute of Agricultural Economics of NAAS of Ukraine.
13. Department of Ecology and Natural Resources of the Ternopil Regional State Administration. (n.d.). *Ecological passport of the Ternopil region*. Retrieved from <https://ecology.te.gov.ua/>
14. Department of Ecology and Natural Resources of Ternopil Regional State Administration. (2024). *Environmental status in Ternopil region: Information-analytical review*. Retrieved from <https://ecology.te.gov.ua/informaciya-prostan-dovkillya/2024/>
15. Tsyk, O., & Hadomska, L. (2025, January 22). Construction of treatment facilities near the Ternopil water intake: Is there an environmental threat? *Suspilne. Ternopil*. Retrieved from <https://suspilne.media/ternopil/931133-na-ternopilsin-silrada-ne-planue-vidmovlatisa-vid-budivnictva-ocisnih-sporud-bila-vodozaboru/>
16. PRO VSE. (2011, January 20). *Treatment facilities in Ternopil region operate inefficiently: Municipal wastewater is practically untreated in Lanivtsi, Kremenets, Terebovlia, Shumsk, Chortkiv, Pidvolochysk, and Buchach*. Retrieved from <https://provse.te.ua/2011/01/ochysni-sporudy-v-ternopilskej-oblasti-pratsuyut-neefektyvno-praktychno-ne-ochyschayutsya-komunalni-stoky-u-lanivtsyah-krementsi-terebovli-shumsku-chortkovi-pidvolochysku-i-buchachi/>
17. Maksymenko, N. V., Vladymyrova, O. H., Shevchenko, A. Yu., & Kochanov, Ye. O. (2016). *Standardization of anthropogenic impact on the environment: Textbook for university students* (3rd ed., revised and expanded). Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University.
18. European Commission. (2021). *CAP performance: 2014–20. A summary of CAP performance and impact across the EU*. Agriculture and rural development. Retrieved from https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cmef/cap-performance-2014-20_en

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

ШЕ Володимир В'ячеславович — аспірант відділу економіки природокористування в агросфері, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: vvladimir1987@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5131-0234>).

ВПЛИВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА САНІТАРНИЙ СТАН ЛІСІВ

В. В. Мороз

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Західноукраїнський національний університет (м. Тернопіль, Україна)

e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>**Г. Т. Криницький**

доктор біологічних наук, професор

Національний лісотехнічний університет України (м. Львів, Україна)

e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>

У статті представлено результати комплексного дослідження впливу сонячної активності, вираженої числом Вольфа, на санітарний стан лісових екосистем України в контексті змін клімату та глобальних екологічних трансформацій. Основною метою роботи є визначення характеру прямого та відтермінованого зв'язку між індексом сонячної активності та різними категоріями загибелі лісів з урахуванням супутніх кліматичних, біотичних та антропогенних чинників. Наукова новизна дослідження полягає в застосуванні лагового аналізу (із часовою затримкою до трьох років), що дає змогу оцінити інерційні реакції лісових біоценозів на зміну космічних чинників. Методологічну основу дослідження становить статистичний аналіз багаторічних даних (1961–2023 рр.), зокрема коефіцієнтів кореляції Пірсона між числом Вольфа, кліматичними параметрами (температурою, опадами, гідротермічним коефіцієнтом), викидами CO_2 та категоріями ураження лісів (шкідниками, хворобами, погодними чинниками, пожежами, іншими причинами). Отримані результати засвідчили відсутність статистично значущих прямолінійних зв'язків між числом Вольфа та кліматичними індикаторами. Водночас виявлено сильні зв'язки із санітарним станом лісів: зокрема, сильну негативну кореляцію між W та загибеллю лісів від шкідників ($r = -0,74$), а також позитивні лагові кореляції з хворобами ($r = 0,79$) та несприятливими погодними умовами ($r = 0,87$) на межі 2-х років. Додатково встановлено помірний позитивний зв'язок між загибеллю лісів і викидами CO_2 , що свідчить про потенційний зворотний вплив деградаційних процесів на вуглецевий цикл. Результати підтверджують доцільність урахування позаземних (астрофізичних) чинників в екологічному моніторингу та плануванні адаптаційних заходів для збереження стійкості лісових екосистем у контексті зміни клімату. Практичне значення роботи полягає в потенційному використанні отриманих даних для покращення управління лісовими ресурсами, вдосконалення прогнозування ризиків загибелі лісів і розроблення стратегій адаптації до глобальних екологічних викликів.

Ключові слова: температура, опади, гідротермічний коефіцієнт, комахи-шкідники, хвороби, викиди CO_2 , загибель лісів.

.....

ВСТУП

Останні десятиліття характеризуються значним зростанням кількості досліджень, присвячених впливу астрофізичних чинників, зокрема сонячної активності, на екосистеми Землі. Найбільше уваги зосереджено на вивченні механізмів, через які варіації сонячної активності впливають на атмосферну циркуляцію, кліматичні коливання, біологічні ритми та поведінку живих організмів. За даними К. Smith та ін., коливання сонячної активності корелюють зі змінами в глобальних кліматичних режимах [1]. Часто досліджується механізм взаємодії сонячного вітру з геомагнітним полем Землі, що, за В. Tinsley, впливає на формування хмар і, відповідно, на опади [2]. Роботи Н. Koch і Е. Cliver доповнюють ці гіпотези, описуючи

вплив варіацій сонячної радіації на середньострокову атмосферну циркуляцію [3].

Проблема впливу сонячної активності на лісові екосистеми набула особливої актуальності після публікацій Y. Vyklyuk та ін. і J. Gomes з M. Radovanovic, які виявили зростання частоти лісових пожеж у роки підвищеної сонячної активності [4; 5]. I. Usoskin зі співавтор., аналізуючи ^{14}C -дані, продемонстрували довгострокові зміни сонячної активності та їхній зв'язок із температурними аномаліями [6]. Е. Bard і М. Frank разом із G. Bond та ін. простежили взаємозв'язок між інсоляцією та циркуляцією повітряних мас у Північній півкулі, що посилює аргументи на користь кліматичного значення сонячної активності в міжрічному та міжвіковому масштабах [7; 8].

У контексті вуглецевого обміну Y. Pan зі співавтор. підкреслюють, що ліси дедалі менш стабільно поглинають CO_2 , а їхня деградація сприяє посиленню кліматичних змін [9]. Ці висновки доповнюють результати R. Seidl та ін., які показали, що стресові чинники, зокрема кліматичні, значно підвищують ризик загибелі лісів, особливо під впливом шкідників і хвороб [10]. Таким чином, деградація лісових екосистем на тлі сонячно-кліматичних флуктуацій може мати суттєві екологічні та біогеохімічні наслідки.

У XXI столітті, в умовах глобальних екологічних змін, спостерігається не лише зростання кількості екстремальних погодних явищ, а й ускладнення прогнозування природних процесів у біоценозах. Лісові екосистеми відіграють ключову роль у регуляції клімату, вуглецевого балансу та біорізноманіття, проте саме вони часто першими реагують на зміни глобального довкілля [11–13]. Тому дослідження чинників, що впливають на їхній санітарний стан, набуває пріоритетного значення.

На особливу увагу в цьому контексті заслуговує вплив сонячної активності як потенційного каталізатора змін у земному кліматі, циркуляції повітряних мас, частоті атмосферних фронтів і, відповідно, гідротермічних умов росту лісів [6; 14]. Актуальним є питання, чи можуть періодичні цикли сонячної активності, відображені числом Вольфа, мати відтерміновану дію на екологічну стійкість лісових масивів, включно з поширенням хвороб, шкідників і масштабами ураження від несприятливих погодних факторів [4].

Метою нашого дослідження є виявлення статистично значущих зв'язків між індексом Вольфа та основними кліматичними показниками, а також поширеними причинами загибелі лісів в Україні.

Для дослідження було використано два основні набори даних: щорічні значення індексу Вольфа за 1961–2023 роки та інформацію про площі загибелі лісів у 2010–2023 роках, розподілену за основними причинами: пошкодження шкідниками, хвороби, несприятливі погодні умови, лісові пожежі та інші чинники. Крім того, враховано кліматичні показники — середньорічну температуру, кількість опадів і гідротермічний коефіцієнт (далі — ГТК). Уперше проведено комплексну оцінку з урахуванням лагових ефектів (1–3 роки), що дозволяє дослідити потенційну інерційність реакцій лісових екосистем на зміни сонячної активності.

Отримані результати мають практичне значення для моделювання лісових ризиків і розроблення адаптаційних стратегій у контексті глобальних змін.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній науковій літературі спостерігається зростання кількості досліджень, які підтверджують складний взаємозв'язок між сонячною активністю та екологічними змінами на Землі. E. Bard і M. Frank доводять, що варіації інсоляції здатні спричиняти зміни в атмосферній циркуляції, впливаючи таким чином на клімат середніх широт [7]. Аналогічні висновки зробили G. Bond та ін., які на основі морських осадових проксі ідентифікували періоди потепління, пов'язані з підвищенням сонячної активності протягом голоцену [8]. S. Solanki зі співавтор., а також I. Usoskin та ін. показали, що за останні тисячоліття Сонце демонструвало кілька різних режимів активності, які корелювали з довготривалими кліматичними трендами, впливаючи на гідротермічний режим, опади та температуру, що безпосередньо впливає на життєздатність лісових екосистем [6; 14]. Зокрема, періоди мінімальної сонячної активності, як-от мінімум Маундера, асоціюються з похолоданнями, що могли підвищувати вразливість екосистем до патогенів.

Дослідження Y. Vuklyuk зі співавтор., а також J. Gomes та ін. вказують на зв'язок між сонячною активністю та збільшенням частоти лісових пожеж, оскільки висока активність сприяє підвищенню температури та зниженню вологості рослинності, що підвищує її займистість [4; 5]. У регіонах із сезонним дефіцитом опадів це призводить до зростання пожежної небезпеки, що загрожує біомасі та екологічним ланцюгам. B. Tinsley підкреслює роль сонячного вітру у зміні електричних властивостей атмосфери, що опосередковано впливає на хмаротворення та опади [2].

У сфері вуглецевого балансу Y. Pan та ін. зазначають, що ліси залишаються основними поглиначами CO_2 , проте їхня стійкість знижується під впливом стресових чинників [9]. R. Seidl та ін. доводять, що кліматичні порушення, зокрема екстремальні погодні явища та патогенні навантаження, значно підвищують ризик деградації лісів, зменшуючи потенціал поглинання вуглецю та збільшуючи викиди CO_2 через розклад мертвої біомаси [10]. Ці процеси формують зворотний зв'язок, у якому зниження фітобіомаси лісу підсилює концентрацію парникових газів, що, своєю чергою, сприяє подальшим кліматичним змінам.

У Шостому оціночному звіті ІРСС наголошується на необхідності глибокого розуміння ролі природних чинників, зокрема сонячної активності, у формуванні глобальних кліматичних процесів [13]. L. Svalgaard і E. Cliver розробили методику реконструкції довгострокової соняч-

ної активності на основі геомагнітних індексів, що є важливим інструментом для інтеграції астрономічних змін у кліматичне моделювання [15]. Урахування таких реконструкцій у регіональних сценаріях дозволяє точніше оцінити роль природної варіабельності при інтерпретації змін температури, вологості та енергетичного балансу в біосфері.

Незважаючи на численні фундаментальні дослідження, прикладна оцінка впливу сонячної активності на санітарний стан лісів, особливо з урахуванням часових лагів у регіональному контексті, залишається обмеженою. Більшість попередніх робіт зосереджені на загальних кліматичних наслідках або на окремих компонентах лісу, не враховуючи комплексної екосистемної реакції. Тому запропоноване дослідження має на меті емпірично перевірити ці взаємозв'язки в українських лісових екосистемах, застосовуючи нові статистичні методи аналізу для доповнення наявних наукових підходів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому дослідженні використано два основні масиви даних. Перший — щорічні значення числа Вольфа, що є індексом сонячної активності, отримані з відкритих астрономічних архівів за 1961–2023 роки. Число Вольфа традиційно розраховується як сума кількості індивідуальних сонячних плям і десятикратного числа груп плям, що забезпечує надійний кумулятивний показник загального рівня сонячної активності. Для забезпечення однорідності аналізу погодинні дані були усереднені до річних значень.

Другий масив містить статистичні дані про загибель лісів в Україні за 2010–2023 роки з розподілом за основними причинами: пошкодження шкідниками, ураження хворобами, вплив несприятливих погодних умов, лісові пожежі та інші чинники. Джерелом цих даних були щорічні державні звіти про стан лісового фонду та екосистемний моніторинг, що здійснюються профільними державними установами.

Для побудови моделей також використано кліматичні параметри: середньорічну температуру повітря, суму опадів (отримано з національних метеорологічних служб і супутникового моніторингу), та гідротермічний коефіцієнт (ГТК за Селяніновим), розрахований за формулою 1:

$$\text{ГТК} = \frac{R}{0,1 \times \sum T}, \quad (1)$$

де R — сума опадів за період із середньодобовими температурами вище $+10^\circ\text{C}$ (у мм);

$\sum T$ — сума активних температур за той самий період ($^\circ\text{C}$).

Крім того, включено дані про щорічні викиди CO_2 (тис. т), що відображають інтенсивність антропогенного навантаження на екосистеми та можуть взаємодіяти зі змінами клімату.

Аналітичну роботу виконано в кілька етапів. Спочатку проведено описовий аналіз із побудовою гістограм і діаграм розсіювання для первинного виявлення потенційних зв'язків. Далі обчислено парні коефіцієнти кореляції Пірсона між числом Вольфа та іншими змінними для виявлення лінійних взаємозв'язків.

Другий етап передбачав дослідження лагових ефектів, тобто відтермінованого впливу сонячної активності на інші змінні через 1, 2 та 3 роки, за допомогою зміщеної кореляції з відповідними часовими зсувами. Такий підхід дає змогу виявити потенційну інерційність екологічної відповіді на астрономічні чинники, що відповідає сучасним методологіям вивчення часових лагів у кліматичних даних.

Усі розрахунки виконано з використанням мови програмування Python із додатковою верифікацією в Microsoft Excel. Результати подано у вигляді таблиць і графіків, що ілюструють як безпосередні, так і лагові кореляційні зв'язки. Для кожного етапу аналізу проведено інтерпретацію з урахуванням статистичної значущості ($p < 0,05$) та розроблено кілька сценаріїв тлумачення лагових зв'язків залежно від сили і напрямку кореляцій.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Число Вольфа є важливим показником сонячної активності, що визначає кількість сонячних плям і має середню тривалість циклів приблизно 11 років. Представлений графік (рис. 1) демонструє зміни числа Вольфа (W) протягом 1961–2023 років, що характеризує сонячну активність у вигляді циклічних коливань.

На графіку чітко прослідковується циклічність із періодами високої (піки 1979–1981, 1989–1991, 2000–2002) та низької активності (мінімуми 1964–1965, 1975–1976, 1985–1986, 1996–1997, 2007–2009, 2018–2020). Особливо високі значення числа Вольфа відзначені на межі 1980-х та 1990-х років, а також на початку 2000-х, що відповідає найінтенсивнішим фазам сонячних циклів.

Сьогодні глобальні зміни клімату, спричинені антропогенним чинником, є загально-визнаним явищем і впливають на всі природні екосистеми, зокрема на ліси, змінюючи умови їхнього зростання та санітарний стан. Графік на рис. 2 демонструє динаміку середньорічної

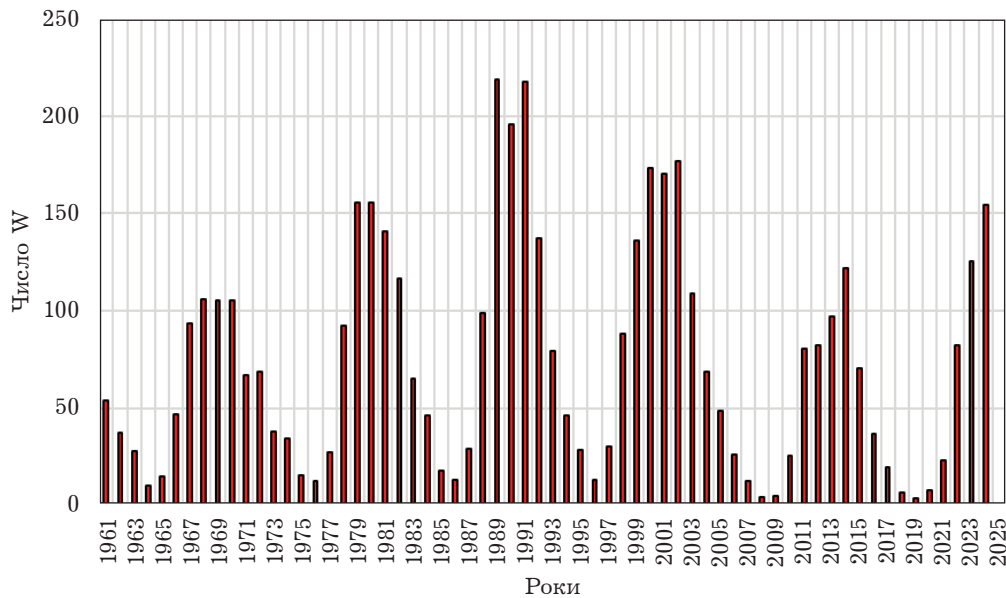


Рис. 1. Динаміка числа Вольфа (сонячної активності) за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

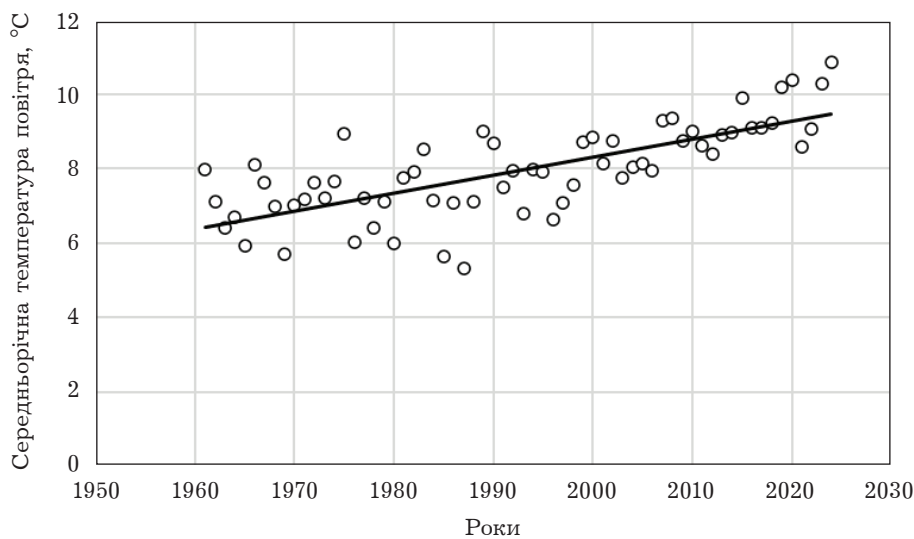


Рис. 2. Динаміка середньорічної температури повітря за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

температури повітря за 1961–2023 роки, що є ключовим показником змін клімату та важливим фактором, який впливає на стан і продуктивність лісових екосистем.

На представленому графіку чітко помітний тренд зростання середньорічної температури протягом аналізованого періоду. Зокрема, середні значення температури піднялися приблизно з 6–7°C у 1960–1970-х роках до 9–10°C на початку 2020-х. Це свідчить про суттєве потепління клімату, що може посилювати стресові чинники для лісів, сприяючи поширенню шкідників, збудників хвороб, а також підви-

щуючи ризик лісових пожеж та екстремальних погодних явищ.

Графік на *рис. 3* представляє динаміку змін середньорічної суми опадів протягом 1961–2023 років. Показник кількості опадів є одним із важливих кліматичних параметрів, що визначають стан і продуктивність лісових екосистем. Умови вологості впливають на фізіологічні процеси рослин, поширення хвороб і шкідників, а також визначають ризики екстремальних явищ, таких як посухи та лісові пожежі.

Аналіз графіка показує, що впродовж усього досліджуваного періоду спостерігається

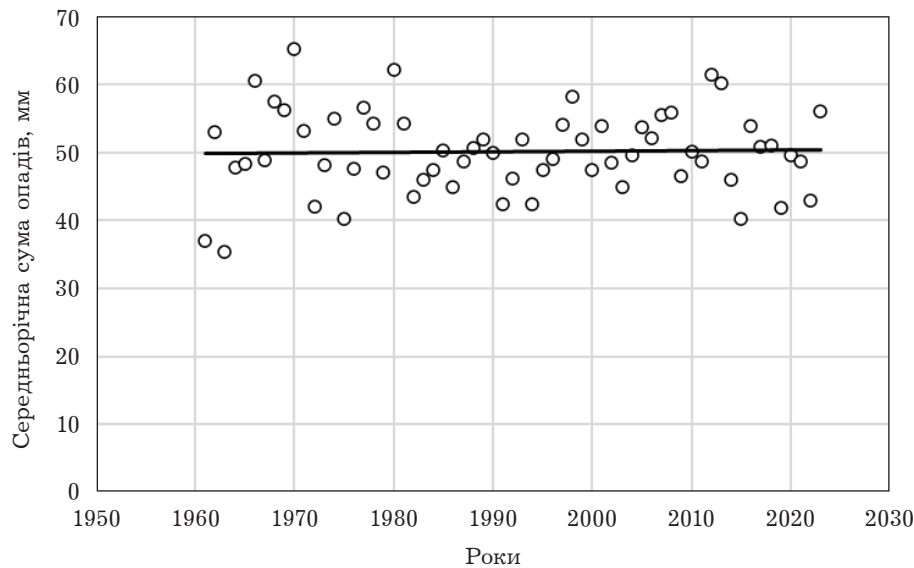


Рис. 3. Динаміка середньорічної суми опадів за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

незначна варіабельність середньорічної суми опадів навколо стабільної середньої величини (приблизно 50 мм). Тренд до істотного збільшення чи зменшення опадів за цей період не простежується. Проте можна відзначити окремі роки з більш високими або низькими показниками, що свідчить про посилення нерівномірності в розподілі опадів і може створювати додаткові стресові умови для лісів.

Відсутність вираженого тренду щодо опадів вказує на те, що зростання температури, зафіксоване на попередньому графіку (рис. 2), не супроводжується адекватним збільшенням опадів, що може підсилювати ризик посух і погіршення водного балансу лісових екосистем. Це

є важливим аспектом, який варто враховувати при прогнозуванні майбутніх станів лісів та розробленні адаптаційних заходів.

Рисунок 4 демонструє зміни гідротермічного коефіцієнта Селянінова з 1961 до 2023 року. ГТК є важливим інтегральним показником, що одночасно враховує умови вологості та температурного режиму, визначаючи забезпеченість рослин вологою у відношенні до їхніх теплових потреб. Значення ГТК понад 1,0 свідчать про достатнє зволоження, тоді як нижчі значення можуть сигналізувати про ризики посушливих умов, небезпечних для лісових екосистем.

Аналізуючи представлений графік, можна спостерігати поступове зниження значень

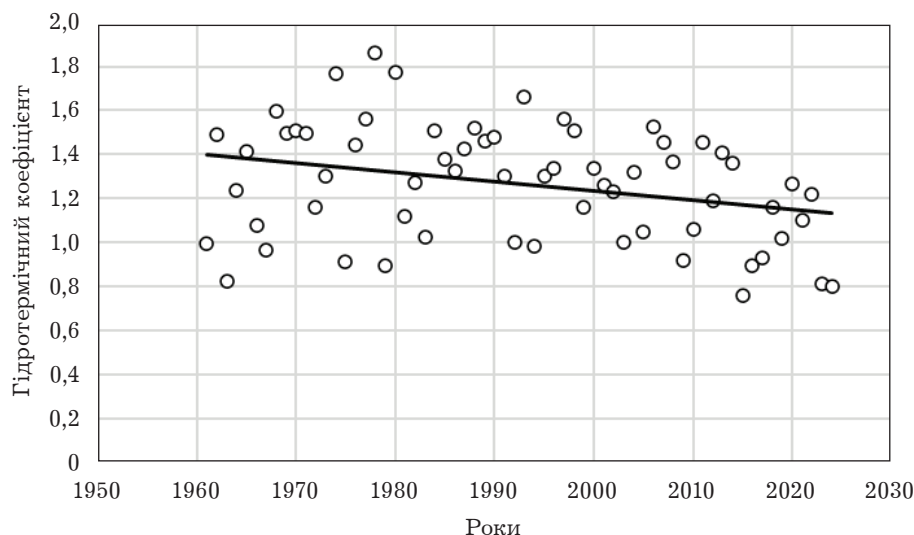


Рис. 4. Динаміка гідротермічного коефіцієнта за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

ГТК — із середнього рівня приблизно 1,4–1,5 у 1960–1970-х роках до майже 1,0–1,1 в останні роки досліджуваного періоду. Це зниження свідчить про поступове погіршення гідротермічних умов, зокрема, через зростання температур за умов недостатньої компенсації кількістю опадів.

Ця тенденція зменшення ГТК є важливою, оскільки вона вказує на зростаючі ризики для лісових насаджень, які стають більш уразливими до посух, стресів та екстремальних погодних явищ. У подальших дослідженнях важливо враховувати цю тенденцію для розроблення адаптаційних заходів і запобігання негативним наслідкам змін клімату для лісових екосистем.

Згідно з наведеними даними (табл. 1), коефіцієнти кореляції між числом Вольфа (індексом сонячної активності) та основними кліматичними показниками — середньорічною температурою повітря ($r = 0,10$), сумою опадів ($r = 0,12$) і гідротермічним коефіцієнтом ($r = 0,06$) — є надзвичайно низькими, що свідчить про дуже слабкий або фактично відсутній прямий зв'язок сонячної активності з цими кліматичними параметрами у 1961–2023 роках. Це означає, що зміни сонячної активності не мають статистично значущого негайного впливу на температуру, опади чи водний баланс у досліджуваному регіоні.

Водночас між середньорічною температурою повітря та ГТК виявлено помірно сильний негативний зв'язок ($r = -0,51$), що вказує на те, що підвищення температури часто супроводжується погіршенням водного балансу і збільшенням ризику посушливих умов. Середньорічна сума опадів має помірний позитивний зв'язок із ГТК ($r = 0,48$), що логічно, оскільки ГТК відображає співвідношення опадів і температури.

Таким чином, на основі наданих даних, вплив сонячної активності, вираженої числом Вольфа, на ключові кліматичні параметри, такі як температура повітря, кількість опадів і гід-

ротермічний коефіцієнт, є надзвичайно слабким або практично відсутнім. Це свідчить про відсутність статистично значущого прямого зв'язку між змінами сонячної активності та зазначеними кліматичними показниками протягом досліджуваного періоду (1961–2023 рр.) або про його мінімальну вираженість.

Додатково було проаналізовано наявність часових затримок між числом Вольфа та основними кліматичними показниками — температурою, опадами, гідротермічним коефіцієнтом Селянінова — із використанням лагів від 0 до 3 років (рис. 5).

На графіку відображено динаміку коефіцієнтів кореляції між числом Вольфа як показником сонячної активності та ключовими кліматичними параметрами (температурою повітря, сумою опадів, гідротермічним коефіцієнтом) із часовими затримками від 0 до 3 років. Це дає змогу виявити можливі відтерміновані ефекти впливу сонячної активності на кліматичні умови.

Для показника опадів спостерігається чітке зниження коефіцієнта кореляції зі збільшенням лага: від позитивного значення на початковому етапі (лаг 0, $r = 0,11$) до помірно негативного на третьому році затримки (лаг 3, $r = -0,29$). Це вказує на поступове посилення негативного впливу сонячної активності на кількість опадів із часовою затримкою. Температура повітря демонструє слабкий позитивний зв'язок із числом Вольфа на початку ($r = 0,10$), з подальшим зниженням до слабо негативного ($r \approx -0,07$), що також свідчить про наявність відтермінованого ефекту. Гідротермічний коефіцієнт характеризується низькими значеннями кореляції, що коливаються близько нуля (від $r = 0,01$ до $r = -0,05$), вказуючи на слабку або майже відсутню чутливість до сонячної активності. Таким чином, аналіз графіка підтверджує, що найбільш виражений лаговий ефект сонячної активності спостерігається для кількості опадів, що підкреслює потенціал використання числа Вольфа

Таблиця 1

Кореляційні зв'язки між числом Вольфа (W), температурою повітря, сумою опадів і гідротермічним коефіцієнтом (ГТК)

Показники	Число W	Середньорічна температура повітря, °C	Середньорічна сума опадів, мм	ГТК
Число W	1,00	—	—	—
Середньорічна температура повітря, °C	0,10	1,00	—	—
Середньорічна сума опадів, мм	0,12	-0,09	1,00	—
ГТК (гідротермічний коефіцієнт)	0,06	-0,51	0,48	1,00

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

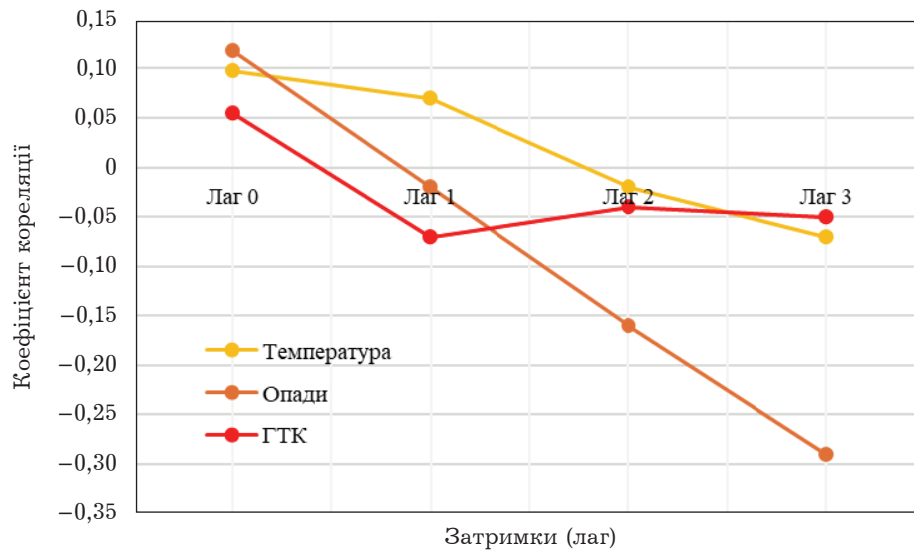


Рис. 5. Динаміка коефіцієнтів кореляції між числом Вольфа (W) та кліматичними показниками із затримкою від 0 до 3 років

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

для довгострокового прогнозування водного балансу, важливого для управління лісовими екосистемами та оцінки ризиків посух.

Періоди зниженої сонячної активності збігаються зі зростанням вразливості лісових екосистем до біотичних ушкоджень, зокрема спричинених шкідниками, що підкреслює необхідність подальшого дослідження таких взаємозв'язків. Динаміка цього показника відіграє важливу роль у прогнозуванні екологічних ризиків, пов'язаних із впливом космічних факторів на стан лісів.

Графік на рис. 6 ілюструє зміни площ загибелі лісів в Україні у 2010–2023 рр. за різними причинами: ураження шкідливими комахами, захворювання лісів, несприятливі погодні умови, лісові пожежі та інші фактори. Цей аналіз дає змогу виявити основні чинники, що спричиняють найбільші втрати лісових масивів, а також простежити їхню динаміку в часі.

Найвищі піки загибелі лісів зафіксовано у 2017, 2018, 2019 та 2022 роках. У ці періоди домінували ураження шкідливими комахами та лісові пожежі, причому особливо значними були площі, уражені пожежами у 2022 році та шкідниками у 2017–2019 роках.

Підвищені втрати лісів від несприятливих погодних умов спостерігалися у 2012–2016 роках, що, ймовірно, пов'язано з екстремальними погодними явищами, такими як посухи, буревії чи аномальні опади.

Захворювання лісів характеризуються порівняно стабільною динамікою з періодичними сплесками, найбільші з яких припадають на 2015 та 2016 роки.

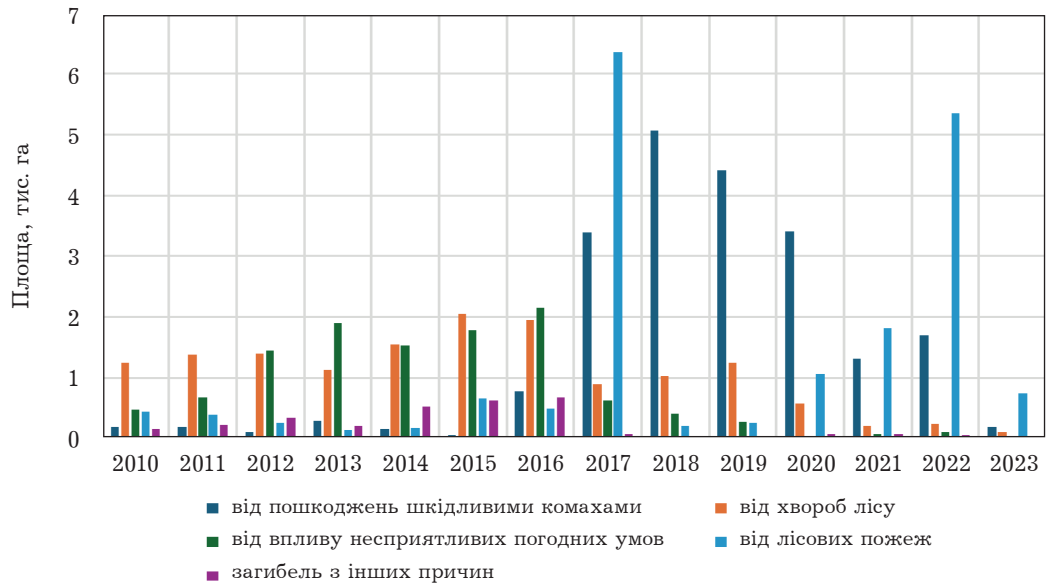
Загибель лісів з інших причин (техногенних, антропогенних факторів) має менші масштаби, але є стабільно наявною протягом усього періоду дослідження.

Отже, аналіз динаміки свідчить, що лісові пожежі та шкідники є основними чинниками загибелі лісових насаджень останнім часом. Ці дані мають важливе значення для розроблення стратегій управління лісами, спрямованих на профілактику пожеж, боротьбу зі шкідниками та адаптацію до кліматичних змін.

Таблиця 2 містить коефіцієнти кореляції між числом Вольфа (показником сонячної активності), середньорічними кліматичними параметрами, обсягами викидів CO₂ та різними причинами загибелі лісів за 2010–2023 роки.

Виявлено значну негативну кореляцію між числом Вольфа (W) та загибеллю лісів унаслідок ураження шкідливими комахами ($r = -0,74$), що свідчить про зростання ризику масових біотичних пошкоджень лісів за умов низької сонячної активності. Спостерігається помірна позитивна кореляція із загибеллю лісів через несприятливі погодні умови ($r = 0,34$), що може свідчити про зв'язок сонячної активності з виникненням екстремальних погодних явищ. Кореляція з температурою повітря є слабкою і негативною ($r = -0,16$), тоді як із кількістю опадів ($r = 0,24$) та гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) ($r = 0,20$) виявлено слабкі позитивні зв'язки.

Середньорічна температура повітря має помітну негативну кореляцію з ГТК ($r = -0,46$) та викидами CO₂ ($r = -0,49$), що може вказувати на посилення кліматичних ризиків і зростання

**Рис. 6.** Динаміка площі загибелі лісів за причинами у 2010–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

Таблиця 2

Кореляційна матриця взаємозв'язків між числом Вольфа, кліматичними показниками, викидами CO₂ та причинами загибелі лісів за 2010–2023 рр.

Показники	Число W	Середньорічна температура повітря, °C	Середньорічна сума опадів, мм	ГТК	Викиди CO ₂ , тис. т	Загибель лісів від пошкоджень шкідливими комахами, тис. га	Загибель лісів від хвороб лісу, тис. га	Загибель лісів від впливу несприятливих погодних умов, тис. га	Загибель лісів від лісових пожеж, тис. га	Загибель з інших причин, тис. га
Число W	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Середньорічна температура повітря, °C	–0,16	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
Середньорічна сума опадів, мм	0,24	–0,33	1,00	–	–	–	–	–	–	–
ГТК	0,20	–0,46	0,18	1,00	–	–	–	–	–	–
Викиди CO ₂ , тис. т	0,32	–0,49	0,31	0,43	1,00	–	–	–	–	–
Загибель лісів від пошкоджень шкідливими комахами, тис. га	–0,74	0,37	–0,27	–0,05	–0,58	1,00	–	–	–	–
Загибель лісів від хвороб лісу, тис. га	0,01	–0,15	–0,09	–0,08	0,57	–0,25	1,00	–	–	–
Загибель лісів від впливу несприятливих погодних умов, тис. га	0,34	–0,31	0,26	0,00	0,50	–0,48	0,81	1,00	–	–
Загибель лісів від лісових пожеж, тис. га	–0,14	–0,09	–0,22	–0,16	–0,53	0,26	–0,44	–0,33	1,00	–
Загибель з інших причин, тис. га	0,30	–0,19	–0,06	–0,15	0,39	–0,53	0,83	0,87	–0,33	1,00

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

емісії CO₂ у періоди підвищених температур. Кількість опадів позитивно корелює з викидами CO₂ ($r = 0,31$) і негативно — з ураженням лісів комахами ($r = -0,27$), підкреслюючи роль достатнього зволоження у зниженні біотичних ризиків.

Спостерігається сильна позитивна кореляція між викидами CO₂ та загибеллю лісів через хвороби ($r = 0,57$), несприятливі погодні умови ($r = 0,50$), а також помірна — з іншими причинами загибелі ($r = 0,39$). Це свідчить про взаємозв'язок, за якого масова загибель лісів сприяє збільшенню викидів CO₂, а високий рівень емісії CO₂ може опосередковано вказувати на погіршення стану лісових екосистем.

Лісові пожежі демонструють негативну кореляцію з викидами CO₂ ($r = -0,53$), що може бути зумовлено тимчасовим зменшенням лісової біомаси після пожеж, знижуючи загальний рівень емісії вуглецю в регіоні.

Отримані результати підкреслюють важливість урахування сонячної активності, кліматичних змін та викидів CO₂ для аналізу і прогнозування санітарного стану лісових екосистем. Особливо значущими є виявлені взаємозв'язки між сонячною активністю, кліматичними чинниками та біотичними загрозами (шкідниками, хворобами), які можуть бути використані для розроблення стратегій адаптації лісових екосистем до майбутніх кліматичних й екологічних викликів.

Для оцінки відтермінованих ефектів сонячної активності на кліматичні та біоекологічні параметри було виконано лаговий аналіз із часовими зсувами на 1, 2 та 3 роки. На *рис. 7* представлено коефіцієнти кореляції Пірсона

між числом Вольфа (W), що характеризує сонячну активність, та такими показниками, як середньорічна температура повітря, кількість опадів, гідротермічний коефіцієнт (ГТК), викиди CO₂, а також причини загибелі лісів.

Середньорічна температура повітря демонструє незначну негативну кореляцію з числом Вольфа, яка слабшає протягом трьох років лагу (від $r = 0,07$ до $r = -0,07$). Це свідчить про відсутність помітного прямого чи відтермінованого впливу сонячної активності на термічні умови регіону.

Кількість опадів характеризується поступовим зниженням кореляції: від слабкої позитивної при лагу 1 ($r = -0,02$) до помірно негативної при лагу 3 ($r = -0,29$). Така динаміка вказує на можливість відтермінованого впливу сонячної активності на гідрологічні умови, який стає більш вираженим через 2–3 роки.

Гідротермічний коефіцієнт, що відображає рівень вологозабезпечення, демонструє найбільш виражену негативну кореляцію при лагу 3 ($r = -0,31$). Це може свідчити про поступове погіршення умов водозабезпечення після періодів підвищеної сонячної активності.

Кореляція між числом Вольфа та викидами CO₂ залишається слабкою, але позитивною, досягаючи максимуму при лагу 1 ($r = 0,13$).

Щодо причин загибелі лісів, найсильніший негативний зв'язок спостерігається між числом Вольфа при лагу 1 та ураженнями лісів шкідниками ($r = -0,72$). Це підтверджує припущення, що зниження сонячної активності сприяє активізації шкідників із затримкою в один рік. Натомість загибель лісів від хвороб ($r = 0,79$) і несприятливих погодних умов

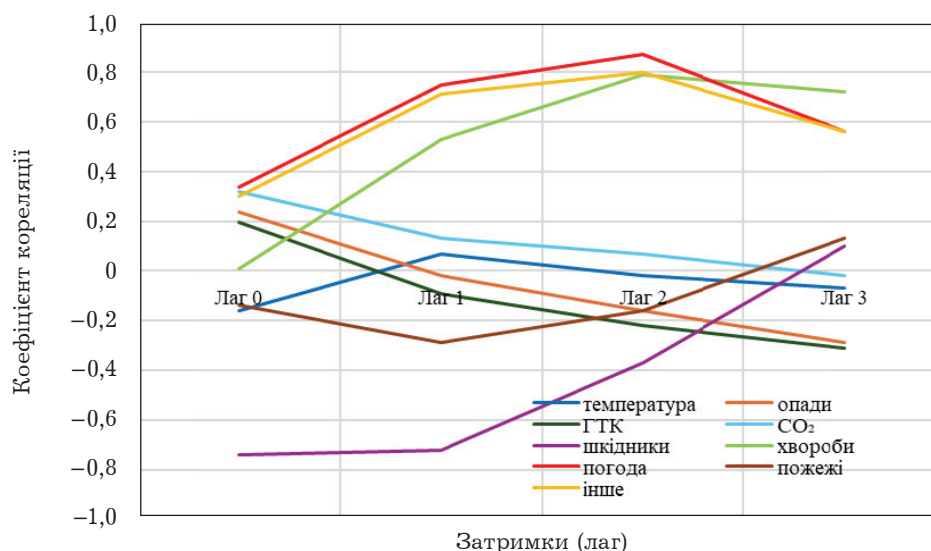


Рис. 7. Лагова кореляція між числом Вольфа та екологічними показниками

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

($r = 0,87$) досягає пікових значень кореляції при лагу 2, що може відображати накопичувальний ефект кліматичних аномалій, пов'язаних із попередньою сонячною активністю.

Загибель лісів з інших причин, таких як техногенні чи комплексні фактори, також має високу кореляцію з числом Вольфа при лагу 2 ($r = 0,80$), що вказує на опосередкований вплив сонячної активності через широкий спектр чинників.

Лісові пожежі не демонструють чіткого зв'язку з числом Вольфа: кореляція варіює від слабкої негативної при лагу 1 ($r = -0,29$) до слабкої позитивної при лагу 3 ($r = 0,13$). Це може свідчити про більшу залежність цього показника від антропогенних або локальних кліматичних умов.

Проведений аналіз показав, що найвиразніші лагові зв'язки між сонячною активністю та екологічними показниками проявляються із затримкою в 1–2 роки. Особливо значущими є залежності, виявлені для уражень лісів шкідниками (лаг 1), а також для пошкоджень від хвороб і погодних стресів (лаг 2). Ці результати підкреслюють інерційність реакції лісових екосистем на позаземні фактори, що потребує врахування при розробленні прогнозних моделей і стратегій адаптаційного управління лісовими ресурсами.

Результати проведеного дослідження розкривають складну природу взаємозв'язків між сонячною активністю, оціненою через число Вольфа, та санітарним станом лісових екосистем в Україні, підкреслюючи наявність відтермінованих ефектів. Виявлено значну негативну кореляцію між числом Вольфа та загибеллю лісів від шкідників ($r = -0,74$), а також помітні лагові зв'язки із затримкою в 1–2 роки, що вказує на опосередкований характер впливу сонячної активності. Цей вплив, ймовірно, реалізується через зміни кліматичних параметрів, таких як температура, вологість і гідротермічний баланс.

Ці спостереження узгоджуються з попередніми науковими працями. Наприклад, K. Smith та ін. наголошували на можливому впливі коливальності сонячної активності на струменеві течії та атмосферну циркуляцію, тоді як B. Tinsley та H. Koch з E. Cliver акцентували на ролі сонячного вітру та радіаційних змін у формуванні глобальних погодних моделей [1–3]. Щодо лісових пожеж і біотичних загроз, результати Y. Vyklyuk та ін. і J. Gomes та співавтор. вказують на зростання їхньої частоти під час піків сонячної активності [4; 5]. Проте наше дослідження виявило протилежну тенденцію: зниження сонячної активності асоціюється з активізацією шкідників, що може бути пов'язано

з послабленням стійкості дерев за несприятливих умов. Цей висновок підтверджується працями Y. Pan зі співавт. та R. Seidl та ін., які показали, що кліматичні стреси підвищують вразливість лісів до біотичних ушкоджень [9; 10].

Особливо цінним є виявлення відтермінованих ефектів: максимальні коефіцієнти кореляції для загибелі лісів від хвороб ($r = 0,79$) і несприятливих погодних умов ($r = 0,87$) спостерігаються з лагом у 2 роки. Це свідчить про інерційність екосистемної відповіді, коли вплив сонячної активності проявляється через накопичення фізіологічного та екологічного стресу. Подібна динаміка згадується в роботах I. Usoskin та ін., які пов'язують цикли сонячної активності з кліматичними аномаліями [6].

Дослідження зв'язку між числом Вольфа та викидами CO_2 підкреслює роль біофізичних процесів у вуглецевому циклі. Позитивна кореляція між викидами CO_2 та загибеллю лісів через хвороби, несприятливі погодні умови та інші причини вказує на зворотний зв'язок: деградація лісів знижує їхню здатність поглинати вуглець, що сприяє накопиченню парникових газів в атмосфері. Цей висновок підтверджується дослідженнями Y. Pan зі співавт., які відзначають глобальне зниження абсорбційної здатності лісів, та R. Seidl та ін., які пов'язують деградацію лісів із кліматичними та біотичними стресами [9; 10].

Результати дослідження також демонструють, що вплив сонячної активності на санітарний стан лісів є багатограним і проявляється як безпосередньо, так і через лагові ефекти. Найвиразнішим є зв'язок із активністю шкідників, де сильна негативна кореляція з числом Вольфа спостерігається як у безпосередньому періоді досліджень, так і з лагом в 1 рік. Це може бути зумовлено послабленням імунної стійкості дерев у періоди низької сонячної активності, що узгоджується з висновками K. Smith зі співавт., I. Usoskin зі співавтор. та S. Solanki та ін. щодо ролі сонячної активності в регіональних кліматичних змінах [1; 6; 14].

Значний лаговий ефект із затримкою у 2 роки, виявлений для загибелі лісів від погодних умов і хвороб, підтримує гіпотезу про поступові зміни кліматичних умов (опадів, вологості, температури) під впливом сонячної активності, які створюють сприятливе середовище для патогенів і кліматичних стресів. Ці ефекти перегукуються з палеокліматичними реконструкціями G. Bond зі співавтор., де сонячна активність корелювала з періодами кліматичних аномалій [8]. Крім того, висновки B. Tinsley про вплив космічного випромінювання на хмарність і H. Koch з E. Cliver про зміни атмо-

сферної циркуляції під дією сонячного вітру додатково підтверджують зв'язок сонячної активності з атмосферними процесами [2; 3].

Отже, наше дослідження узгоджується із сучасними теоретичними й емпіричними підходами до вивчення впливу сонячної активності на біосферу, доповнюючи їх кількісним аналізом. Використання числа Вольфа як індикатора опосередкованих ризиків для лісових екосистем демонструє перспективність удосконалення прогнозних моделей санітарного стану лісів в умовах глобальних кліматичних змін. Отримані дані підкреслюють необхідність урахування лагових ефектів при розробленні ефективних стратегій адаптації лісогосподарства до сучасних екологічних викликів.

ВИСНОВКИ

Дослідження встановило наявність статистично значущих зв'язків між числом Вольфа та станом лісових екосистем. Найсильніший зв'язок спостерігається у вигляді негативної кореляції із загибеллю лісів від шкідників.

Аналіз із лагами виявив затримані ефекти сонячної активності на кліматичні умови та пошкодження лісів. Зокрема, найвищі значення кореляцій зафіксовано через 2 роки для погод-

них ушкоджень ($r = 0,87$) і хвороб ($r = 0,79$), а через 3 роки — для загальної площі загибелі лісів ($r = 0,59$).

Виявлено потенційний зв'язок між сонячною активністю та динамікою опадів із лагом у 3 роки, що вказує на можливий відтермінований вплив на гідрологічні умови та водний баланс.

Встановлено важливу роль викидів CO_2 як показника зворотного зв'язку: підвищення загибелі лісів через кліматичні та біотичні чинники супроводжується зростанням викидів парникових газів, що може посилювати кліматичну кризу.

Отримані результати підтверджують актуальність інтеграції космічних чинників в екологічне моделювання та формування лісогосподарських стратегій, особливо в контексті адаптації до змін клімату.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення часової вибірки, регіональний аналіз, моделювання з урахуванням нелінійних ефектів, а також вивчення міжфакторної взаємодії між сонячною активністю, атмосферою циркуляцією, викидами парникових газів і станом лісів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Smith K. R., Woodward A., Campbell-Lendrum D. et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press; New York, NY, USA, 2014. P. 709–754. URL: <https://www.kirksmith.org/publications/2014/10/15/ipcc-2014-wgii-chapter-11-human-health-impacts-adaptation-and-co-benefits> (accessed: 24.06.2025).
2. Tinsley B. A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Science Reviews*. 2000. Vol. 94 (1–2). P. 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026797127105>
3. Koch H. W., Cliver E. W. A historical review of major solar-terrestrial relationships. *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37 (8). P. 1421–1430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.02.007>
4. Vyklyuk Y., Radovanović M. M., Stanojević G. et al. Connection of Solar Activities and Forest Fires in 2018: Events in the USA (California), Portugal and Greece. *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (24), 10261. <https://doi.org/10.3390/su122410261>
5. Gomes J. F. P., Radovanovic M. Solar activity as a possible cause of large forest fires — a case study: Analysis of the Portuguese forest fires. *Science of the Total Environment*. 2008. Vol. 394 (1). P. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.040>
6. Usoskin I. G., Hulot G., Gallet Y. et al. Evidence for distinct modes of solar activity. *Astronomy & Astrophysics*. 2014. Vol. 562. L10. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423391>
7. Bard E., Frank M. Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 248 (1–2). P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.016>
8. Bond, G., Kromer, B., Beer, J. et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*. 2001. Vol. 294 (5549). P. 2130–2136. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
9. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 2011. Vol. 333 (6045). P. 988–993. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
10. Seidl R., Schelhaas M. J., Rammer W., Verkerk P. J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4 (9). P. 806–810. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
11. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259 (4). P. 660–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
12. Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *IPCC*. Cambridge Univ. Press, 2014. 1150 p. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf (accessed: 24.06.2025).

13. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (accessed: 24.06.2025).
14. Solanki S. K., Usoskin I. G., Kromer B. et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*. 2004. Vol. 431 (7012). P. 1084–1087. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02995>
15. Svalgaard L., Cliver E. W. Long-term geomagnetic indices and their use in inferring solar wind parameters in the past. *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40 (7). P. 1112–1120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.066>

INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE SANITARY CONDITION OF FORESTS

Moroz V.

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor
West Ukrainian National University (Ternopil, Ukraine)

e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>

Krynytskyy H.

Doctor of Biological Sciences, Professor
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>

The article presents the results of a comprehensive study on the impact of solar activity, expressed by the Wolf number, on the sanitary condition of forest ecosystems in Ukraine amid climate change and global environmental transformations. The primary aim of the study is to determine the nature of both direct and delayed relationships between the solar activity index and various categories of forest mortality, considering accompanying climatic, biotic, and anthropogenic factors. The scientific novelty lies in the application of lag analysis with a time delay of up to three years, enabling the assessment of inertial responses of forest biocenoses to changes in cosmic factors. The methodological foundation of the research involved statistical analysis of long-term data (1961–2023), including the calculation of Pearson correlation coefficients between the Wolf number, climatic parameters (temperature, precipitation, hydrothermal coefficient), CO₂ emissions, and categories of forest damage (insects, diseases, adverse weather conditions, fires, and other causes). The results indicate the absence of statistically significant linear relationships between the Wolf number and climatic indicators. However, strong correlations were identified with the sanitary condition of forests: notably, a significant negative correlation between the Wolf number and forest mortality caused by insects ($r = -0.74$), as well as positive lag correlations with diseases ($r = 0.79$) and adverse weather conditions ($r = 0.87$) at approximately a two-year delay. Additionally, a moderate positive association was found between forest mortality and CO₂ emissions, suggesting a potential feedback effect of degradation processes on the carbon cycle. The study's findings confirm the importance of incorporating extraterrestrial (astrophysical) factors into ecological monitoring systems and adaptation planning to preserve the resilience of forest ecosystems under climate change conditions. The practical significance of the work lies in the potential use of the obtained data to enhance forest resource management, improve risk forecasting of forest mortality, and develop adaptation strategies addressing global environmental challenges.

Keywords: temperature, precipitation, hydrothermal coefficient, insect pests, diseases, CO₂ emissions, forest mortality.

REFERENCES

1. Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D. D., Honda, Y., Liu, Q., ... Sauerborn, R. (2014). Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 709–754). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from <https://www.kirksmith.org/publications/2014/10/15/ipcc-2014-wgii-chapter-11-human-health-impacts-adaptation-and-co-benefits>
2. Tinsley, B. A. (2000). Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the tropo-sphere. *Space Science Reviews*, 94(1–2), 231–258. doi: 10.1023/A:1026797127105
3. Koch, H. W., & Cliver, E. W. (2006). A historical review of major solar-terrestrial relationships. *Advances in Space Research*, 37(8), 1421–1430. doi: 10.1016/j.asr.2005.02.007
4. Vyklyuk, Y., Radovanović, M. M., Stanojević, G., Petrović, M. D., Ćurčić, N. B., Milenković, M., ... Gajić, M. (2020). Connection of Solar Activities and Forest Fires in 2018: Events in the USA (California), Portugal and Greece. *Sustainability*, 12(24), 10261. doi: 10.3390/su122410261
5. Gomes, J. F. P., & Radovanovic, M. (2008). Solar activity as a possible cause of large forest fires — A case study: Analysis of the Portuguese forest fires. *Science of the Total Environment*, 394(1), 197–205. doi: 10.1051/0004-6361/201423391
6. Usoskin I. G., Hulot G., Gallet Y. Roth R., Licht A., Joos F., ... Khokhlov, A. (2014). Evidence for distinct modes of solar activity. *Astronomy & Astrophysics*, 562, L10. doi: 10.1051/0004-6361/201423391

7. Bard, E., & Frank, M. (2006). Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2), 1–14. doi: 10.1016/j.epsl.2006.06.016
8. Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., ... Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294(5549), 2130–2136. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
9. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W., ... Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
10. Seidl, R., Schelhaas, M. J., Rammer, W., & Verkerk, P. J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4(9), 806–810. doi: 10.1038/nclimate2318
11. Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M. ... Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
12. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge Univ. Press. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf
13. IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
14. Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M., & Beer, J. (2004). Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431(7012), 1084–1087. doi: 10.1038/nature02995
15. Svalgaard, L., & Cliver, E. W. (2007). Long-term geomagnetic indices and their use in inferring solar wind parameters in the past. *Advances in Space Research*, 40(7), 1112–1120. doi: 10.1016/j.asr.2007.06.066

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

МОРОЗ Віра Василівна — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, директор Навчально-наукового центру сталого енергетичного розвитку та кліматичної безпеки, Західноукраїнський національний університет (вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна, 46000; e-mail: vera_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>).

КРИНИЦЬКИЙ Григорій Томкович — доктор біологічних наук, професор, Національний лісо-технічний університет України (вул. Ген. Чупринки, 103, м. Львів, Україна, 79057; e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

У фінській Лапландії, за 2747 миль від Рима, науковці виявили найстаріше дерево Європи — 1647-річний ялівець, що пережив епоху Римської імперії. Дослідник Університету Падуї, лісовий еколог **Марко Каррер**, разом із командою встановили його вік за допомогою аналізу деревних кілець та сучасних технологій. Не дивлячись на скромні розміри (стовбур лише 10 см у діаметрі), ця рослина демонструє вражаючу життєздатність, що змінює уявлення про довговічність деревних видів. “Це унікальний приклад адаптації до суворих умов, який дає нові відповіді про межі виживання рослин”, — зазначила співавтор дослідження **Анджела Луїза Прендін**.

**РАРИТЕТНЕ ФІТОРІЗНОМАНІТТЯ КЛЮЧОВИХ ТЕРИТОРІЙ
ЕКОЛОГІЧНОЇ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПРИДНІПРОВ'Я****О. В. Мудрак**

доктор сільськогосподарських наук, професор

КЗВО “Вінницька академія безперервної освіти” (м. Вінниця, Україна)

e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1776-6120>**В. Ю. Дубровський**

аспірант

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: viachesd@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3208-935X>

У статті подано інформацію про раритетне фіторізноманіття ключових територій екологічної мережі Центрального Придніпров'я (далі — ЦП). Основою ключових територій виступили такі заповідні території, як заказники загальнодержавного значення. У Законі України “Про природно-заповідний фонд України” передбачено, що заказники створюються з метою збереження природних комплексів. Мета роботи — надати інформацію про місцезнаходження рідкісного фіторізноманіття в заповідниках національного значення в Центральному Придніпров'ї; провести систематичний, біоморфологічний та еколого-морфологічний аналіз рідкісних видів флори; охарактеризувати списки рідкісних видів флори відповідно до соціологічних списків різних рівнів: міжнародного (Міжнародний список охорони природи (МСОП), Світовий червоний список (СЧС), Європейський червоний список (ЄЧС), Бернська конвенція (БК), Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (CITES)), національного (Червона книга України). На території Центрального Придніпров'я розташовано 26 заказників загальнодержавного значення (Черкаська область — 4 об'єкти, Кіровоградська область — 22 об'єкти), з яких ботанічних — 10, ландшафтних — 9, орнітологічних — 3, гідрологічних — 2, лісових і загальнозоологічних — відповідно 1 об'єкт. Місцезнаходження заказників загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я є досить нерівномірним. Наведено результати поширення раритетного фіторізноманіття в заказниках загальнодержавного значення та представлено аналіз за систематичною і біоморфологічною структурою. Родини: Orchidaceae має 9 родів і 12 видів; Fabaceae — 2 роди і 5 видів; Liliaceae — 3 роди та 4 види; Iridaceae та Ranunculaceae — 2 роди та 4 види; Poaceae — 1 рід та 4 види; Asteraceae — 2 роди та 2 види. На частку цих родин припадає 66,0% видового та 57,6% родового різноманіття раритетної флори, інші 10 родин мають від одного до двох видів і родів. Найбільше місцезнаходжень на території заказників зафіксовано для видів: *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. s.l. (incl. *P. bohémica* (Skalicky) Tzvelev = *P. pratensis* (L.) Mill. subsp. *bohémica* Skalicky; *P. dacica* (Rummelsp.) Tzvelev; *P. donetzica* Kotov; *P. nigricans* auct. non Stoeck, nom. illeg.; *P. ucranica* (Ugr.) Wissjul.) сон лучний (сон чорночубий, сон богемський) — 13 об'єктів; *Astragalus dasyanthus* Pall. астрагал шерстистоквітковий — 9 об'єктів та *Adonis vernalis* L. (*Adonanthe vernalis* (L.) Spach, *Chrysocyathus vernalis* (L.) Holub) горичвіт весняний — 8 об'єктів. Було здійснено розподіл раритетного фіторізноманіття за ступенем охорони (міждержавний та національний). Заказники загальнодержавного значення є важливими ключовими територіями для екологічної мережі та мають раритетне флористичне ядро видів.

Ключові слова: природно-заповідний фонд (далі — ПЗФ), екологічна мережа, раритетні види флори, різноманіття природоохоронних територій.

ВСТУП

Згідно зі Стратегією збереження біорізноманіття ЄС до 2030 року (англ. *EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing nature back into our lives*), у структурі Європейського “зеленого” курсу є 17 ключових показників, які повинні досягти європейські країни. Серед них: 1) “щонайменше 30% суходутної території ЄС та 30% морської акваторії ЄС мають становити заповідні екосистеми, які повинні бути інтегровані

в екологічні коридори як частину справжньої Транс'європейської екомережі; 2) суворо охороняти щонайменше третину природоохоронних територій ЄС, охоплюючи всі первинні ліси і праліси, що залишились у ЄС; 3) забезпечити комплекс заходів, які дозволяють зберегти та відновити чутливі до антропогенного навантаження екологічні види рослин і тварин, що є цінними для природних екосистем; 4) здійснювати ефективний менеджмент усіма

територіями, що перебувають під охороною, визначаючи чіткі цілі та заходи щодо збереження, а також відслідковувати їх виконання належним чином” [1].

Україна створює умови для збереження природних територій і розвитку природоохоронної діяльності через заповідання об'єктів. У Законі України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” зазначено, що Україна займає менше 6% площі Європи, але володіє 35% біорізноманіття [2].

Відсоток заповідності в Україні станом на 01.01.2024 становить 6,7%, що є значно меншим, ніж у країнах Європи (21%). Тому, згідно з Державною стратегією сталого розвитку до 2030 року, Україна має збільшити площу земель природно-заповідного фонду та досягти 15% заповідності і 8,85% заповідності загальнодержавного значення [2].

Одним із пріоритетних завдань збереження природних екосистем є створення заповідних об'єктів, зокрема заказників. У статті 3 Закону України “Про природно-заповідний фонд України” вказано, що “залежно від походження, інших особливостей природних комплексів та об'єктів, що оголошуються заказниками, мети і необхідного режиму охорони, заказники поділяються на: ландшафтні, лісові, ботанічні, мікологічні, загальнозоологічні, орнітологічні, ентомологічні, іхтіологічні, гідрологічні, загальногеологічні, палеонтологічні та карстово-спелеологічні”. Згідно зі статтею 25 цього закону, визначено статус і завдання заказників: “заказниками оголошуються природні території (акваторії) з метою збереження і відтворення природних комплексів чи їх окремих компонентів. Оголошення заказників проводиться без вилучення земельних ділянок, водних та інших природних об'єктів у їх власників або користувачів” [3].

Мета роботи — навести інформацію про місцезнаходження раритетного фіторізноманіття заказників загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я як ключових територій екологічної мережі регіону; здійснити систематичний, біоморфологічний та еколого-морфологічний аналіз рідкісних видів флори; охарактеризувати стан рідкісних видів флори за созологічними списками різних рівнів: міжнародного (Міжнародний список охорони природи (МСОП), Світовий червоний список (СЧС), Європейський червоний список (ЄЧС), Бернська конвенція (БК), Конвенція про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення (СІТЕС)), національного (Червона книга України).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Природоохоронні території сприяють захисту біорізноманіття, забезпечують функціонування екосистем і надають екосистемні послуги громадам. Однак лише 16% площі суші у світі перебуває під певною формою захисту, що спонукає міжнародну спільноту до захисту щонайменше 30% до 2030 року [4].

Європейський Союз взяв на себе зобов'язання щодо амбітного плану відновлення біорізноманіття в рамках Стратегії біорізноманіття до 2030 року та Європейського “зеленого” курсу, зосередивши увагу на чотирьох основних аспектах: 1) координація між країнами-членами ЄС та в межах їхніх національних політик; 2) інтеграція збереження біорізноманіття в соціально-економічні сектори; 3) адекватність і достатність фінансування; 4) управління й участь зацікавлених сторін [5].

За останні роки спостерігається зменшення площі природоохоронних територій, унаслідок чого різні країни стикаються з інституційними обмеженнями, порушеннями управління та обмеженими можливостями, хоча мають значний рівень біорізноманіття [6]. Тому важливо розглядати виклики та можливості природоохоронних територій для збереження і відновлення біотичного різноманіття, а також для досягнення Цілей сталого розвитку [7].

Упродовж останніх десятиліть було докладено значних зусиль як для оцінки, так і для збільшення площі земель, призначених для збереження біорізноманіття. Щонайменше 41% територій, що охороняються, управляється шляхом суворого контролю людської діяльності з метою збереження диких територій, 13% відведено окремим видам або оселищам, які часто потребують активного управління, а 25% зберігають як природні, так і культурні цінності та сприяють сталому використанню різних видів ресурсів [8].

Створення природоохоронних територій є ефективним способом збереження біорізноманіття та забезпечення численних функцій екосистемних послуг. Дослідження останніх здебільшого зосереджуються на аналізі просторового розташування, змін площі та ефективності збереження біорізноманіття на природоохоронних територіях, а також на побудові системи конотацій концепції екологічної цінності таких територій [9].

Дослідження раритетного фіторізноманіття здійснюється як на території об'єктів природно-заповідного фонду, так і поза їх межами в різних регіонах України, зокрема: созологічна оцінка рослинного покриву Національного природного парку “Білозерський” [10]; стан фіторізноманіття

маніття гідрологічних заказників Садівської територіальної громади Сумського району [11]; фітосозологічна оцінка території ботанічного заказника “Драбинівка” (Полтавська область) [12]; основні показники видового різноманіття борів природного заповідника “Древлянський” [13]; наукове обґрунтування створення гідрологічного заказника місцевого значення “Куделя” у Київській області [14]; різноманітність фітоценозів урочища “Княгиня” — комплексної пам'ятки природи загальнодержавного значення у Вінницькій області [15].

Встановлення раритетної фракції флори поза межами об'єктів природно-заповідного фонду, зокрема: Notes to vascular plantin Ukraine [16] — знахідки місцезнаходжень рідкісних видів, у тому числі для Центрального Придніпров'я; созологічна характеристика рослинного покриву Буковини [17]; Protected species in grassland habitats of Ukraine [18]; флора і рослинність Південного Правобережного Лісостепу на межириччі Дніпра — Синюхи [19]; первоцвіти берегів річки Боковенька в околицях с. Олександрівка (Кіровоградська область) [20]; флора басейну р. Інгулець: сучасний стан, аутозоологічна оцінка [21]; 50 рідкісних рослин Черкащини [22] та інші.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання: 1) скласти перелік заказників загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я як ключових територій регіональної екомережі; 2) підготувати конспект

раритетної флори; 3) здійснити аналіз таксономічної структури флори; 4) проаналізувати раритетну флору за систематичною структурою (родами, родами і видами); 5) провести біоморфологічний аналіз флори в межах зазначених територій.

Використані методи для дослідження: аналітично-діагностичний, порівняльний, експедиційний (польовий) і камеральний. Під час застосування камерального методу досліджували гербарні та літературні дані щодо місцезнаходжень видів флори.

Номенклатура таксонів вищих судинних рослин подана за S. L. Mosyakin та M. M. Fedoronchuk у “Vascular plants of Ukraine” [23].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Заказники є однією з форм природно-заповідного фонду України, що створюються для збереження рідкісних природних комплексів і біорізноманіття. Залежно від особливостей природних комплексів та об'єктів, що на них розташовані, вони можуть бути різних типів: ландшафтні, лісові, ботанічні, мікологічні, загальнозоологічні, орнітологічні, ентомологічні, іхтіологічні, гідрологічні, загальногеологічні, палеонтологічні та карстово-спелеологічні.

Перелік заказників загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я як ключових територій екомережі регіону представлений у табл. 1.

Станом на 01.01.2025 на території Центрального Придніпров'я розташовано 26 заказників загальнодержавного значення. За кількіс-

Таблиця 1

Перелік заказників загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я

№ з/п	Види і назви заказників	Площа, га	Структура раритетної фракції флори (СЧС/МСОП/CITES/ЄС/БК/ЧКУ// усього)
1	“Войнівський” (Ко)	50,0000	2 / 1 / – / 1 / 1 / 5//10
2	“Когутівка” (Ко)	120,0000	1 / 1 / 1 / – / – / 1//4
3	“Миколаївський” (Ко)	133,0000	– / – / 1 / – / 1 / 3//5
4	“Чорноліський” (Ко)	3491,0000	– / – / 4 / – / – / 8//12
5	“Монастирище” (Ко)	15,3000	3 / – / – / 1 / – / 10//13
6	“Чорноташлицький” (Ко)	15,0000	2 / – / – / 1 / – / 3//6
7	“Шумок” (Ко)	20,1000	– / – / – / – / 1 / 1//2
8	“Тарасів обрій” (Чо)	716,0000	– / – / 3 / 2 / 1 / 4//10
9	“Сулинський” (Чо)	7871,0083	– / – / 2 / 1 / 1 / 2//6
10	“Велика стінка” (Ко)	43,5000	– / – / – / – / – / 1//1
11	“Садківський степ” (Ко)	362,3000	1 / – / – / 1 / – / 1//3
12	“Богданівська балка” (Ко)	25,2000	1 / 1 / – / 1 / – / 6//9

Закінчення таблиці 1

№ з/п	Види і назви заказників	Площа, га	Структура раритетної фракції флори (СЧС/МСОП/СІТЕС/ЄЧС/БК/ЧКУ// усього)
13	“Боковеньківська балка” (Ко)	15,0000	1 / 1 / - / 1 / - / 5//8
14	“Бузове” (Ко)	50,7000	1 / - / - / 1 / - / 5//7
15	“Власівська балка” (Ко)	130,7000	- / 1 / - / - / - / 3//4
16	“Гранітний степ” (Ко)	13,3000	1 / 1 / - / 1 / - / 6//9
17	“Лікарівський” (Ко)	70,0000	- / 2 / - / - / - / 6//8
18	“Цюпина балка” (Ко)	36,0000	1 / - / - / 1 / - / 1//3
19	“Шурхи” (Ко)	38,3000	2 / 1 / - / 1 / - / 5//9
20	“Русько-Полянський” (Чо)	166,0000	- / 2 / 4 / - / 1 / 9//16
21	“Бандурівські ставки” (Ко)	385,6000	- / - / - / - / - / -//-
22	“Редьчине” (Ко)	118,0000	- / - / - / - / - / -//-
23	“Липівський” (Чо)	4631,7000	- / - / - / - / - / -//-
24	“Полозова балка” (Ко)	27,0000	1 / - / - / - / - / 1//2
25	“Велика Вись” (Ко)	568,0000	- / - / - / - / - / -//-
26	“Шуляцьке болото” (Чо)	940,0000	- / - / 3 / - / 1 / 3//7
Усього		20052,7100	

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

Примітка: Ко — Кіровоградська область, Чо — Черкаська область.

ттю та площею вони розподіляються наступним чином: *ландшафтні* (9 заказників (34,62%), 12624,64 га (62,36%)); *лісові* (1 заказник (3,85%), 43,5 га (0,21%)); *ботанічні* (10 заказників (38,46%), 907,5 га (4,48%)); *орнітологічні* (3 заказники (11,54%), 5 135,3 га (25,36%)); *загальнозоологічні* (1 заказник (3,85%), 27,0 га (0,13%)); *гідрологічні* (2 заказники (7,69%), 1508,0 га (7,45%)). Майже однакову кількість мають *ботанічні* (38,46%) і *ландшафтні* (34,62%) заказники, а найменшу кількість — *загальнозоологічні* (3,85%).

За площею найбільше ландшафтних заказників — 62,36%, а найменші площі мають загальнозоологічні — 0,13%. Серед заказників найбільшими за площами є: ландшафтний “Сулинський” (7871,0083 га), орнітологічний “Липівський” (4631,7 га), ландшафтний “Чорноліський” (3491,0 га) і гідрологічний “Шуляцьке болото” (940,0 га). Найменшими за площами є: ландшафтний “Чорноташлицький” (15,0 га), ботанічний “Боковеньківська балка” (15,0 га) та ботанічний “Гранітний степ” (13,3 га).

Під час проведення порівняльного аналізу за кількісними показниками (площами) найбільші площі має Черкаська область (71% від площі заказників ЦП), але за кількістю заказників переважає Кіровоградська область (80,77% від кількості заказників ЦП). Середня площа заказників загальнодержавного значення для Кіровоградської області становить 272,76 га,

для Черкаської — 2864,9417 га, а загалом для Центрального Придніпров'я — 771,26 га.

Нижче наведено конспект раритетної флори Центрального Придніпров'я за систематичною структурою та представлені біоморфологічні дані видів флори.

Polypodiophyta, Polypodiopsida
Salviniaceae

Salvinia natas (L.) All., сальвінія плаваюча, 1) монокарпик, терофіт; 2) ландшафтні заказники: “Тарасів обрій”, “Сулинський”; орнітологічний заказник “Липівський”;

Magnoliophyta, Liliopsida
Amaryllidaceae

Allium ursinum L. (*A. ucrainicum* (Kleopow et Oxner) Bordz.; *A. ursinum* L. subsp. *ucrainicum* (Kleopow et Oxner, *A. ursinum* var. *ucrainicum* (Kleopow et Oxner) Soó), цибуля ведмежа, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Чорноліський”;

Ornithogalum boucheanum (Kunth) Asch., рястка Буше, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічні заказники: “Бузове”, “Богданівська балка”;

Iridaceae

Iris aphyllia (incl. *Iris hungarica* Waldst. & Kit.), півники угорські, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Миколаївський”;

Iris pontica Zapał. півники понтичні, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник

“Войнівський”; ботанічний заказник “Богданівська балка”, “Шурхи”, “Лікарівський”;

Iris sibirica L., півники сибірські, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Тарасів обрій”;

Liliaceae

Fritillaria ruthenica Wikstr., рябчик руський, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Монастирище”;

Lilium martagon L., лілія лісова, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Миколаївський”; ботанічний заказник “Русько-Полянський”;

Tulipa hypanica Klokov et Zoz (~ *T. biebersteiniana* Schult.f. s.l.), тюльпан бузький, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічні заказники: “Гранітний степ”, “Лікарівський”, “Бузове”; ландшафтний заказник “Монастирище”;

Tulipa quercetorum Klokov et Zoz (*T. biebersteiniana* Schult.f. s.l.), тюльпан дібровний, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Чорноліський”; ботанічний заказник “Власівська балка”;

Orchidaceae

Anacamptis coriophora (L.) R.M. Bateman, Pridgeon et M.W. Chase s.l. (*Orchis coriophora* L., incl. *Orchis nervulosa* Sakalo, *Anacamptis coriophora* subsp. *nervulosa* (Sakalo) Mosyakin et Tymchenko), зозулинець блошичний (Плодоріжка блощицна), 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник “Тарасів обрій”;

Anacamptis palustris (Jacq.) R. M. Bateman, Pridgeon et M. W. Chase (*Orchis palustris* Jacq.), зозулинець болотний (Плодоріжка болотна), 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтні заказники: “Тарасів обрій”, “Сулинський”;

Cypripedium calceolus L., зозулині черевички справжні, 1) полікарпик, геофіт у; 2) ботанічний заказник “Русько-Полянський”;

Dactylorhiza incarnata (L.) Soo' s.l. (*D. cruenta* (O.F.Mull.) Soo; *D. ochroleuca* (Boll) Holub; *Dactylorhiza incarnata* (L.) Vermeulen, *Orchis incarnata* L., *O. latifolia* L., nom. rej.), зозульки м'ясочервоні (Пальчатокорінник м'ясочервоний), 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтні заказники: “Тарасів обрій”, “Сулинський”; гідрологічний заказник “Шуляцьке болото”;

Epipogium aphyllum Sw., надбородник безлистяний, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічний заказник “Русько-Полянський”;

Epipactis atrorubens (Hoffm. ex Bernh.) Besser (*E. atropurpurea* auct. non Raf., *E. rubiginosa* (Crantz) Gaudin ex W.D.J. Koch), коручка темно-червона, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник “Миколаївський”; ботанічний заказник “Русько-Полянський”;

Epipactis helleborine (L.) Crantz. (*E. latifolia* (L.) All.), коручка широколиста, 1) полікарпик,

гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: “Когутівка”; “Чорноліський”;

Epipactis palustris (L.) Crantz. (*E. longifolia* All., *Serapias helleborine* L. var. *palustris* L.), коручка болотна, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник “Чорноліський”;

Hammarbya paludosa (L.) O. Kuntze (*Malaxis paludosa* (L.) Sw.; *Orchis paludosa* L.), хамарбія болотна, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) гідрологічний заказник “Шуляцьке болото”;

Neottia nidus-avis (L.) Rich. (*Ophrys nidus-avis* L., *Neottia vulgaris* Kolb.), гніздівка звичайна, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічний заказник “Русько-Полянський”; ландшафтний заказник “Чорноліський”;

Neottia ustulata (L.) R.M. Bateman, Pridgeon et M.W. Chase (*Orchis ustulata* L.), неотінея обпалена (зозулинець обпалений) 1) полікарпик, геофіт; 2) гідрологічний заказник “Шуляцьке болото”;

Platanthera bifolia (L.) Rich. (*Orchis bifolia* L.), любка дволиста, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічний заказник “Русько-Полянський”; ландшафтний заказник “Чорноліський”;

Poaceae

Stipa borysthena Klokov ex Prokudin (*S. joannis* Čelak. subsp. *sabulosa* (Pacz), Lavrenko, *S. pennata* L. subsp. *sabulosa* (Pacz) Tzvelev, *S. sabulosa* (Pacz.) Sljuss.), ковила дніпровська, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник “Тарасів обрій”;

Stipa lessingiana Trin. et Rupr., ковила Лесінга, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ботанічні: “Боковеньківська балка”, “Гранітний степ”, “Шурхи”, “Лікарівський”, “Богданівська балка”; ландшафтний “Монастирище”;

Stipa pennata L., ковила периста (ковила пірчаста), 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ботанічний заказник “Боковеньківська балка”; ландшафтний “Монастирище”;

Stipa pulcherrima K. Koch (*S. grafiana* Steven), ковила найкрасивіша, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ботанічні заказники: “Бузове”, “Богданівська балка”;

Magnoliopsida

Apiaceae

Ostericum palustre (Besser) Besser, маточник болотний, 1) малорічник, терофіт; 2) гідрологічний заказник “Шуляцьке болото”;

Asteraceae

Jacobaea borysthena (DC.) B. Nord. & Greuter (Sofieva) B. Nord. & Greuter (*Senecio borysthenicus* (DC.) Andr. ex Czern.), жовтозілля дніпровське, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник “Тарасів обрій”;

Tragopogon ucrainicus Artemczuk, козельці українські, 1) малорічник, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник “Тарасів обрій”;

Berberidaceae

Gymnospermium odessanum (DC.) Takht. (*Leontice altaica* Pall. var. *odessana* DC., *L. odessana* (DC.) Fisch.), гімноспермій одеський, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтний заказник "Монастирище";

Caryophyllaceae

Dianthus hypanicus Andrzej., гвоздика бузька, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: "Войнівський", "Шумок";

Celastraceae

Euonymus nana M. Bieb., бруслина карликова, 1) кущ, хамефіт; 2) ландшафтний заказник "Чорноліський";

Crassulaceae

Sedum borissovae Balk., очиток Борисової, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: "Войнівський", "Когутівка"; "Монастирище", "Чорноташлицький"; ботанічний заказник "Шурхи"; загальнозоологічний заказник "Полозова балка";

Fabaceae

Astragalus dasyanthus Pall., астрагал шерстиковитковий, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: "Чорноташлицький", "Войнівський"; ботанічні заказники: "Богданівська балка", "Боковеньківська балка", "Гранітний степ", "Шурхи", "Садківський степ", "Цюпина балка", "Бузове";

Astragalus henningii (Steven) Boriss. (incl. *A. novoascanicus* Klokow, *A. buchtormensis* auct. non Pall.), астрагал Хеннінга, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник "Монастирище";

Astragalus odessanus Besser (*A. cornutus* auct. non Pall.), астрагал одеський, 1) полікарпик, хамефіт; 2) ландшафтний заказник "Монастирище";

Astragalus ponticus Pall., астрагал понтійський, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник "Чорноташлицький";

Securigera elegans (Pančić) Lassen (*Coronilla elegans* Pančić; *C. latifolia* (Hazsl.) Jav.), сокиронисиця струнка (В'язіль стрункий), 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: "Чорноліський", "Монастирище";

Lamiaceae

Scutellaria verna Besser (~ *S. Supina* L. s.l.), шоломниця весняна, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник "Монастирище";

Polygonaceae

Rumex ucrainicus Fisch. ex Spreng., щавель український, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтний заказник "Сулинський";

Ranunculaceae

Adonis vernalis L. (*Adonanthe vernalis* (L.) Spach, *Chrysocyathus vernalis* (L.) Holub), гори-

цвіт весняний, 1) полікарпик, геофіт; 2) ландшафтні заказники: "Войнівський"; ботанічні заказники: "Богданівська балка", "Боковеньківська балка", "Гранітний степ", "Шурхи", "Братерські яри", "Лікарівський", "Власівська балка";

Adonis wolgensis Steven ex DC. (*Adonanthe wolgensis* (Steven ex DC.) Chrték et Slavikova; *Chrysocyathus wolgensis* (Steven ex DC.) Holub), горицвіт волзький, 1) полікарпик, геофіт; 2) ботанічні заказники: "Гранітний степ", "Лікарівський";

Pulsatilla patens (L.) Mill. s.l. (*Anemone patens* L., *P. latifolia* Rupr.; incl. *P. kioviensis* Wissjul., *P. wolfgangiana* (Besser) Rupr.), сон розкритий (с. широколистий), 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ботанічний заказник "Русько-Полянський";

Pulsatilla pratensis (L.) Mill. s.l. (incl. *P. bohemica* (Skalicky) Tzvelev = *P. pratensis* (L.) Mill. subsp. *bohemica* Skalicky; *P. dacica* (Rummelsp.) Tzvelev; *P. donetzica* Kotov; *P. nigricans* auct. non Stoerck, nom. illeg.; *P. ucranica* (Ugr.) Wissjul.), сон лучний (с. чорніючий, с. богемський), 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) ландшафтні заказники: "Чорноташлицький", "Войнівський", "Монастирище", "Миколаївський"; ботанічні: "Богданівська балка", "Боковеньківська балка", "Гранітний степ", "Шурхи", "Лікарівський", "Бузове", "Власівська балка", "Русько-Полянський"; загальнозоологічний заказник "Полозова балка";

Scrophulariaceae

Scrophularia vernalis L., ранник весняний, 1) полікарпик, гемікриптофіт; 2) лісовий заказник "Велика стінка";

Thymeleaceae

Daphne sneorum L., вовчі ягоди пахучі, 1) напівкущик, хамефіт; 2) ботанічний заказник "Русько-Полянський".

У табл. 2 наведена таксономічна структура раритетної флори Центрального Придніпров'я.

Відповідно до систематичного аналізу за родиними, родами та видами, найбільшу кількість родів і видів мають: *Orchidaceae* (9 родів (27,3%), 12 видів (25,5%)), *Fabaceae* (2 роди (6,1%), 5 видів (10,6%)), *Liliaceae* (3 роди (9,4%), 4 види (8,5%)), *Iridaceae*, *Ranunculaceae* (2 роди (6,1%), 4 види (8,5%)), *Poaceae* (1 рід (3,1%), 4 види (8,5%)), *Asteraceae* (2 роди (6,1%), 2 види (4,2%)). На частку цих родин припадає 66,0% видового та 57,6% родового різноманіття раритетної флори. Інші 10 родин мають від одного до двох видів і родів.

За біоморфологічним аналізом флори переважають полікарпіки — 41 вид (89,1%), інші життєві групи мають 1–2 види. Згідно з еколого-морфологічним аналізом, майже однакову кількість займають гемікриптофіти — 22 види

Таблиця 2

Таксономічна структура раритетної флори Центрального Придніпров'я

Відділ	Родини		Роди		Види	
	к-сть	%	к-сть	%	к-сть	%
<i>Lycopodiophyta</i>	—	—	—	—	—	—
<i>Equisetophyta</i>	—	—	—	—	—	—
<i>Polypodiophyta</i>	1	5,5	1	3,1	1	2,2
<i>Pinophyta</i>	—	—	—	—	—	—
<i>Magnoliophyta</i>	17	94,5	31	96,9	45	97,8
<i>Liliopsida</i>	5	27,8	16	50,0	25	54,4
<i>Magnoliopsida</i>	12	66,7	15	46,9	20	43,4
Усього	18	100	32	100	46	100

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

(47,8%), та геофіти — 19 видів (41,3%). Решта життєвих форм представлені 2–3 видами.

У результаті аналізу раритетної флори заказників загальнодержавного значення було встановлено, що до Міжнародного списку охорони природи за категорією “уразливий” віднесений вид *Dianthus hypanicus* [24].

До Світового червоного списку за категорією “рідкісні” віднесено 4 види: *Gymnospermium odessanum*, *Sedum borissovae*, *Astragalus dasyanthus*, *Astragalus henningii*.

До Європейського червоного списку за категорією “рідкісні” віднесено 4 види: *Jacobaea borysthena*, *Tragopogon ucrainicus*, *Rumex ucrainicus*, а до категорії “невизначені” — *Astragalus henningii* [25].

До Додатку 1 Бернської конвенції внесено 5 видів: *Salvinia natas*, *Iris aphyllia*, *Ostericum palustre*, *Dianthus hypanicus*, *Pulsatilla patens* [26].

До Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори, що перебувають під загрозою зникнення, внесено 12 видів: *Anacamptis coriophora*, *Anacamptis palustris*, *Cypripedium calceolus*, *Dactylorhiza incarnata*, *Epipogium aphyllum*, *Epipactis atrorubens*, *Epipactis helleborine*, *Epipactis palustris*, *Hammarbya paludosa*, *Neottia nidus-avis*, *Neotinea ustulata*, *Platanthera bifolia* [27].

До Червоної книги України увійшли 40 видів, з яких 22 види віднесено до категорії “вразливі”: *Iris pontica*, *Iris sibirica*, *Fritillaria ruthenica*, *Tulipa hypanica*, *Tulipa quercetorum*, *Anacamptis coriophora*, *Anacamptis palustris*, *Cypripedium calceolus*, *Dactylorhiza incarnata*, *Epipactis atrorubens*, *Epipactis palustris*, *Stipa borysthena*, *Stipa pennata*, *Stipa pulcherrima*, *Gymnospermium odessanum*, *Dianthus hypanicus*, *Euonymus nana*, *Astragalus dasyanthus*,

Astragalus ponticus, *Securigera elegans*, *Scrophularia vernalis*, *Daphne cneorum* [28; 29].

Категорія “зникаючі” представлена 3 видами: *Epipogium aphyllum*, *Hammarbya paludosa*, *Neotinea ustulata*.

Категорія “рідкісні” охоплює 3 види: *Astragalus henningii*, *Astragalus odessanus*, *Scutellaria verna*.

Категорія “неоцінений” охоплює 12 видів: *Allium ursinum*, *Ornithogalum boucheanum*, *Crocus reticulatus*, *Lilium martagon*, *Epipactis helleborine*, *Neottia nidus-avis*, *Stipa lessingiana*, *Platanthera bifolia*, *Adonis vernalis*, *Adonis wolgensis*, *Pulsatilla patens*, *Pulsatilla pratensis*.

Ключову роль у збереженні фіторізноманіття відіграють систематичні моніторингові дослідження, які забезпечують актуальні дані про стан популяцій, зміни ареалів, чинники загрози та ефективність охоронних заходів.

Комплексні охоронні заходи щодо збереження раритетної флори містять такі напрями: 1) правові (охорона середовищ існування через створення ПЗФ; занесення видів до міжнародних, національних і регіональних списків; відповідальність за знищення рідкісних видів); 2) біоекологічні (інвентаризація і моніторинг популяцій рідкісних видів); 3) територіальні та ландшафтні (встановлення охоронних зон навколо місцезростань рідкісних рослин; регулювання землекористування через обмеження рекреаційного навантаження, випасання худоби); 4) інформаційні (еколого-просвітницька діяльність).

ВИСНОВКИ

Наведена інформація про місцезнаходження та здійснений аналіз за ступенем охорони раритетних видів флори в заказниках

загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я. Встановлено, що найбільше раритетне фіторізноманіття мають заказники: “Русько-Полянський” (16 видів), “Монастирище” (13 видів), “Чорноліський” (12 видів), “Тарасів обрій” і “Войнівський” (10 видів). Є заказники, де відсутня раритетна компонента флори: “Бандурівські ставки”, “Редьчине”, “Липівський” і “Велика Вись”. За видовим аналізом раритетної флори: *Pulsatilla pratensis* зафіксовано на території 13 заказників, *Astragalus dasyanthus* — на 9, *Adonis vernalis* — на 8, *Stipa lessingiana* та *Sedum borissovae* — на території 6 заказників. Решта видів раритетної флори зустрічається в 1–5 заказниках. Згідно з созологічним статусом

охороняються 46 видів із різними ступенями охорони.

Ефективна охорона рідкісних і зникаючих видів флори України потребує науково обґрунтованого підходу, що враховує місцезнаходження виду, його стан та особливості біологічної організації кожного виду. Саме на основі такої інформації повинні формуватися стратегії збереження фіторізноманіття.

Заказники загальнодержавного значення Центрального Придніпров'я відіграють важливу роль у збереженні фіторізноманіття та є ключовими територіями екологічної мережі, що містять раритетне флористичне ядро видів та функціонують як біоцентри регіону.

ЛІТЕРАТУРА

1. EU Biodiversity Strategy for 2030. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1590574123338&uri=CELEX:52020DC0380> (accessed: 10.02.2025).
2. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2597-VIII. *Відомості Верховної Ради*. 2019. № 16, ст. 70. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 10.02.2025).
3. Про природно-заповідний фонд України: Закон України від 16.06.1992 № 2456-XII. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 34, ст. 502. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text> (дата звернення: 10.02.2025).
4. Zeng Y., Koh L. P., Wilcove D. S. Gains in biodiversity conservation and ecosystem services from the expansion of the planet's protected areas. *Science Advances*. 2022. Vol. 8, no. 22, eab19885. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.ab19885>
5. Hermoso V., Carvalho S. B., Giakoumi S. et al. The EU Biodiversity Strategy for 2030: opportunities and challenges on the path towards biodiversity recovery. *Environmental Science and Policy*. 2022. Vol. 127. P. 263–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.10.028>
6. Birben U. The effectiveness of protected areas in biodiversity conservation: The case of Turkey. *CERNE*. 2020. Vol. 25, no. 4. P. 424–438. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201925042644>
7. Hoffmann S. Challenges and opportunities of area-based conservation in reaching biodiversity and sustainability goals. *Biodiversity and Conservation*. 2022. No. 31. P. 325–352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02340-2>
8. Ruppert V., Navarro L. M., Jones Y. et al. The global distribution of protected areas management strategies and their complementarity for biodiversity conservation. *Biological Conservation*. 2021. Vol. 256. 109014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109014>
9. Wang W., Russo I.-R., Sang W. et al. Biodiversity conservation and sustainable development of protected areas. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/978-2-8325-5182-0>
10. Крецул Н. І., Ярова О. А. Созологічна оцінка рослинного покриву території національного природного парку “Білоозерський”. *Екологічні науки*. 2018. № 2 (21). С. 175–178 URL: <http://eco.j.dea.kiev.ua/archives/2018/2/32.pdf> (дата звернення: 13.02.2025).
11. Скляр Ю. Л., Троценко В. І., Псарьов В. В. Стан фіторізноманіття гідрологічних заказників Садівської територіальної громади Сумського району. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія “Агрономія і біологія”*. 2024. Випуск 4 (58). С. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.16>
12. Смоляр Н. О., Ханнанова О. Р., Шкура Т. В. Фітосозологічна характеристика ботанічного заказника “Драбинівка” (Полтавська область, Україна). *Біологія та екологія*. 2020. Том 6. № 1–2. С. 58–63. DOI: <https://doi.org/10.33989/2020.6.1-2.225043>
13. Романчук Л. Д., Устименко В. І., Діденко П. В., Бадзян В. В. Визначення основних показників видового різноманіття борів природного заповідника “Древлянський”. *Наукові горизонти*. 2020. № 07 (92). С. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-92-7-65-73>
14. Конішук В. В., Мартиненко В. В., Конякін С. М. Наукове обґрунтування створення гідрологічного заказника місцевого значення “Куделя”. *Агроекологічний журнал*. 2024. № 4. С. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.316985>
15. Мудрак О. В., Березовська Р. Л., Мудрак Г. В. Урочище “Княгиня” як осередок збереження фіторізноманіття Східного Поділля. Людина та довкілля. *Проблеми неоекології*. 2023. Вип. 40. С. 85–93. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2023-40-07>
16. Moysiienko I. I., Shynder O. I., Levon A. F. et al. Notes to vascular plant in Ukraine I. *Чорноморський ботанічний журнал*. 2022. Том 19, № 1. С. 76–93. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2023-19-1-3>
17. Чорней І., Токарюк А., Якушенко Д., Волуца О. Созологічна характеристика рослинного покриву Буковини. Матеріали XV З'їзду Українського ботанічного товариства (Івано-Франківськ, 30 вересня – 4 жовтня 2024).

- Одеса : Видавничий дім “Гельветика”, 2024. С. 158. https://www.botany.kiev.ua/doc/XV_UBT_proceedings.pdf (дата звернення: 10.02.2025).
18. Chusova O. O., Shyriaieva D. V., Budzhak V. V. et al. Protected species in grassland habitats of Ukraine. *Ukrainian Botanical Journal*. 2022. Vol. 79, iss. 5. P. 290–307. DOI: <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.05.290>
 19. Мирза-Сіденко В. М. Флора і рослинність Південного правобережного лісостепу на межиріччі Дніпра — Синюхи. Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка 2006. С. 111–113.
 20. Атамас В. О., Атамас Н. В. Первоцвіти берегів річки Боковенька в околицях с. Олександрівка (Долинський район, Кіровоградська область). *Поширення раритетних видів біоти України. Серія “Conservation Biology in Ukraine”*. 2023. Вип. 27. Том 2. С. 13. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Biota-Ukraine_2_2023_compressed.pdf (дата звернення: 10.02.2025).
 21. Баранець М. О. Флора басейну р. Інгулець: сучасний стан, аутозоологічна оцінка: дис. ... доктора філос. Київ, 2021. URL: http://www.nbg.kiev.ua/upload/spetsrada/16042021/Baranets_diser.pdf (дата звернення: 10.02.2025).
 22. Василюк О., Куземко А., Спрягайло О. та ін. 50 рідкісних рослин Черкащини : атлас-довідник, Черкаси, 2018. 60 с.
 23. Mosyakin S. L., Fedoronchuk M. M. Vascular plants of Ukraine. A nomenclatural checklist. Kyiv, 1999. 345 p.
 24. Онищенко В. А., Мосякін С. Л., Коротченко І. А. та ін. Категорії МСОП судинних рослин флори України / за ред. В. А. Онищенко. Київ : ФОП Гуляєва В. М., 2022. 198 с.
 25. European Red List of globally threatened animals and plants. Environment Directorate General of the European Commission. URL: <http://ec.europa.eu/environment/nature/conservation/species/redlist/> (accessed: 15.02.2025).
 26. Конвенція про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі (Берн, 19 верес. 1979 р.). URL: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/995_032/print1247741934069335 (дата звернення: 15.02.2025).
 27. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. URL: <https://cites.org/eng/disc/text.php> (accessed: 16.02.2025).
 28. Червона книга України. Рослинний світ / Відп. ред. Я. П. Дідух. Київ : Глобалконсалтинг, 2009. 912 с.
 29. Перелік видів рослин та грибів, що заносяться до Червоної книги України (рослинний світ). URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/vklyuchennya-858-05.03.2021.pdf> (дата звернення: 16.02.2025).

RARE PHYTODIVERSITY OF KEY AREAS OF THE ECOLOGICAL NETWORK OF THE CENTRAL DNIPRO REGION

Mudrak O.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor
Vinnytsia Academy of Continuing Education (Vinnytsia, Ukraine)
e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1776-6120>

Dubrovskiy V.

Postgraduate student
Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)
e-mail: viachesd@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3208-935X>

*The article provides information about the rare phytodiversity of key areas of the ecological network of the Central Dnipro region. The basis of the key territories was such protected areas as reserves of national importance. The Law of Ukraine “On the Nature Reserve Fund of Ukraine” stipulates that nature reserves are created to preserve natural complexes. The aim of the work is to provide information on the location of rare phytodiversity in the reserves of national importance in the Central Prydniprovya; to carry out a systematic, biomorphological and ecological-morphological analysis of rare flora species; to characterise the lists of rare flora species according to zoological lists of different levels: international (IUCN), World Red List, European Red List, Bern Convention, CITES, national (Red Book of Ukraine). There are 26 reserves of national importance in the Central Prydniprovya region (Cherkasy oblast — 4 sites, Kirovohrad oblast — 22 sites), including 10 botanical reserves, 9 landscape reserves, 3 ornithological reserves, 2 hydrological reserves, and 1 forest and 1 general zoological reserve, respectively. The location of the reserves of national importance in the Central Prydniprovya is rather uneven. The results of the distribution of rare phytodiversity in the reserves of national importance are presented, and an analysis of the systematic and biomorphological structure is presented. Families: Orchidaceae has 9 genera and 12 species; Fabaceae — 2 genera and 5 species; Liliaceae — 3 genera and 4 species; Iridaceae and Ranunculaceae — 2 genera and 4 species; Poaceae — 1 genus and 4 species, Asteraceae — 2 genera and 2 species. These families account for 66.0% of the species and 57.6% of the genus diversity of the rare flora, while the remaining 10 families have from one to two species and genera. The largest number of locations on the territory of the reserves was recorded for the species: *Pulsatilla pratensis* (L.) Mill. s.l. — 13 specimens; *Astragalus dasyanthus* Pall. — 9 specimens and *Adonis vernalis* L. — 8 specimens. The distribution of rare phytodiversity by the level of protection (interstate and national) was made. Thus, reserves of national importance are important key areas for the ecological network and have a rare floristic core of species.*

Keywords: nature reserve fund, ecological network, rare flora species, diversity of protected areas.

REFERENCES

1. EU Biodiversity Strategy for 2030. (n.d.). Retrieved from https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_en
2. Law of Ukraine № 2597-VIII "On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine until 2030". (2019, February). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>
3. Law of Ukraine 2456-XII "On the Nature Reserve Fund of Ukraine. (1992, April). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#Text>
4. Zeng, Y., Koh, L. P., & Wilcove, D. S. (2022). Gains in biodiversity conservation and ecosystem services from the expansion of the planet's protected areas. *Science Advances*, 8(22), article number eabl9885. doi: 10.1126/sciadv.abl9885
5. Hermoso, V., Carvalho, S. B., Giakoumi, S., Goldsborough, D., Katsanevakis, S., Leontiou, S., ... Yates K. L. (2022). The EU Biodiversity Strategy for 2030: opportunities and challenges on the path towards biodiversity recovery. *Environmental Science and Policy*, 127, 263–271. doi: 10.1016/j.envsci.2021.10.028
6. Birben, U. (2020). The effectiveness of protected areas in biodiversity conservation: The case of Turkey. *CERNE*, 25(4), 424–438. doi: 10.1590/01047760201925042644
7. Hoffmann, S. (2022). Challenges and opportunities of area-based conservation in reaching biodiversity and sustainability goals. *Biodiversity and Conservation*, 31, 325–352. doi: 10.1007/s10531-021-02340-2
8. Ruppert, V., Navarro, L. M., Jones, Y., Wolf, F., Moguédéc, G. L., & Réjou-Méchain, M. (2021). The global distribution of protected areas management strategies and their complementarity for biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 256, 109014. doi: 10.1016/j.biocon.2021.109014
9. Wang, W., Russo, I.-R., Sang, W., Ma, T., Li, B. V. (2024). Biodiversity conservation and sustainable development of protected areas. *Frontiers in Ecology and Evolution*. DOI: 10.3389/978-2-8325-5182-0
10. Kretsul, N. I., & Yarova, O. A. (2018). Causological assessment of the plant cover of the territory of the Biloozersky National Nature Park. *Ecological Sciences*, 2(21), 175–178. Retrieved from <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/2/32.pdf>
11. Skliar, Y. L., Trotsenko, V. I., & Psaryov, V. V. (2024). The state of phytodiversity of hydrological reserves of the Sadivska territorial community of Sumy district. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series "Agronomy and Biology"*, 4(58), 110–118. doi: 10.32782/agrobio.2024.4.16
12. Smoliar, N. O., Khannanova, O. R., & Shkura, T. V. (2020). Phytosozological characteristics of drabynivka botanical reserve (Poltava oblast, Ukraine). *Biology & Ecology*, 6(1–2), 58–63. doi: 10.33989/2020.6.1-2.225043
13. Romanchuk, L. D., Ustymenko, V. I., Didenko, P. V., & Badzian, V. V. (2020). Determination of the main indicators of species diversity in "Drevlyansky" nature reserve's forests. *Scientific Horizons*, 07(92), 65–73. doi: 10.33249/2663-2144-2020-92-7-65-73
14. Konishchuk, V. V., Martynenko, V. V., & Koniakin, S. M. (2014). Scientific substantiation of creating Kudelia hydrological reserve of local importance. *Agroecological Journal*, 4, 13–23. doi: 10.33730/2077-4893.4.2024.316985
15. Mudrak, O. V., Berezovska, R. L., & Mudrak, H. V. (2023). The "Kniahynia" tract as a center for the preservation of the phytological identity of the Eastern Podillia. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, 40, 85–93. doi: 10.26565/1992-4224-2023-40-07
16. Moysiienko, I. I., Shynder, O. I., Levon, A. F., Chorna, H. A., Volutsa, O. D., Lavrinenko, K. V., ... Pashkevych, N. A. (2022). Notes to vascular plant in Ukraine I. *Chornomorski Botanical Journal*, 19(1), 76–93. doi: 10.32999/ksu1990-553X/2023-19-1-3
17. Chornei, I., Tokaryuk, A., Yakushenko, D., & Volutsa, O. (2024). Sozological characteristics of the vegetation cover of Bukovina. *Proceedings of the XV Congress of the Ukrainian Botanical Society* (pp. 158). Odesa: Helvetica Publishing House. Retrieved from https://www.botany.kiev.ua/doc/XV_UBT_proceedings.pdf
18. Chusova, O. O., Shyriaieva, D. V., Budzhak, V. V., Chorney, I. I., Dziuba, T. P., Iemeljanova, S. M., ... Kuzemko, A. A. (2022). Protected species in grassland habitats of Ukraine. *Ukrainian Botanical Journal*, 79(5), 290–307. doi: 10.15407/ukrbotj79.05.290
19. Myrza-Sidenko, V. M. (2006). *Flora and vegetation of the Southern right-bank forest-steppe on the Dnipro-Syniukha riverbed*. Kirovohrad: RVV KDPU im. V. Vynnychenka.
20. Atamas, V. O., & Atamas, N. V. (2023). Primroses on the banks of the Bokovenka River in the vicinity of the village of Oleksandrivka (Dolynskyi district, Kirovohrad region). *Records of rare species of Ukrainian biota. Series "Conservation Biology in Ukraine"*, 2(27), 13. Retrieved from https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Biota-Ukrainy_2_2023_compressed.pdf
21. Baranets, M. O. (2021). *Flora of the Ingulets River Basin: Current state, autozoological assessment* (PhD dissertation, Kyiv, Ukraine). Retrieved from http://www.nbg.kiev.ua/upload/spetsrada/16042021/Baranets_diser.pdf
22. Vasiliuk, O., Kuzemko, A., Spryagaylo, O., Spryagaylo, O., Chorna, H., Shevchik, V., & Shiryayeva, D. (2018). *50 rare plants of Cherkasy region. Atlas-reference book*. Cherkasy.
23. Mosyakin, S. L., & Fedoronchuk, M. M. (1999). *Vascular plants of Ukraine: A nomenclatural checklist*. Kyiv.
24. Onyshchenko, V. A., Mosyakin, S. L., Korotchenko, I. A., Danylyk, I. M., Burlaka, M. D., Fedoronchuk, M. M., ... Protopopova, V. V. (Eds.). (2022). *Categories of IUCN vascular plants of the flora of Ukraine* (V. A. Onyshchenko, Ed.). Kyiv: FOP Huliyeva V. M.
25. European Commission. (n.d.). *European Red List of globally threatened animals and plants*. Environment Directorate General. Retrieved from <http://ec.europa.eu/environment/nature/conservation/species/redlist>
26. Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats. (1979, September). Retrieved from http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/995_032/print1247741934069335

27. Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. (n.d.). Retrieved from <https://cites.org/eng/disc/text.php>
28. Didukh, Ya. P. (Ed.). (2009). *Red Data Book of Ukraine. Plant World*. Kyiv: Globalkonsaltyng.
29. List of plant and fungi species to be included in the Red Book of Ukraine (flora). Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/vklyuchennya-858-05.03.2021.pdf>

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

МУДРАК Олександр Васильович — доктор сільськогосподарських наук, професор, зав. кафедри екології, природничих та математичних наук КЗВО “Вінницька академія безперервної освіти” (вул. Грушевського, 13, Вінниця, Україна, 21000; e-mail: ov_mudrak@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1776-6120>).

ДУБРОВСЬКИЙ В'ячеслав Юрійович — аспірант, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: viachesd@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3208-935X>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

Європейська комісія опублікувала четверте оновлення списку пріоритетних забруднювачів поверхневих вод, розширивши його на 12 нових речовин, серед яких — пестициди, фармацевтичні препарати, сонцезахисні засоби та антиоксидант з автомобільних шин. Держави — члени ЄС протягом наступних двох років проведуть моніторинг цих речовин на обмеженій кількості репрезентативних станцій для оцінки їхньої концентрації та потенційного ризику для екосистем і здоров'я людей. Отримані дані стануть підґрунтям для можливого включення цих хімікатів до офіційного переліку пріоритетних забруднювачів у рамках Водної рамкової директиви. Паралельно Україна, згідно з затвердженою Програмою державного моніторингу вод на 2025 рік, також досліджуватиме забруднення у 7 ключових річкових басейнах, демонструючи узгодженість з європейськими екологічними ініціативами.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СПЕКТРАЛЬНИХ ІНДЕКСІВ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗАБУДОВИ НА ОСНОВІ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-2

Т. В. Ільєнко

кандидат сільськогосподарських наук

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>

Д. П. Васильєв

аспірант

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>

У зв'язку з посиленням урбанізаційних процесів і сезонною мінливістю ландшафтного покриву виникає потреба в точному та адаптивному методі ідентифікації забудованих територій за даними дистанційного зондування Землі. Класичні спектральні індекси, зокрема NDBI та NDVI, демонструють недостатню стабільність під час зміни сезонів, особливо в умовах снігового покриву або за наявності відкритого ґрунту. У межах цього дослідження було проведено порівняльний аналіз індексів NDBI, NDWI, модифікованого індексу $NDBI_{blue}$ та запропонованого авторами індексу EVI-S. Перевагою обраного підходу стало використання сезонних мультиспектральних знімків Sentinel-2, що дозволило оцінити ефективність індексів у чотирьох сезонних періодах. Кожен з індексів продемонстрував різний рівень чутливості до трьох типів об'єктів — забудови, води та ріллі. Найкращі результати для виділення урбанізованих територій зафіксовано в літній період, тоді як зимовий сезон виявився непридатним для класифікації через значну кількість хибнопозитивних сигналів, зумовлених сніговим покривом. Фінальним етапом дослідження стала класифікація методом Maximum Likelihood із використанням трьох індексних шарів, що дозволило отримати векторизовану модель забудови з високим ступенем узгодженості з реальними супутниковими зображеннями. Дослідження демонструє перспективність гібридного підходу, який поєднує сезонну чутливість спектральних індексів із методами автоматизованої класифікації, та підкреслює необхідність вдосконалення методів для зменшення похибок у класах, зокрема за наявності відкритого ґрунту або затінених ділянок.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, спектральні індекси, опустелювання, урбанізація, сезонність спектральних індексів.

ВСТУП

Урбанізація, починаючи з другої половини ХХ століття і до сьогодні, є одним із найвагоміших чинників трансформації ландшафтів. Вона призводить до змін мікроклімату, скорочення площ рослинного покриву, підвищення температури земної поверхні та порушення водного балансу. Методи дистанційного зондування Землі відіграють ключову роль у сучасних дослідженнях антропогенного впливу на довкілля, зокрема в моніторингу процесів опустелювання та урбанізації. Використання супутникових даних дозволяє провести оцінку тенденцій і темпів урбанізації місцевості, її динаміки та впливу розширення міських територій на довкілля.

У контексті екологічного моніторингу важливим завданням є оцінка впливу урбанізації на деградацію ґрунту. Для цього застосовуються

різноманітні підходи, зокрема використання спектральних індексів.

Виявлення закономірностей змін у міських і природних ландшафтах під впливом урбанізації — важливий етап визначення її ролі в процесах опустелювання та оцінки ефективності спектральних індексів для моніторингу антропогенних чинників змін довкілля.

Мета нашої роботи — здійснити порівняльний аналіз ефективності спектральних індексів NDBI, $NDBI_{blue}$ та запропонованого модифікованого вегетаційного індексу EVI-S, який, за попередніми дослідженнями, має підвищену чутливість до стану рослинності.

У дослідженні вперше пропонується перевірити можливість застосування EVI-S не лише для моніторингу рослинності, а й для виявлення інших ландшафтних класів (збудови та во-

дойм), оцінюючи його ефективність порівняно зі спеціалізованими індексами.

Зокрема, робота спрямована на:

- оцінку придатності індексу EVI-S для розмежування забудованих територій, полів і водойм;
- визначення оптимального сезонного періоду для максимально ефективного виділення забудови за допомогою аналізу сезонних гістограм спектральних індексів;
- порівняння ефективності EVI-S із традиційними індексами NDBI та $NDBI_{Blue}$ для виявлення забудови;

визначення можливостей застосування EVI-S як універсального інструмента дистанційного зондування для ідентифікації різних типів ландшафтних об'єктів (збудова, сільськогосподарські землі, водойми).

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про активне використання спектральних індексів для картографування урбанізованих територій, ідентифікації водних об'єктів і диференціації типів покриття. У фокусі дослідників — як спеціалізовані індекси ($NDBI$, $NDBI_{Blue}$, $NDWI$) [1; 2], так і адаптація вегетаційних індексів ($NDVI$, $SAVI$, EVI) для розв'язання задач, не пов'язаних безпосередньо з рослинністю. У цьому контексті особливу увагу привертають роботи, які поєднують кілька індексів або розширюють їхню сферу використання. Це створює методологічну основу для перевірки ефективності EVI-S — модифікованого вегетаційного індексу, який запропоновано в нашому дослідженні як засіб виявлення різних класів покриття.

У дослідженні G. S. Santecchia, G. N. Revollo Sarmiento, S. A. Genchi та ін. проведено глибоку оцінку трьох варіантів $NDWI$ для виявлення мілководних водойм на прикладі озера Ла-Салада (Аргентина). Результати засвідчили значну варіабельність індексу залежно від супутника (Landsat-8 чи Sentinel-2) та формули. Аналіз виявив систематичну нестабільність варіацій $NDWI$ у складних умовах, таких як мілководдя та каламутність, що підвищують ризики хибної класифікації [3].

Подібні обмеження підтверджуються в роботі [4], де порівнювали індекс $NDWI$ з емпіричними даними щодо водних ресурсів у Махараштрі (Індія). Встановлено розбіжності між супутниковими та фактичними даними, зумовлені сезонністю, вегетаційним покривом і роздільною здатністю.

Ці роботи підкреслюють необхідність критичної оцінки $NDWI$ та обґрунтовують доціль-

ність перевірки альтернативних індексів для задач диференціації водних об'єктів.

N. Drešković, S. Đug та M. Osmanović у своїй роботі продемонстрували застосування $NDVI$ і $NDBI$ для аналізу міських теплових островів у Сараєво. Виявлено просторову кореляцію між температурою поверхні суші та індексами, причому $NDBI$ краще фіксує розподіл урбанізованих площ [5].

Робота H. Hashim, Z. Abd Latif та N. A. Adnan висвітлює ефективність $NDVI$ у поєднанні з супутниковими зображеннями високої роздільної здатності. У дослідженні представлено виокремлення міської рослинності та зон без рослинного покриття, які можуть відповідати забудованим територіям. Класифікація досягла точності 70,7%, що свідчить про перспективність застосування вегетаційних індексів у задачах аналізу землекористування та земельного покриття (LULC) [6].

У дослідженні I. Loukili, A. Laamrani, M. El Ghorfi та ін. [7] індекси $NDVI$, $NDBI$ і $NDWI$ використано для моніторингу трансформацій навколо великої шахти. Робота підкреслює ефективність поєднання класичних індексів у часовому аналізі змін забудови та сільськогосподарських угідь.

K. Rouibah та M. Belabbas довели, що комбінація $NDVI$ з індексами ґрунту ($NDTI$, BSI) дає змогу надійно виявляти міські зони в умовах напівпосушливого клімату [8].

Автори дослідження [9] використали комбінації п'яти індексів ($NDVI$, $SAVI$, $NDWI$, $MNDWI$, $NDBI$) та продемонстрували, що комбінація $NDBI$ та $MNDWI$ забезпечує найвищу точність (90,3%) у виявленні забудови. Ця робота підтверджує ефективність трансформаційних підходів.

У роботі Y. Zheng, L. Tang та H. Wang представлено індекс $ENUI$, який об'єднує дані нічного освітлення (NPP-VIIRS) з $NDVI$, $NDWI$, $NDBI$. Запропонований індекс забезпечив точність у 93,56%, що свідчить про потенціал гібридних індексів для класифікації міських ландшафтів [10].

У роботі [11] запропоновано індекс штучної поверхні (ASI), який у поєднанні з RRI досяг найвищої точності виявлення сільської забудови серед порівнюваних індексів.

P. Lynch, L. Blesius і E. Hines випробували індекси NBI , $BAEI$ та $NDCCI$ для деталізації структури міської забудови. Представлені результати засвідчили перевагу мультиіндексного підходу [12].

Розглянуті дослідження демонструють широке практичне використання індексів $NDVI$, $NDWI$, $NDBI$ та їхніх модифікацій для виявлення урбанізованих і водних територій. Індекси

NDVI та SAVI, хоча й традиційно використовуються для оцінки рослинності, демонструють ефективність і для виявлення інших об'єктів ландшафту. Водночас застосування комбінованих підходів, а також нових формул — таких як ENUI, ASI або NDCCI — значно підвищує точність класифікації, особливо в складних міських і природних середовищах.

Слід відзначити, що аналіз сезонної динаміки значень індексів та їхньої спектральної стабільності для різних кліматичних умов досі залишається недостатньо розробленим у науковій літературі.

У цьому контексті запропоноване в нашому дослідженні тестування індексу EVI-S, який є модифікованим вегетаційним індексом із потенціалом відсікання як урбанізованих територій, так і водних об'єктів, дозволяє заповнити виявлену наукову нішу. Врахування спектральної чутливості в поєднанні з відносною простотою застосування та здатністю адаптуватися до сезонних змін робить цей підхід перспективним з огляду на обмеження, виявлені в попередніх роботах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено на території Феодосійської об'єднаної територіальної громади, розташованій в Обухівському районі Київської області. Громада охоплює вісім населених пунктів, а її площа становить майже 115 км² [13]. Територія належить до Лісостепової зони України і здебільшого характеризується хвилястим рівнинним рельєфом. Поєднання природних ландшафтів з аграрними угіддями та різновидами забудови (садибна, багатоквартирна, виробнича) робить цю територію репрезентативною для вивчення процесів урбанізації.

Клімат помірний, зі середньорічною температурою повітря в межах +7...+9°C та середньорічною кількістю опадів приблизно 500–600 мм [14]. Такі умови сприяють активному розвитку як природних, так і антропогенно трансформованих екосистем. Наявні водойми забезпечують умови для перевірки можливостей диференціації різних типів об'єктів.

Дослідження виконано з використанням мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 з атмосферною корекцією. Вибір платформи зумовлений наявністю відповідних спектральних каналів для розрахунку індексів і достатньою роздільною здатністю. Обробку знімків здійснено в програмному середовищі QGIS з використанням модуля Semi-Automatic Classification Plugin (SCP).

Для аналізу розподілу значень індексів використано гістограми, побудовані за допомо-

гою Python-скрипту, з використанням бібліотек rasterio, numpy та matplotlib.

Дослідження передбачає побудову шарів спектральних індексів для чотирьох різних пір року з подальшим виокремленням контрольних ділянок трьох типів: забудова, поля та водойми. Для кожного типу розраховуються гістограми розподілу значень індексів із метою визначення характерних діапазонів та оптимальних порогів для диференціації. Після аналізу сезонної динаміки здійснюється векторизація забудованих ділянок, що мають типові спектральні ознаки за кожним індексом.

У підсумковій частині роботи виконано порівняння ефективності EVI-S, UI, NDBI у виокремленні забудови за точністю та здатністю уникати накладання на інші типи об'єктів. За векторними шарами здійснюється розрахунок площі забудованих територій.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Різноманітні спектральні індекси посіли важливе місце в задачах ідентифікації різних типів покриття та об'єктів ландшафтів. Слід зауважити, що ефективність цих індексів значною мірою залежить від типу ландшафту, спектральних властивостей поверхні та атмосферних умов.

Нормалізований диференційний індекс забудови (NDBI) є одним із найбільш широко застосовуваних індексів для ідентифікації урбанізованих територій за даними ДЗЗ [15]. Він був запропонований J. Zha, J. Gao та S. Ni у 2003 році. Метою його розроблення було ефективне виявлення урбанізованих територій за допомогою мультиспектральних супутникових зображень, зокрема Landsat [16]. Його формула має вигляд:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}, \quad (1)$$

де *SWIR* — відбиття в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні; *NIR* — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні [15].

З формули (1) видно, що індекс базується на характерних спектральних властивостях забудованих територій, які мають вищу відбивну здатність у *SWIR* та нижчу в *NIR* порівняно з природними об'єктами та рослинністю. Високі значення NDBI свідчать про наявність забудови, тоді як низькі значення відповідають рослинності або відкритому ґрунту. Значення індексу коливаються від -1 до 1.

Нормалізований диференційний водний індекс (NDWI) використовується для виявлення водних об'єктів та оцінки вологості поверхні. Індекс було запропоновано McFeeters у 1996

році для покращення контрасту між водою та іншими типами покриття, зокрема рослинністю та міськими структурами [16]. NDWI розраховується за формулою:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}, \quad (2)$$

де *GREEN* — відбиття в зеленому спектральному діапазоні; *NIR* — відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні [15; 17].

Водні об'єкти зазвичай мають додатні значення, тоді як суха поверхня та рослинність — від'ємні. Слід відзначити чутливість NDWI до типу водойми та наявності суспензій у воді, тому результати можуть змінюватися залежно від прозорості та стану водойм.

Модифікований нормалізований індекс забудови на основі синього та ближнього інфрачервоного каналів $NDBI_{Blue}$ є версією класичного NDBI, що використовує спектральні відбиття в синьому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Формула розрахунку має вигляд:

$$NDBI_{Blue} = \frac{BLUE - NIR}{BLUE + NIR}, \quad (3)$$

де *BLUE* — відбиття в синьому спектральному діапазоні; *NIR* — відбиття в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Цей індекс використовує підхід, аналогічний до класичного NDBI (який ґрунтується на SWIR та NIR), однак замість SWIR-діапазону застосовується синій канал.

$NDBI_{Blue}$ також дозволяє виділяти забудовані території, використовуючи контраст між світлими поверхнями забудови та рослинним покривом. Будівлі та автошляхи мають високу відбивну здатність у синьому діапазоні, тоді як рослинність інтенсивно відбиває в NIR діапазоні.

Ідея розрахунку подібних модифікованих індексів на основі Blue- та NIR- каналів згадується в роботі А. Javed, Q. Cheng та ін., які пропонують альтернативні урбаністичні індекси з використанням обмежених спектральних діапазонів [18].

Модифікований індекс EVI-S (EVI-SAVI Hybrid без атмосферної корекції). Для усунення обмежень наявних індексів у цьому дослідженні пропонується новий модифікований індекс EVI-S, який поєднує характеристики EVI2 та SAVI без урахування атмосферної корекції. Формула індексу має вигляд:

$$EVI-S = 2,5 \times \frac{NIR - RED \times (1 + L)}{NIR + 2,4 \times RED + L}, \quad (4)$$

де *L* — коефіцієнт корекції впливу ґрунту, що забезпечує мінімізацію його ефекту на відбиття спектру.

EVI-S поєднує переваги SAVI та EVI2, що робить його придатним для аналізу рослинного покриву в умовах, де є значний вплив ґрунтового фону.

Хід виконання аналізу спектральних індексів у QGIS. Для аналізу урбанізації територій було використано супутникові знімки Sentinel-2 (L2A) з атмосферною корекцією (Level-2A) та відсутністю хмарного покриву (0% хмарності), отримані для чотирьох пір року.

Знімки було завантажено за допомогою модуля SCP у середовищі QGIS та підготовано до розрахунку спектральних індексів.

У проєкт QGIS було додано растрові знімки Sentinel: канали B2, B3, B4, B8, B11 за 17 січня 2024, 9 квітня 2024, 15 липня 2024 та 21 жовтня 2024.

Нижче наведено відповідність номерів каналів частотним діапазонам:

Канал 2 — Синій;

Канал 3 — Зелений;

Канал 4 — Червоний;

Канал 8 — NIR (Near-Infrared — ближній інфрачервоний діапазон);

Канал 11 — SWIR (Short-Wave Infrared — короткохвильовий інфрачервоний діапазон).

За допомогою інструмента Clip Raster by Mask Layer растри були обрізані по полігону досліджуваної ділянки.

Розрахунок спектральних індексів.

Далі під час виконання роботи обчислено по чотири спектральні індекси для кожної з пір року за допомогою Raster Calculator у QGIS згідно з формулою:

$$(B02 - B08) / (B02 + B08) @NDBI_{Blue}$$

$$(B11 - B08) / (B11 + B08) @NDBI$$

$$(B03 - B08) / (B03 + B08) @NDWI$$

$$2.5 \times (B08 \times B04) \times (1 + 0.5) / (B08 + 2.4 \times B04 + 0.5) @EVI-S$$

Візуалізація та графічний аналіз.

Після обчислення індексів проведено візуалізацію результатів. Усі індексні шари збережено у форматі GeoTIFF для подальшого аналізу. Виконано зміну налаштувань графічного відображення в одноканальний псевдоколір відповідно до значень індексів для кращого візуального сприйняття:

- — низькі значення індексу;
- — помірно низькі;
- — середні;
- — помірно високі;
- — високі значення.

На рис. 1–4 наведено згруповані растрові шари за різні пори року для кожного індексу.

Усі індекси демонструють яскраво виражену сезонність, зумовлену змінами стану

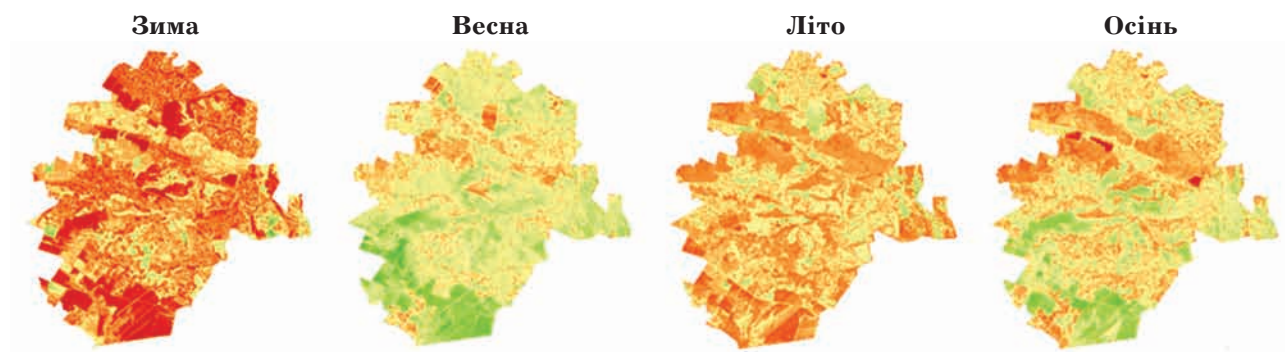


Рис. 1. Растрові шари індексу NDBI для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

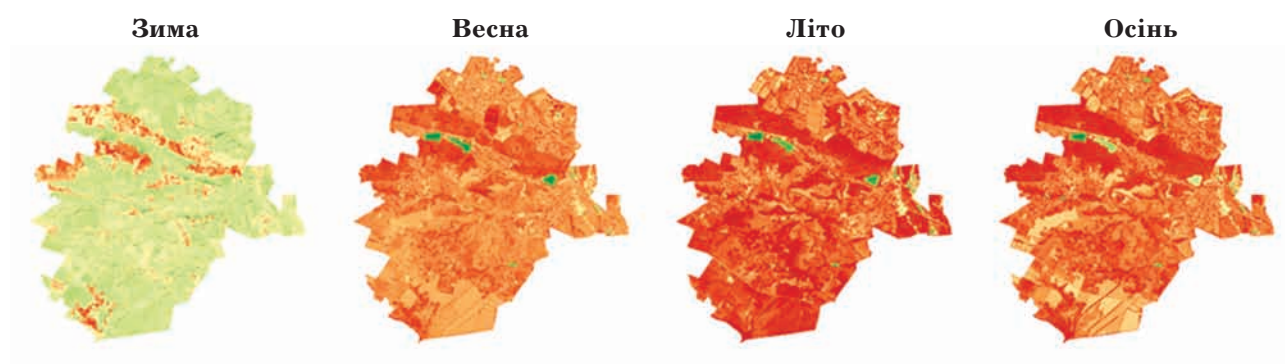


Рис. 2. Растрові шари індексу NDWI для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

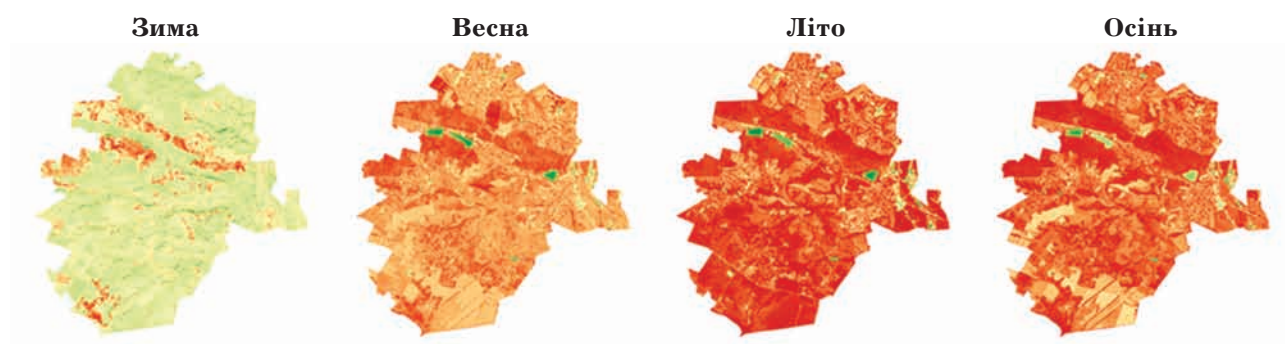


Рис. 3. Растрові шари індексу NDBIBlue для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

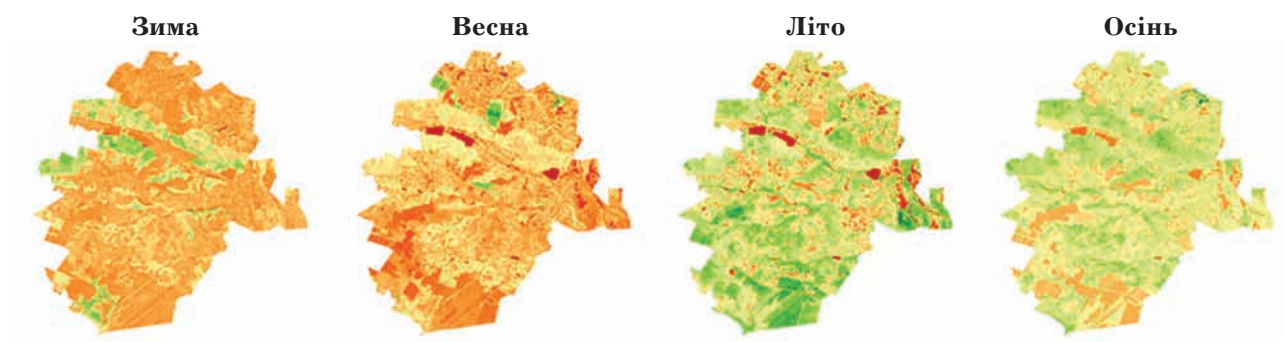


Рис. 4. Растрові шари індексу EVI-S для чотирьох пір року

Джерело: розроблено авторами.

рослинності, наявністю снігового покриву та відкритого ґрунту.

Загальною рисою для всіх індексів є те, що в літній період вони забезпечують найкращу інформативність завдяки чіткому спектральному розділенню між рослинністю, водою та урбанізованими територіями. Усі індекси виявляють чутливість до відкритого ґрунту навесні та восени, що ускладнює класифікацію забудови через спектральну подібність із штучними покриттями. Сніговий покрив у зимовий період унеможливує чітку класифікацію за значеннями індексів.

NDWI стабільно виявляє водойми незалежно від сезону, окрім зимового. $\text{NDBI}_{\text{Blue}}$ демонструє високу чутливість до водних об'єктів. EVI-S демонструє здатність ефективно диференціювати об'єкти ландшафту, незважаючи

на інверсію значень, порівняно з іншими індексами.

Для більш детального аналізу розподілу значень індексів виділено тестові ділянки з різними типами об'єктів ландшафту.

На *рис. 5* наведено тестові ділянки в межах дослідного полігону з використанням базової карти OpenStreetMap і збільшених фрагментів Google Satellite Map. За векторними шарами тестових ділянок було вирізано фрагменти кожного з растрів індексів, отриманих раніше. Таким чином, було отримано по три фрагменти кожного індексу для кожної з обраних дат у форматі GeoTIFF.

Для зручності візуалізації та накладення діаграм було розроблено Python-скрипт для побудови гістограм розподілу значень для растрів, аналогічних вбудованій функції QGIS. З метою



Рис. 5. Векторні шари тестових ділянок

Джерело: створено авторами з використанням даних OpenStreetMap і супутникових зображень Google Maps.

виділення забудови проаналізовано розподіл значень індексу для трьох основних класів покриття: забудова (“build”), поле (“field”) та водойми (“lake”). Основним аналітичним підходом є оцінка характеру гістограм, зокрема ступеня сепарації між класом забудови та іншими типами покриття.

Значущими є мінімальне перекриття розподілів і максимальна віддаленість піків гістограм: перекриття призведе до помилкової класифікації. Крім того, важливим є значення частоти: чим воно вище і чіткіше виражене, тим більше пікселів мають подібні значення, що свідчить про стабільність індексу в межах класу забудови.

З гістограм індексу NDBI видно, що для кожного із сезонів спостерігається значне перекриття розподілу значень забудови з полем. Навіть у літній період, коли очікується найбільший контраст, значення класу “field” суттєво накладаються на забудову та переважають за частотою, що істотно ускладнює формування чіткого порогового значення (рис. 6).

Сезонні гістограми для індексу NDWI свідчать про його високу чутливість до водних об'єктів і чітке виділення класу “lake”, крім зимового сезону. Водночас класи “build” та “field” суттєво перекриваються між собою та мають значення в негативному діапазоні, що ускладнює їхню диференціацію за цим індексом (рис. 7).

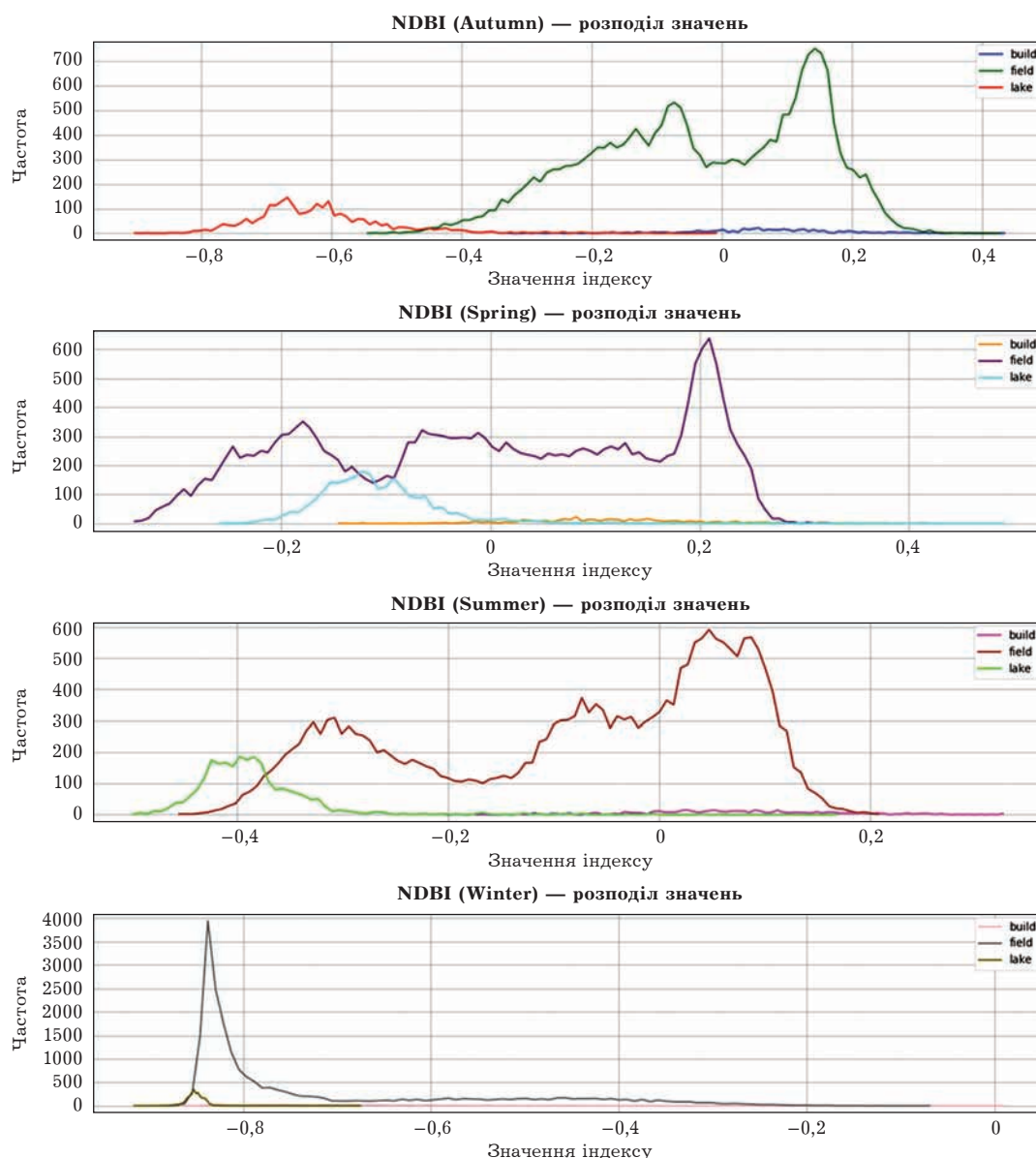


Рис. 6. Сезонна варіативність індексних значень NDBI для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

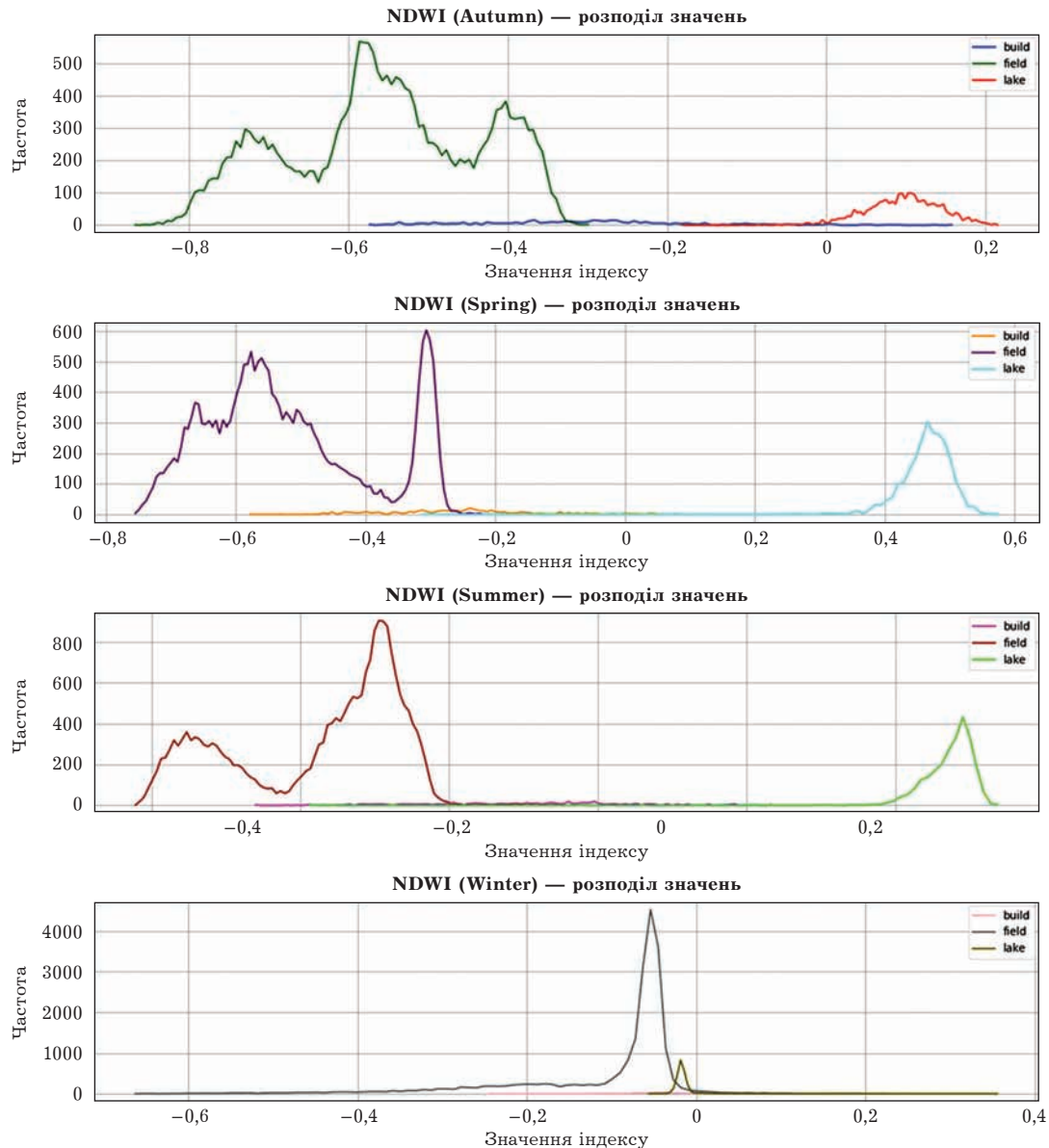


Рис. 7. Сезонна варіативність індексних значень NDWI для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

NDBI_{Blue}, згідно з гістограмами за чотири сезони, демонструє високу чутливість до водних об'єктів і частково — до об'єктів класу "field". У всіх сезонах пік для класу "lake" чітко зосереджений у позитивних значеннях, із помірною амплітудою та слабким перекриттям з іншими класами, що забезпечує ефективну диференціацію водойм. Лише в літній період спостерігається найкращий розподіл значень для "build", "field" і "lake", що дозволяє говорити про найвищу ефективність цього індексу в теплу пору року (див. рис. 8).

Дані гістограм індексу EVI-S для всіх сезонів свідчать про його порівняно високу стабільність у розрізненні основних класів по-

криву: забудова, поле, водойми. У літній сезон індекс демонструє найкращий розподіл значень трьох класів: пік забудови локалізується в зоні від'ємних або низьких значень, тоді як клас "field" займає середній діапазон, а водойми — значення, наближені до нуля (див. рис. 9).

Загалом, EVI-S є найстабільнішим серед розглянутих індексів і забезпечує хорошу класифікаційну чіткість у всіх сезонах, з особливою ефективністю влітку, коли контраст між класами досягає максимуму. Це дозволяє рекомендувати його для виявлення забудови незалежно від сезону з коригуванням порогових значень відповідно до сезонної динаміки.

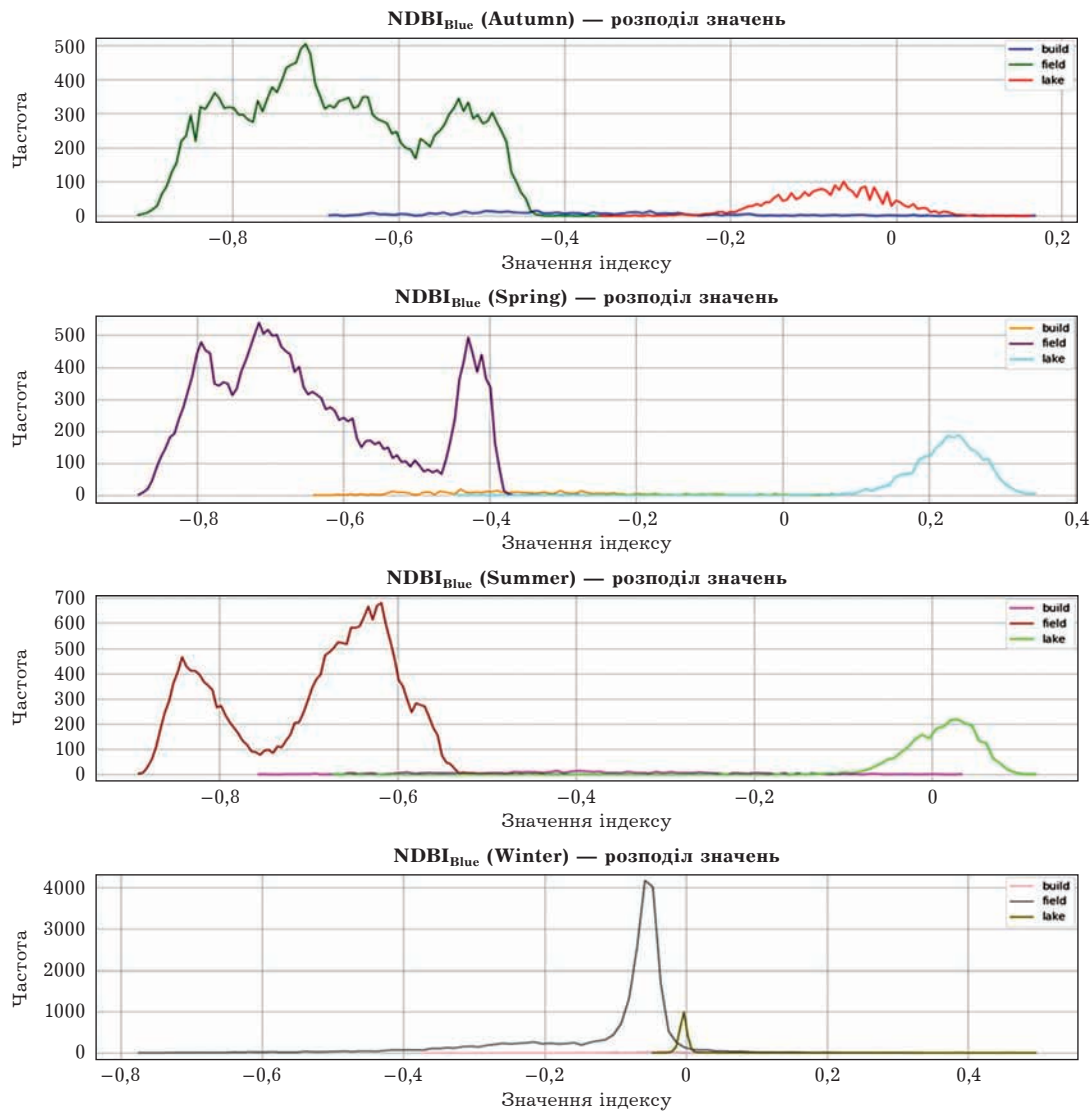


Рис. 8. Сезонна варіативність індексних значень $NDBI_{Blue}$ для тестових ділянок за порами року
Джерело: побудовано авторами.

За результатами аналізу виявлено, що розподіл значень для виокремлення забудови влітку є найбільш сприятливим. За даними графіків за літній період визначено порогові значення для класу забудови (табл. 1).

За отриманими значеннями шляхом виведення відповідних формул для SCP зрізано пікселі класів “field” та “lake” для подальшо-

го перетворення растрів у вектор. Оскільки для $NDBI$ присутнє велике перекриття класом “field”, мінімальне значення прийнято за “0”, що означає відсутність забудови.

У результаті проведеної обробки було сформовано векторні шари для кожного з індексів, що репрезентують ділянки забудови. Початково були сформовані растрові шари ін-

Таблиця 1

Порогові значення індексів для класу “build” за літній період

Значення	$NDBI$	$NDWI$	$NDBI_{Blue}$	$EVI-S$
Min	0	-0.38	-0.5	0.06
Max	0.32	0.03	-0.15	0.38

Джерело: сформовано авторами.

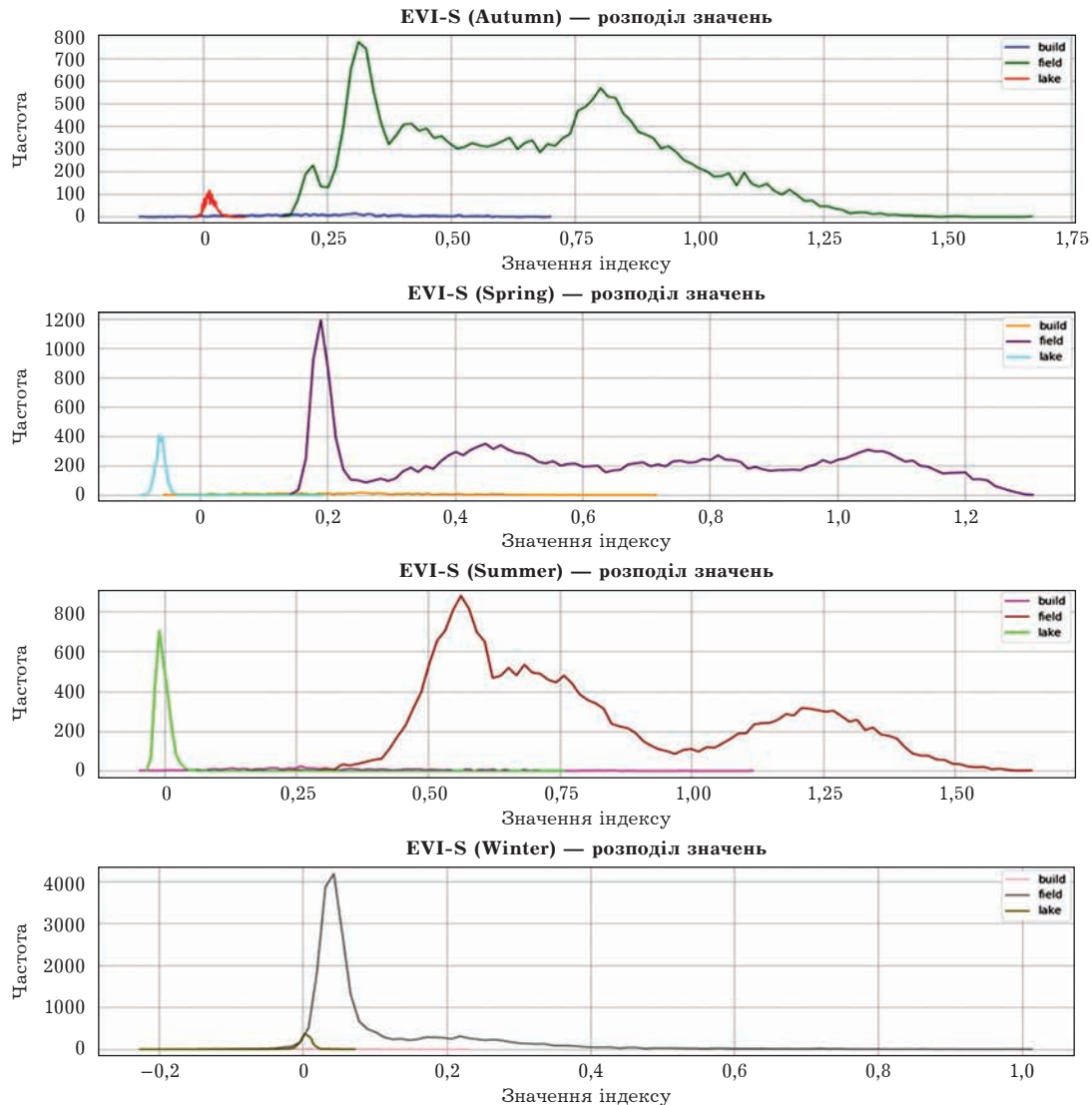


Рис. 9. Сезонна варіативність індексних значень EVI-S для тестових ділянок за порами року
Джерело: створено авторами.

дексів (EVI-S, NDWI, NDBI, NDBI_{Blue}), після чого для кожного з них було застосовано порогову сегментацію.

Відповідно до визначених діапазонів значень індексів, що найбільш імовірно відповідають класу “build”, значення пікселів було приведено до двійкового формату: 1 — значення в межах діапазону класу “build”; 0 — усі інші пікселі.

Для бінарних растрових зображень, отриманих у результаті, здійснено фільтрацію за значенням “1”. Таким чином, отримано полігони, які репрезентують контури урбанізованих територій на основі кожного окремого індексу (див. рис. 10).

Після порогової фільтрації об’єктів векторних шарів було виявлено помітні відмінності в площах, отриманих із різних індексів.

З огляду на це, подальше застосування класифікації методом Maximum Likelihood стало логічним кроком для отримання більш достовірних результатів із метою подальшого порівняння. Цей метод дозволяє враховувати розподіл значень усіх обраних індексів одночасно, оцінюючи ймовірність належності пікселя до певного класу на основі багатовимірного статистичного аналізу.

Для побудови класифікаційної моделі обрано три індекси:

- EVI-S — як модифікований вегетаційний індекс, що демонструє стабільну реакцію на відкриті ґрунти та рослинний покрив;
- NDWI — ефективно виявляє водні об’єкти, чітко розмежовуючи їх від інших типів об’єктів;
- NDBI_{Blue} — модифікований індекс, який краще за класичний NDBI, згідно з рис. 10, за-

EVI-S

NDBI_{Blue}

NDWI

NDBI

Рис. 10. Результати векторизації зон забудови на основі індексів EVI-S, NDWI, NDBI, NDBI_{Blue}
Джерело: створено авторами.

Вектори
індексів

Класифіковане
зображення

Супутникове зображення
Google

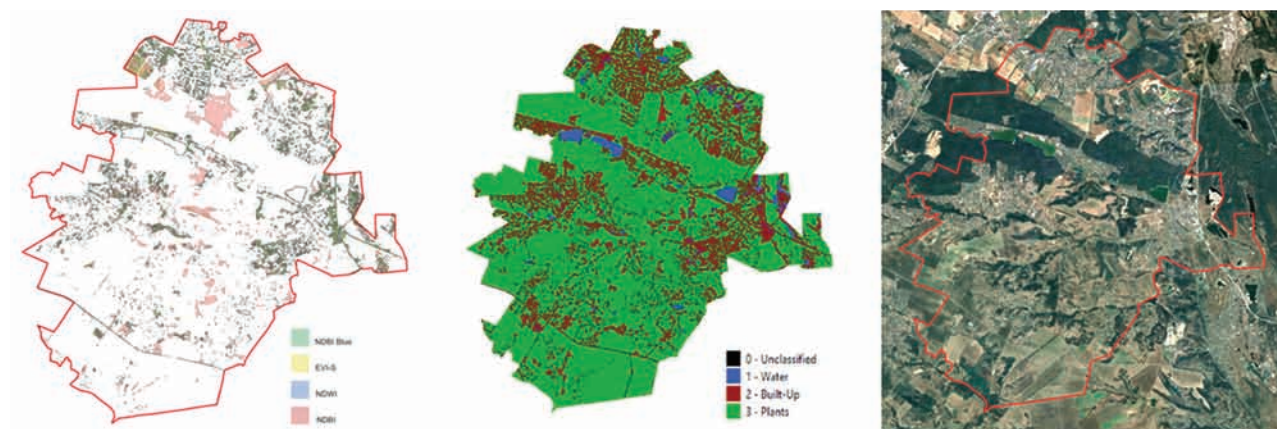


Рис. 11. Візуалізація результатів індексного аналізу, класифікації та супутникового підтвердження урбанізованих територій

Джерело: створено авторами.

Таблиця 2

Значення площі забудови за векторними шарами, га

Загальна площа	Класифікація	NDBI	NDWI	NDBI _{Blue}	EVI-S
11506,76	2277,54	1229,59	603,79	689,01	476,92

Джерело: сформовано авторами.

безпечує виявлення забудованих територій, маючи меншу чутливість до полів і ґрунтів.

Три обрані растри індексів забезпечують цільове охоплення основних класів об'єктів: вода, рослинність / відкритий ґрунт, забудова. Відповідно, класифікація на основі растрів забезпечує необхідну точність результатів.

Зображення результату накладення векторів чотирьох індексів із класом забудови, растру класифікованих об'єктів та знімку Google Satellite наведено на *рис. 11*.

На *рис. 11* для порівняння наведено результат накладення векторних шарів, отриманих за індексами (ліворуч), результат класифікації методом Maximum Likelihood на основі індексів EVI-S, NDWI та NDBI_{Blue} (у центрі) і супутникове зображення Google (праворуч). Червоний контур позначає межі досліджуваної території.

На наступному етапі дослідження зображення, отримане в результаті класифікації, було перетворено з растрового формату у векторний.

Після векторизації виконано фільтрацію за значенням класу 2, який у межах класифікації відповідає урбанізованим територіям (*рис. 12*).

На основі цих векторних шарів було розраховано площі забудованих територій для кожного шару, отриманого з відповідного індексу (*табл. 2*). Це дозволяє кількісно порівняти ефективність індексів у виявленні забудови, визначити їхню чутливість до урбанізованих об'єктів та зіставити результати з даними візуального спостереження та класифікації.

Таблиця з наведеними площами забудови дозволяє оцінити ефективність використання індексів у виявленні урбанізованих територій. Кількісна оцінка допомагає обґрунтувати вибір найкращого індексу для подальшого аналізу.

ВИСНОВКИ

Наше дослідження засвідчило як потенціал, так і обмеження сучасних спектральних індексів для виявлення урбанізованих територій. Аналіз сезонних розподілів значень індексів NDWI, NDBI, NDBI_{Blue} та запропонованого модифікованого індексу EVI-S дозволив виявити

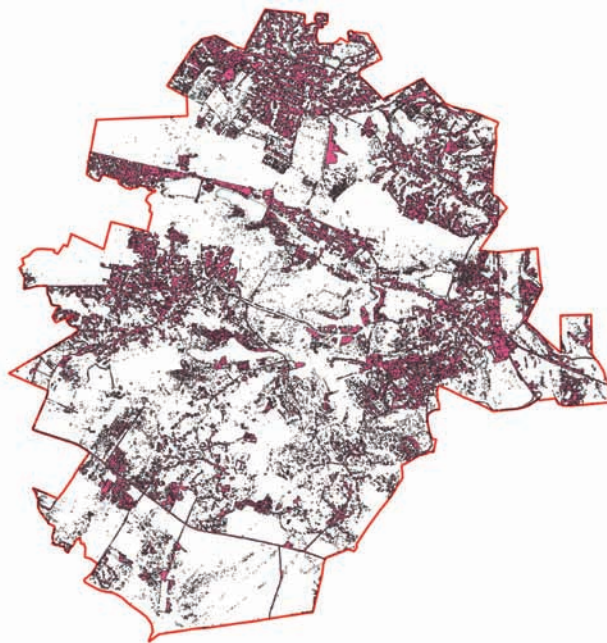


Рис. 12. Векторизований шар класифікованих об'єктів із фільтром по забудові

Джерело: створено авторами.

як загальні закономірності, так і критичні обмеження їхнього застосування.

Насамперед знімки за зимовий період виявилися непридатними для використання жодного з досліджуваних індексів через наявність снігового покриву, який унеможливорює точну класифікацію та ставить під сумнів доцільність обробки зимових знімків для виявлення урбанізованих об'єктів.

У літній період спектральний контраст між рослинністю, водними об'єктами та забудовою є найвиразнішим. Проте, як показав аналіз гістограм, жоден з індексів не забезпечує абсолютно чіткої сегментації забудованих територій. Навіть ті індекси, розроблені для таких задач (зокрема NDBI), виявляють суттєві похибки. Модифікований індекс NDBI_{Blue} показав дещо кращі результати, але й він має свої недоліки.

Застосування класифікації методом Maximum Likelihood із використанням трьох індексних растрів (EVI-S, NDWI, NDBI_{Blue}) дозволило компенсувати індивідуальні слабкі сторони

кожного з індексів. Попри наявність похибок, результат класифікації показав більшу площу забудованих територій порівняно з попередніми векторними результатами. Це частково пояснюється включенням прилеглих територій (дворів, доріг, майданчиків), які функціонально пов'язані з урбанізованим середовищем. Хоча така генералізація не завжди є точною в межах конкретного пікселя, з практичної точки зору це забезпечує більш цілісне відображення фактичної забудови.

Отже, різноманітні методи автоматичної класифікації виявляються більш перспективними, особливо за умови попереднього ретельного підбору індексів, які відображають різні аспекти ландшафтного покриття. Водночас слід враховувати обмеження — похибки через сезонні умови, змішані пікселі та недосконалість спектральної

реакції деяких об'єктів (наприклад, новобудов або ділянок із тимчасовими покриттями).

У подальших дослідженнях доцільно розглядати не лише вдосконалення комбінацій індексів, але й використання додаткових джерел даних — таких як нічне освітлення, підвищення просторової роздільної здатності або машинне навчання на основі тренувальних векторів. Перспективним також є поєднання класифікації з методами семантичного сегментування, що дозволяє враховувати просторовий контекст і морфологічні особливості забудови.

Результати дослідження підтверджують, що ефективне виявлення забудови потребує поєднання індексного та класифікаційного підходів із врахуванням сезонної придатності даних і структурної складності урбанізованого середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. NDBI. *ArcGIS Pro*. URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/ndbi.htm> (accessed: 07.06.2025).
2. Index Formula List. *RIndCalc documentation*. URL: <https://rindcalc.readthedocs.io/en/latest/Index%20Formula%20List.html> (accessed: 07.06.2025).
3. Santecchia G. S., Revollo Sarmiento G. N., Genchi S. A. et al. Assessment of Landsat-8 and Sentinel-2 water indices: A case study in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of Imaging*. 2023. Vol. 9, iss. 9. Article 186. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging9090186>
4. Bhangale U., More S., Shaikh T., Patil S. Analysis of surface water resources using Sentinel-2 imagery. *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 171. P. 2645–2654. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.287>
5. Drešković N., Đug S., Osmanović M. NDVI and NDBI indexes as indicators of the creation of urban heat islands in the Sarajevo basin. *Geographica Pannonica*. 2024. Vol. 28, no. 1. P. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.5937/gp28-48216>
6. Hashim H., Abd Latif Z., Adnan N. A. Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2023. Vol. XLII-4/W16. P. 237–241. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019>
7. Loukili I., Laamrani A., El Ghorfi M., El Moutak S., Ghafiri A. Monitoring land changes at an open mine site using remote sensing and multi-spectral indices. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, iss. 2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41845>
8. Rouibah K., Belabbas M. Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*. 2020. No. 56. P. 89–101. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13787>
9. Hidayati I. N., Suharyadi R., Danoedoro P. Developing an extraction method of urban built-up area based on remote sensing imagery transformation index. *Forum Geografi*. 2018. Vol. 32, no. 1. P. 96–108. DOI: <https://doi.org/10.23917/forgeo.v32i1.5907>
10. Zheng Y., Tang L., Wang H. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 328. 129488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129488>
11. Zhu W., Yuan C., Tian Y. et al. A new high-resolution rural built-up land extraction method based on artificial surface index with short-wave infrared downscaling. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No 7. 1126. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16071126>
12. Lynch P., Blesius L., Hines E. Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 15. 2503. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152503>
13. Феодосіївська територіальна громада. Портал “Децентралізація”. URL: <https://decentralization.ua/newgromada/4092> (дата звернення: 07.06.2025).
14. Кліматичні дані по Києву. Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського. URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/> (дата звернення: 07.06.2025).
15. Why does NDVI, NDBI, NDWI Ranges From -1 to 1? *GIS Resources*. URL: <https://gisresources.com/ndvi-ndbi-ndwi-ranges-1-1/> (accessed: 07.06.2025).
16. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24 (3). P. 583–594. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
17. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water

features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, no. 7. P. 1425–1432. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

18. Javed A., Cheng Q., Peng H., Altan O., Li Y., Ara I., Huq M. E., Ali Y., Saleem N. Review of spectral indices for urban remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2021. Vol. 87, no. 7. P. 513–524. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.87.7.513>

COMPARATIVE ANALYSIS OF SPECTRAL INDICES FOR BUILDING DETECTION BASED ON SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES

Iliencko T.

Candidate of Agricultural Sciences

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>

Vasiliev D.

Postgraduate student

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>

As a result of the accelerated processes of urbanization and the seasonal variations in the landscape cover, adaptive and precise methods for built-up area identification from space are necessary. The conventional spectral indices, majorly NDBI and NDVI, show inadequate stability over seasonal variations particularly when snow is present and where open soil exists. Within this study, a comparison between NDBI, NDWI, modified NDBI_{Blue}, and EVI-S indices proposed by the authors is made. Seasonal multispectral Sentinel-2 images were chosen to test them. This gives an opportunity to evaluate these indices' effectiveness in four seasonal periods. According to the three types of categories — building water areas and arable land each index gave out varied sensitivity levels. The optimum results for the discrimination of urbanized areas were obtained during summer, and winter proved to be an inappropriate season for classification since there is a very high number of false positives due to snow coverage. The last step of this work was classification with Maximum Likelihood using three index layers, building a vectorized model of the structures with great fidelity to what is seen in the satellite image. This study can initiate trust in a hybrid approach that takes seasonal sensitivity from spectral indices and hands over to automated methods of classification while it points out that there is constant need that methods should be advanced having errors within classes reduced particularly when open ground or shaded areas are present.

Keywords: remote sensing, spectral indices, desertification, urbanization, seasonal variability of spectral indices.

REFERENCES

1. ArcGIS Pro. (n.d.). *Normalized Difference Built-up Index (NDBI)*. Retrieved from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/spatial-analyst/ndbi.htm>
2. RIndCalc documentation. (n.d.). *Index Formula List*. Retrieved from <https://rindcalc.readthedocs.io/en/latest/Index%20Formula%20List.html>
3. Santeccchia, G. S., Revollo Sarmiento, G. N., Genchi, S. A., Vitale, A. J., & Delrieux, C. A. (2023). Assessment of Landsat-8 and Sentinel-2 water indices: A case study in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina). *Journal of Imaging*, 9(9), 186. doi: 10.3390/jimaging9090186
4. Bhangale, U., More, S., Shaikh, T., & Patil, S. (2020). Analysis of surface water resources using Sentinel-2 imagery. *Procedia Computer Science*, 171, 2645–2654. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.287
5. Drešković, N., Đug, S., & Osmanović, M. (2024). NDVI and NDBI indexes as indicators of the creation of urban heat islands in the Sarajevo basin. *Geographica Pannonica*, 28(1), 34–43. doi: 10.5937/gp28-48216
6. Hashim, H., Abd Latif, Z., & Adnan, N. A. (2019). Urban vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W16, 237–241. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019
7. Loukili, I., Laamrani, A., El Ghorfi, M., El Moutak, S., & Ghafiri, A. (2025). Monitoring land changes at an open mine site using remote sensing and multi-spectral indices. *Heliyon*, 11(2), e41845. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41845
8. Rouibah, K., & Belabbas, M. (2020). Applying multi-index approach from Sentinel-2 imagery to extract urban area in dry season (semi-arid land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*, 56, 89–101. doi: 10.4995/raet.2020.13787
9. Hidayati, I. N., Suharyadi, R., & Danoedoro, P. (2018). Developing an extraction method of urban built-up area based on remote sensing imagery transformation index. *Forum Geografi*, 32(1), 96–108. doi: 10.23917/forgeo.v32i1.5907
10. Zheng, Y., Tang, L., & Wang, H. (2021). An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. *Journal of Cleaner Production*, 328, 129488. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129488
11. Zhu, W., Yuan, C., Tian, Y., Wang, Y., Liping, L., & Hu, C. (2024). A new high-resolution rural built-up land extraction method based on artificial surface index with short-wave infrared downscaling. *Remote Sensing*, 16(7), 1126. doi: 10.3390/rs16071126

12. Lynch, P., Blesius, L., & Hines, E. (2020). Classification of urban area using multispectral indices for urban planning. *Remote Sensing*, 12(15), 2503. doi: 10.3390/rs12152503
13. Decentralization portal. (n.d.). Feodosiivska Territorial Community. Retrieved June from <https://decentralization.ua/newgromada/4092>
14. Sreznevskyi Central Geophysical Observatory. (n.d.). Climatic data for Kyiv. Retrieved from <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/>
15. GIS Resources. (n.d.). Why does NDVI, NDBI, NDWI range from -1 to 1? Retrieved from <https://gisresources.com/ndvi-ndbi-ndwi-ranges-1-1>
16. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. doi: 10.1080/01431160304987
17. McFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. doi: 10.1080/01431169608948714
18. Javed, A., Cheng, Q., Peng, H., Altan, O., Li, Y., Ara, I., & Saleem, N. (2021). Review of spectral indices for urban remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(7), 513–524. doi: 10.14358/PERS.87.7.513

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ІЛЬЄНКО Тетяна Володимирівна — кандидат сільськогосподарських наук, завідувач лабораторії, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5406-5449>).

ВАСИЛЬЄВ Дмитро Петрович — аспірант, Інститут агроекології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: freimaster.af@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0578-3539>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

Згідно з Законом України №3855-IX “Про інтегроване запобігання та контроль промислового забруднення”, який набуває чинності 8 серпня 2025 року, підприємства матимуть 3 роки для подання заяви та додатковий 1 рік на отримання інтегрованого дозвілу (ІДД). Як повідомило Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів, першочерговим кроком для бізнесу є визначення, чи підпадає їхня діяльність під перелік, що вимагає отримання ІДД. Відлік термінів для екомодернізації розпочнеться з моменту набрання чинності закону, що створює чіткі рамки для переходу підприємств на нові екологічні стандарти.

ФОРМУВАННЯ ЕКОМЕРЕЖ У КОНТЕКСТІ ВПЛИВУ НЕОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНЮВАЧІВ

С. В. Совгіра

доктор педагогічних наук, професор

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (м. Умань, Україна)

e-mail: sovgyrasvitlana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8742-7773>**Н. Ю. Душечкіна**

кандидат педагогічних наук, доцент

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (м. Умань, Україна)

e-mail: nataxeta74@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4203-7122>**О. В. Кочубей**

доктор філософії з педагогіки

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (м. Умань, Україна)

e-mail: sncelena@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-6694>

У статті представлено результати комплексного дослідження, спрямованого на оцінку впливу неорганічних забруднювачів на формування екомережі регіону Центрального Побужжя (Україна). Обґрунтовано необхідність урахування просторового розподілу хімічного навантаження у структурному плануванні екомереж, зокрема в процесі визначення меж екокоридорів, буферних зон і природних ядер. Досліджено вміст важких металів (свинцю, кадмію, цинку, міді, нікелю) у ґрунтах, донних відкладах і в надземних частинах рослин. Проаналізовано концентрації нітратів і фосфатів у воді річок і ставків, а також визначено їхній вплив на гідробіоти, зоопланктон, зообентос і риби. Встановлено, що неорганічне забруднення спричиняє порушення мікробіологічної активності ґрунтів, деградацію біоти, спрощення структур природних угруповань, а також активну біоаккумуляцію токсикантів у тканинах організмів. У межах зон техногенного навантаження зафіксовано зменшення видового різноманіття фітоценозів на 40–50%, зниження вмісту хлорофілу в модельних рослинах, пригнічення ферментативної активності ґрунтових мікроорганізмів. За допомогою ГИС-аналізу ідентифіковано просторові зони між проектованими елементами екомережі та осередками підвищеного забруднення. На основі отриманих результатів сформульовано низку практичних рекомендацій щодо адаптації схеми екомережі до умов техногенно трансформованого ландшафту. Зокрема, запропоновано здійснити рекультивацию забруднених ґрунтів, створити буферні лісосмуги, перенести маршрути екокоридорів у більш екологічно стабільні зони, а також запровадити довготривалий екологічний моніторинг. Результати дослідження мають важливе теоретичне та практичне значення для природоохоронного планування, відновлення деградованих екосистем і сталого просторового розвитку регіону.

Ключові слова: важкі метали, нітрати, деградація екосистем, фіторе mediaція, ГИС-аналіз, біоіндикація, сталий розвиток, Центральне Побужжя.

ВСТУП

Екологічні мережі — це просторово взаємопов'язані системи природних територій, призначені для збереження біорізноманіття та забезпечення стійкості екосистем на ландшафтному рівні. Сучасне суспільство дедалі більше усвідомлює важливість таких мереж для протидії фрагментації середовища, ізоляції популяцій та деградації ландшафтів.

Україна, зокрема, активно впроваджує концепцію національної екологічної мережі, спираючись на законодавчі засади (Закон України “Про екологічну мережу”, 2004) та відповідну державну програму. Водночас на стан довкіл-

ля суттєво впливає техногенне навантаження: промисловість, сільське господарство та інші види діяльності призводять до накопичення неорганічних забруднювачів (важких металів, надлишкових мінеральних сполук тощо) у ґрунтах, воді та біоті.

За оцінками, понад 10 мільйонів га ґрунту у світі зазнали забруднення, причому більш ніж половина з них — важкими металами. Накопичення таких токсикантів у ґрунтового середовищі погіршує його якість і родючість, а також створює ризики для екосистем та здоров'я живих організмів. Крім того, у сільськогосподарських регіонах широко розповсюджене забруд-

нення вод нітратами: в Україні на території агроландшафтів концентрація нітратів у більшості криниць перевищує допустимий рівень — 50 мг/дм³, що спричиняє явище евтрофікації водойм і випадки метгемоглобінемії в людей.

За таких обставин особливо актуальним є дослідження впливу неорганічних забруднювачів на елементи екологічних мереж (ґрунти, рослинність, водні об'єкти) і врахування цього впливу на формування екомережі.

Метою дослідження є виявлення впливу основних неорганічних забруднювачів на компоненти екомережі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання формування екомереж та екологічної безпеки територій, забруднених неорганічними сполуками, є предметом численних наукових досліджень як в Україні, так і за кордоном. Упродовж останніх років наукові дослідження дедалі частіше зосереджуються на необхідності поєднання ландшафтно-екологічного планування з аналізом хімічного стану довкілля, зокрема рівнів забруднення ґрунтів, води та біоти неорганічними токсикантами.

Наукові дослідження з формування екологічних мереж в Україні свідчать про поступове здійснення національного екомережевого планування, орієнтованого на принципи Пан-Європейської екологічної мережі (англ. *Pan-European Ecological Network, PEEN*) [1–3]. Основні завдання національної екомережі визначені Законом України “Про екологічну мережу” та Загальнодержавною програмою її розвитку. Проте в новітніх публікаціях [4; 5] зазначається, що значна частина територій, які потенційно можуть бути включені до екомережі, зазнає антропогенного забруднення, зокрема важкими металами, що суттєво обмежує можливості їх інтеграції у природоохоронні структури.

Актуальність аналізу впливу хімічного навантаження на елементи екомережі підтверджується також зарубіжними дослідженнями. Зокрема, у публікаціях [6; 7] висвітлено механізми накопичення важких металів у ґрунтах різного типу, їхній вплив на біотичні угруповання та трансформацію екосистем унаслідок порушення ґрунтово-рослинного покриву. Автори вказують, що понад 16% сільськогосподарських земель у світі мають надлишковий вміст Cd, Pb, Zn або Hg, що є прямим чинником ризику для створення екокоридорів і збереження біотопів рідкісних видів.

В Україні тема взаємозв'язку між неорганічним забрудненням і структурою екосистем знайшла відображення в роботах [8–10]. Автори наводять дані про деградацію ґрунтів

у зоні техногенного навантаження: зниження біологічної активності, зменшення чисельності мікроорганізмів, накопичення важких металів у фітомасі, що суттєво знижує екологічну якість ландшафтів, включених до мережі або прилеглих до неї.

Окреме місце у структурі наукових розвідок посідає аналіз гідрологічного та гідрохімічного стану водних об'єктів — важливих компонентів екомереж. Річки, болота, заплави й озера формують середовище для рідкісних та ендемічних видів, проте, як свідчать матеріали досліджень [11–13], ці екосистеми зазнають сильного виливу внаслідок евтрофікації, підкислення та накопичення в донних відкладах важких металів і біогенних речовин. За даними державного моніторингу, у багатьох річках України вміст нітратів перевищує гранично допустимі концентрації, що унеможлиблює їхнє використання як території для міграції фауни в межах екокоридорів [14].

Дослідження фіторе mediaційного потенціалу деяких рослин, здатних до акумуляції важких металів, знайшли відображення в праці [15]. Автори доводять можливість використання фітомеліоративних заходів у межах деградованих територій, включених до екомереж, з метою зниження токсичності ґрунтів і покращення умов для відновлення рослинного покриву.

Низка сучасних публікацій акцентує увагу на важливості застосування наноматеріалів у моніторингових і відновлюваних технологіях, що може бути корисним для діагностики трансформованих компонентів екомереж. Перспективним є також досвід інтеграції геоінформаційних технологій у плануванні просторової конфігурації екомереж, що дозволяє враховувати трансформованість територій у процесі прокладання екологічних коридорів і визначення буферних зон [5].

Отже, проаналізовані дослідження свідчать про міждисциплінарний характер проблеми: вона охоплює як природоохоронне планування, так і хіміко-аналітичний контроль стану довкілля. Проте, незважаючи на значну кількість публікацій, на сьогодні залишається недостатньо розробленим питання інтеграції хімічної безпеки в практику формування екомереж, що створює підґрунтя для подальших досліджень.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено з використанням комплексного підходу, який поєднував аналіз просторових даних, лабораторні вимірювання, біоіндикаційні методи та геоінформаційне моделювання.

Основними об'єктами спостереження в межах екомережі Центрального Побужжя були елементи ландшафтної структури (екодра, екокоридори, буферні зони), що зазнають впливу неорганічних забруднювачів.

Польові дослідження здійснювалися у весняно-літній період 2024 року на територіях, що охоплювали зони інтенсивного сільськогосподарського використання, промислові ділянки та умовно чисті контрольні території. Відбір проб ґрунтів проводився з глибини 0–20 см за сіткою 25×25 м для забезпечення репрезентативності, а зразки води з поверхневих водойм — на глибинах 0,3–0,5 м відповідно до стандартів ДСТУ ISO 5667-6:2001 [1]. Одночасно проводився опис рослинних угруповань на облікових ділянках (10 м²) із фіксацією видового складу, проєкційного покриття та біомаси.

У лабораторних умовах вміст важких металів (Pb, Cd, Cr, Cu, Zn) у пробах ґрунту та води визначався методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії (ААС) згідно з методикою [2]. Визначення нітратів і фосфатів здійснювалося колориметричним методом: для NO₃⁻ — з використанням сульфанілової кислоти, для PO₄³⁻ — з молібдату амонію [3]. Кислотність ґрунтів (pH) вимірювали у водній витяжці (1:2,5), а вміст гумусу — за Тюріном у модифікації Коновалова [4].

Для просторової візуалізації результатів та оцінки територіального розподілу забруднення застосовувалися геоінформаційні технології на базі QGIS. Обробка супутникових знімків Sentinel-2, відкритих векторних шарів CORINE Land Cover та ГІС-шарів екомережі, дозволила створити інтегровану карту концентрацій забруднювачів із накладанням на межі планованої екомережі. Це дало змогу виявити просторові зони між осередками біорізноманіття та техногенним навантаженням [5].

Для оцінки екологічного стану території використовувалися біоіндикаційні методи. Стан рослинних угруповань аналізували за видовим різноманіттям, індексами Шеннона та Пієлу. Для водних об'єктів застосовували індекси сапробності Pantle-Buck, а для ґрунтів — мікробіологічний індекс, що охоплював оцінку чисельності мікроорганізмів, активності каталази та дегідрогенази [6].

Інтегральну оцінку ступеня забруднення здійснювали за допомогою кількох екологічних індексів. Зокрема, індекс геохімічного накопичення (I_{geo}) за Müllera дозволив оцінити відхилення від фонового рівня. Індекс екологічного ризику (Er) за Hakanson використовувався для обчислення потенційної токсичності металів, а комплексний індекс Немероу —

для інтегральної оцінки багатofакторного навантаження [7].

Отже, обрані методи дозволили не лише визначити концентрації основних неорганічних забруднювачів, а й провести комплексну просторову та біоіндикаційну оцінку їхнього впливу на потенційні ділянки екомереж, що є основою для екологічно обґрунтованого природокористування.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У результаті дослідження встановлено, що забруднення довкілля неорганічними токсикантами — зокрема, важкими металами та біогенними елементами (нітратами, фосфатами) — має суттєвий вплив на стан екосистем Центрального Побужжя. Найбільшу загрозу становлять антропогенно навантажені території, де концентрації забруднювачів значно перевищують регіональні фонові рівні. Комплексна оцінка стану довкілля охоплювала аналіз ґрунтів, води, рослинності, біоти та просторову прив'язку до проєктованої екомережі [1].

Зокрема, виявлено значні концентрації важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, Ni) у верхньому шарі ґрунту (0–20 см), особливо поблизу транспортних коридорів, колишніх промислових зон, складів агрохімікатів. Найвищі рівні свинцю зафіксовано поблизу доріг регіонального значення — 120–180 мг/кг, що у 3–4 рази перевищує фонові значення для ґрунтів Лісостепу [3]. Вміст кадмію та нікелю в деяких точках перевищує ГДК у 1,5–2,2 рази [8]. Ці елементи є високотоксичними навіть у незначних кількостях, а їхня наявність у ґрунті пригнічує активність мікроорганізмів, знижує ферментативну функцію, уповільнює розкладання органіки. Виявлено значне зменшення мікробної біомаси, погіршення азотофіксації, активності дегідрогеназ, каталази та фосфатаз [4].

Водночас вплив важких металів на рослинний покрив Центрального Побужжя проявляється в зменшенні проєкційного покриття та зниженні фітодиверсифікації. У зонах із підвищеним вмістом Pb і Cd видовий склад скорочується на 35–50% порівняно з референсними ділянками [5]. Домінування переходить до екологічно пластичних видів, зокрема *Amaranthus retroflexus*, *Chenopodium album*, *Polygonum aviculare*. Типові лісо-лучні фітоценози заміщуються вторинними дерновими угрупованнями, які є менш цінними для формування стабільного середовища для фауни. Вміст хлорофілу в листках модельних видів (*Trifolium pratense*, *Festuca rubra*) був на 25–30% нижчим на забруднених ділянках [6].

Особливу увагу приділено вивченню стану водних об'єктів. Річки Південний Буг, Устя, Дохна, Бершадка та численні дрібні притоки регіону є ключовими екокоридорами, проте зазнають суттєвого біогенного та металевого навантаження [7]. Вміст нітратів у воді навесні сягав 80–120 мг/дм³ (ГДК — 45 мг/дм³), фосфатів — до 1,2 мг/дм³ (норма — 0,2) [3]. Вміст хлорофілу-*a* у фітопланктоні досягав 90 мкг/дм³, що вказує на гіперевтрофний стан водойм. У донних відкладах ставків і заплавлених ділянок річок зафіксовано концентрації важких металів: цинку (Zn) — 140–190 мг/кг, свинцю (Pb) — 60–85 мг/кг [9].

Біотичні індикатори підтверджують зміни екосистемного стану досліджуваних територій. У зоопланктоні водойм спостерігалось домінування *Brachionus calyciflorus*, *Keratella quadrata* та зменшення чисельності *Cladocera* [10]. Макрозообентос представлений переважно толерантними до гіпоксії личинками комарів (*Chironomidae*) та олігохетами. У прибережній іхтіофауні відзначено зниження чисельності окуня, плітки та зникнення форелі з приток. У тканинах риб фіксувалося перевищення допустимих рівнів Hg та Cd [11].

На основі аналізу просторового розподілу забруднення за допомогою ГІС встановлено, що понад 30% проєктованих екокоридорів у регіоні проходять територіями з незадовільною екологічною стійкістю. Зокрема, водні притоки Південного Бугу зазнають агрохімічного навантаження, а перешийки між природними лісовими масивами — металевого. Виявлено конфліктні ділянки: зона між селами Побузьке й Крижопіль, прибережна смуга Бершадки. Це вимагає корекції маршрутів коридорів або проведення рекультиваційних заходів [12].

Отже, формування екомережі в Центральному Побужжі має ґрунтуватися на інтегрованому підході, що враховує реальні екологічні ризики. Це дозволить забезпечити екосистемну стійкість, збереження біорізноманіття та реалізацію природоохоронного потенціалу території в умовах антропогенного забруднення.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження засвідчують, що неорганічні забруднювачі, насамперед важкі метали та біогенні сполуки (нітрати, фосфати),

є критичним чинником, який ускладнює процес формування ефективної та стійкої екомережі в межах Центрального Побужжя. Встановлено, що значна частина територій, запланованих для включення до структури екомережі, перебуває під впливом різнотипного хімічного навантаження, яке створює потенційні бар'єри для збереження та відтворення біорізноманіття.

Ґрунтове забруднення важкими металами спричиняє деградацію фізико-хімічних властивостей, зниження родючості, пригнічення ґрунтової мікрофлори та фауни. Порушується мінеральний обмін у рослин, скорочується видовий склад природних фітоценозів, зростає частка нітрофільних і толерантних видів. Водні екосистеми зазнають впливу евтрофікації, дефіциту кисню, накопичення токсичних речовин у донних відкладах, що призводить до структурної деградації фіто- та зооугруповань. У донних організмах і рибах фіксується біоаккумуляція свинцю, кадмію, ртуті, що створює ризики для вищих трофічних рівнів, зокрема людини.

Застосування ГІС-аналізу дозволило просторово локалізувати ділянки з рівнем забруднення та елементами перспективної екомережі. Найбільш уразливими виявилися прибережні смуги та ділянки поблизу промислових і аграрних об'єктів, на яких концентрації забруднювачів значно перевищують гранично допустимі норми.

На основі отриманих результатів запропоновано низку управлінських рішень: впровадження фіторемедіаційних заходів, розширення буферних смуг, коригування конфігурації елементів екомережі з урахуванням осередків забруднення, створення системи довгострокового моніторингу. Ці заходи мають бути інтегровані в просторове планування, регіональну екологічну політику та практику природоохоронного менеджменту.

Отже, у контексті формування екомереж в умовах антропогенно трансформованих ландшафтів необхідно впроваджувати адаптивні підходи, які враховують реальний стан довкілля, його вразливість і здатність до самовідновлення. Це дозволить створити не лише формально зв'язані природні території, а повноцінно функціональні екологічні структури, здатні підтримувати стійкість ландшафтів і біорізноманіття в умовах техногенного навантаження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гуліч М. П., Харченко О. О., Ємченко Н. Л. та ін. Війна в Україні: проблема забруднення важкими металами сільськогосподарських угідь та продукції (аналіз літературних даних). *Довкілля та здоров'я*. 2024. № 4. С. 38–44. DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038>
2. Євтушенко О. О., Боднарук І. В. Моніторинг стану поверхневих вод України: проблеми та перспективи. *Вісник НАН України*. 2021. № 9. С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30888/2410-6615.2020-06-02-108>

3. Совгіра С., Душечкіна Н., Гончарук В. та ін. Комплексна оцінка екологічної безпеки малих річок Південно-Бузького екологічного коридору: монографія ; за ред. С. Совгіри ; Умань: Сочінський М. М., 2025. 216 с.
4. Бойко О. В., Гончар О. Ф., Гавриш О. М., Осокіна Т. Г. Формування екологічної мережі Черкаської області. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 3. С 14–19. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2019.183463>
5. Бужин О. А., Швиденко А. В., Куліца О. С. та ін. Екологічна безпека: експлуатація ґрунтів у Черкаській області. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. № 1 (19). С. 53–58. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1\(19\)-53-58](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2019-1(19)-53-58)
6. Омелич І. Ю., Непошивайленко Н. О. Концентрації рухомих форм важких металів (Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) у ґрунтах сільськогосподарських угідь. *Східноукраїнський науковий вісник*. 2022, Том 2 № 41. С. 149–160. DOI: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.41.2022.17>
7. Ткачук О. П., Яковець Л. А. Особливості забруднення зернової продукції важкими металами в умовах Вінницької області. *Сільське господарство та лісівництво*. 2016. № 4. С. 179–186.
8. Васецька А. В., Логінова М. В. Екологічна складова при відбудові малих українських міст. *Галузеві проблеми екологічної безпеки – 2024*: зб. матеріалів Міжнародної наук.-практ. конф. за участю молодих науковців (Харків, 24 жовтня 2024 р.). Харків, 2024. С. 16–17.
9. Моніторинг та технології очищення поверхневих вод басейну річки Південний Буг: монографія / С. В. Совгіра, Н. Ю. Душечкіна, В. Г. Парахненко [та ін.] ; за ред. С. Совгіри ; Умань: Сочінський М. М., 2025. 234 с.
10. Стецюк О., Кириченко Л., Любченко В., Ратошнюк Т. Динаміка важких металів у ґрунті за органічної технології виробництва хмелю. *Органічне виробництво і продовольча безпека*: збірник праць учасників Х Міжнародної науково-практичної конференції. Житомир: ПП “Євро-Волинь”, 2022. С. 221–223.
11. Мудрак О. В., Хаєцький Г. С., Мудрак Г. В., Серебряков В. В. Оцінка екологічного стану малих річок Східного Поділля в контексті сталого розвитку регіону. *Екологічні науки*. 2022. № 6 (45). С. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.21>
12. Баранов П. М. Біоіндикація як метод оцінювання стану довкілля: сучасні підходи. *Біологія та екологія*. 2020. № 4. С. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.32851/wba.2022.1.11>
13. Кучма Т. Л., Томченко О. В. Оцінка екосистемних послуг водно-болотних угідь за даними дистанційного зондування Землі. *Екологічна безпека та збалансоване природокористування в агропромисловому виробництві*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 3–5 лип. 2019 р.). Київ, 2019. С. 147–151.
14. Слепужников Е. Д., Петухов Р. А., Пономаренко Р. В., Буц Ю. В. Экологически безопасный метод локализации загрязнения почв при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія “Екологія”*. 2019. №. 21. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2019-21-05>
15. El-Sharkawy M., Alotaibi M. O., Li J., Du D., Mahmoud E. Heavy metal pollution in coastal environments: Ecological implications and management strategies: A review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. 701. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17020701>

FORMATION OF ECONETWORKS IN THE CONTEXT OF THE IMPACT OF INORGANIC POLLUTANTS

Sovhira S.

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor

Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine)

e-mail: sovgirasvitlana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8742-7773>

Dushechkina N.

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor

Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine)

e-mail: nataxeta74@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4203-7122>

Kochubei O.

Doctor of Philosophy in Education

Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University (Uman, Ukraine)

e-mail: sncelesna@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-6694>

The article presents the results of a comprehensive study focused on assessing the impact of inorganic pollutants on the formation of an ecological network in the Central Pobuzhzhia region (Ukraine). The necessity of incorporating spatial distribution of chemical pollution into ecological network planning-particularly in the development of ecological corridors, buffer zones, and core natural areas-is substantiated. The study includes an analysis of heavy metal concentrations (lead, cadmium, zinc, copper, nickel) in soils, bottom sediments, and above-ground plant biomass. Concentrations of nitrates and phosphates in rivers and ponds were also evaluated to determine their impact on aquatic organisms, zooplankton, benthos, and fish. It was found that inorganic pollution leads to disruptions in soil microbiological activity, degradation of biota, simplification of ecosystem structures, and active bioaccumulation of toxicants in organism tissues. In areas with intense anthropogenic pressure, species richness of phytocenoses decreased by 40-50%, chlorophyll content in model plant species was significantly reduced, and enzymatic activity in soils was suppressed. GIS analysis helped identify spatial conflict

zones between projected elements of the ecological network and pollution hotspots. Based on the findings, practical recommendations were developed for adapting ecological network schemes in anthropogenically transformed landscapes. These include soil remediation (phytoremediation), the establishment of riparian buffer zones, rerouting ecological corridors to more stable areas, and implementation of long-term environmental monitoring. The results presented in this study have both theoretical and practical significance for nature conservation planning, restoration of degraded ecosystems, and sustainable spatial development of polluted regions.

Keywords: heavy metals, nitrates, ecosystem degradation, phytoremediation, GIS analysis, bioindication, sustainable development, Central Pobuzhzhia.

REFERENCES

1. Hulich, M. P., Kharchenko, O. O., Yemchenko, N. L., Olshevska O. D., & Lyubarska L. S. (2024). War in Ukraine: the problem of heavy metal contamination of agricultural lands and products (analysis of literature data). *Environment & Health*, 4, 38–44. doi: 10.32402/dovkil2024.04.038
2. Yevtushenko O. O., & Bodnaruk I. V. (2021). Monitoring the state of surface waters of Ukraine: problems and prospects. *Bulletin of the NAS of Ukraine*, 9, 47–55. doi: 10.30888/2410-6615.2020-06-02-108
3. Sovhira, S., Dushechkina, N., Honcharuk, V., Kochubei, O., Liubynska, S., & Sharhorodskiy, O. (2025). *Comprehensive assessment of the environmental safety of small rivers in the Southern Bug ecological corridor: monograph* (S. Sovhira, Ed.). Uman: Sochynskyi M. M.
4. Boiko, O. V., Honchar, O. F., Havrish, O. M., & Osokina, T. H. (2019). Formation of the ecological network of Cherkasy region. *Agroecological journal*, 3, 14–19. doi: 10.33730/2077-4893.3.2019.183463
5. Buzhyn, O. A., Shvidenko, A. V., Kulitsa, O. S., Zaiets, R. A., & Hora, V. A. (2019). Environmental safety: soil exploitation in Cherkasy region. *Environmental safety and balanced resource use*, 1(19), 53–58. doi: 10.31471/2415-3184-2019-1(19)-53-58
6. Omelych, I. Yu., & Neposhyvailenko, N. O. (2022). Concentrations of mobile forms of heavy metals (Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) in agricultural soils. *East Ukrainian Scientific Bulletin*, 2(41), 149–160. doi: 10.31319/2519-2884.41.2022.17
7. Tkachuk, O. P., & Yakovets, L. A. (2016). Peculiarities of contamination of grain products with heavy metals in the conditions of Vinnytsia region. *Agriculture and forestry*, 4, 179–186.
8. Vasetska, A. V., & Lohinova, M. V. (2024). The environmental component in the reconstruction of small Ukrainian cities. In *Sectoral Problems of Environmental Safety — 2024: Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference with the participation of young scientists* (pp. 16–17). Kharkiv, 2024.
9. Sovhira, S. V., Dushechkina, N. Yu., Parakhnenko, V. H., Kochubei O., et al. (2025). *Monitoring and technologies for surface water purification of the Southern Bug river basin: monograph*. (S. V. Sovhira, Ed.). Uman: Sochinsky M. M.
10. Stetsiuk, O., Kyrychenko, L., Liubchenko, V., & Ratoszniuk, T. (2022). Dynamics of heavy metals in soil under organic hop production technology. In *Organic production and food security: Collection of works of participants of the X International Scientific and Practical Conference* (pp. 221–223). Zhytomyr: PP “Euro-Volyn”.
11. Mudrak, O. V., Khaietskyi H. S., Mudrak H. V., & Serebriakov, V. V. (2022). Assessment of the ecological state of small rivers of Eastern Podillia in the context of sustainable development of the region. *Ecological Sciences*, 6(45), 132–138. doi: 10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.21
12. Baranov, P. M. (2020). Bioindication as a method of assessing the state of the environment: modern approaches. *Biology and Ecology*, 4, 77–83. doi: 10.32851/wba.2022.1.11
13. Kuchma, T. L., & Tomchenko, O. V. (2019). Assessment of ecosystem services of wetlands based on remote sensing data. In *Ecological safety and balanced environmental management in agro-industrial production: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 147–151). Kyiv.
14. Slepuzhnikov, E. D., Pietukhov, R. A., Ponomarenko, R. V., & Buts, Y. V. (2019). Environmentally safe method of localization of soil pollution in emergency situations of technogenic nature. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 21, 63–71. doi: 10.26565/1992-4259-2019-21-05
15. El-Sharkawy, M., Alotaibi, M.O., Li, J., Du, D., & Mahmoud, E. (2025). Heavy metal pollution in coastal environments: Ecological implications and management strategies: A review. *Sustainability*, 17, 701. doi: 10.3390/sul7020701

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

СОВГІРА Світлана Василівна — доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (вул. Садова, 2, м. Умань, Україна, 20300; e-mail: sovginasvitlana@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8742-7773>).

ДУШЕЧКІНА Наталія Юріївна — кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (вул. Садова, 2, м. Умань, Україна, 20300; e-mail: nataxeta74@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4203-7122>).

КОЧУБЕЙ Олена Василівна — доктор філософії, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини (вул. Садова, 2, м. Умань, Україна, 20300; e-mail: sncelena@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-6694>).

BIOECOLOGICAL AND ENERGY POTENTIAL OF *ROBINIA PSEUDOACACIA* L. STANDS UNDER THE CONDITIONS OF THE VINNYTSIA FORESTRY DISTRICT OF SE "FORESTS OF UKRAINE"

S. Razanov

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, Ukraine)

e-mail: razanovsergej65@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-2696>

M. Matusiak

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, Ukraine)

e-mail: mikhailo1988@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8099-7290>

A. Bondar

Doctor of Agricultural Sciences, Professor,

Academician of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine (Vinnytsia, Ukraine)

e-mail: bondar19572204@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0063-7713>

O. Vradii

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

Vinnytsia National Agrarian University (Vinnytsia, Ukraine)

e-mail: oksanavradii@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7383-3829>

The scientific work presents the results of a comprehensive study of the productivity and ecological role of *Robinia pseudoacacia* L. plantations in Vinnytsia region. The relevance of the study stems from the widespread use of this species in agroforestry, energy forestry, and the reclamation of degraded lands, due to its high ecological plasticity, ability to fix atmospheric nitrogen, and rapid biomass growth. A review of the literature demonstrates the ambivalent impact of *Robinia pseudoacacia* L.: on the one hand, it improves soil fertility and increases nitrogen content; on the other hand, it poses a risk of displacing native plant species and disrupting the hydrological regime of the area. Fifteen temporary test plots with a total area of 5.25 hectares were established within the Vinnytsia Forestry Branch. Plot selection was carried out based on forest site conditions, stand age, species composition, site quality, and sanitary condition. The data collection methodology followed the national standard SOU 02.02-37-476:2006, ensuring the representativeness and reliability of the obtained data. The results of the study indicate the high biological productivity of *Robinia pseudoacacia* plantations within the Vinnytsia Forestry District. The predominant forest site conditions were fresh loams (type C2), which provided optimal conditions for the growth of this species. The age structure of the plantations is characterized by the dominance of young and middle-aged stands (over 56%), indicating active regeneration dynamics. Maturing, mature, and overmature stands accounted for a smaller proportion, reflecting effective forest management practices. The silvicultural and mensurational characteristics revealed significant variability in stand parameters depending on age. The average tree diameter ranged from 3.7 cm in 4-year-old stands to over 27 cm in 82-year-old stands, while tree height varied from 4.2 to 24.5 m. Absolute stand density ranged from 1.24 to 44.71 m²/ha, and relative density from 0.22 to 1.09, indicating different developmental stages and stand densities. Owing to the high wood density and calorific value, the stands exhibit considerable potential for biomass production as a source of renewable energy. The assessment of phytomass across different fractions of the aboveground tree components enabled an objective estimation of accumulated biomass per unit area and the calculation of potential energy yields. Structural analysis of sample plots by site quality classes revealed a predominance of medium-quality stands (classes I and III), characterized by an optimal balance between growth and ecosystem stability. This creates promising prospects for the further use of *Robinia pseudoacacia* L. in regional forestry practices as a key tool for bioenergy development and forest reclamation of degraded lands.

Keywords: energy efficiency, silvicultural and taxonomic indicators, type of forest vegetation conditions, productivity, biomass, phytomass.

INTRODUCTION

Robinia pseudoacacia L., commonly known as black locust or "false acacia", is a fast-growing tree species widely utilized in forest reclamation, energy production, and land restoration projects. Its ability to fix atmospheric nitrogen, tolerance to drought, and adaptability to poor soils make it especially valuable for the rehabilitation of degraded lands [1].

However, the introduction of black locust may have negative ecological consequences. Studies conducted in Central Europe have demonstrated that it alters the understory structure and microclimate, promoting the spread of light-demanding and nitrophilous species, which can lead to the displacement of native flora [2].

From an energy perspective, black locust demonstrates high potential. In short-rotation plantations on fertile soils, its yield can reach up to 45 t/ha of dry biomass within 5 years, surpassing the performance of some poplar hybrids. Additionally, *Robinia pseudoacacia* L. wood possesses high density and calorific value, making it an efficient energy source. Studies have also indicated the feasibility of using *Robinia pseudoacacia* L. sawdust to produce pellets with favorable fuel properties [4].

Robinia pseudoacacia L.'s high adaptability enables it to colonize former agricultural and mining lands, contributing to biomass accumulation and carbon sequestration. However, its invasive nature necessitates a cautious approach to its use, considering the potential impacts on local ecosystems and biodiversity [3; 5].

The aim of the study is to assess the ecological and energy potential of *Robinia pseudoacacia* L. as an introduced tree species, taking into account its ability to reclaim degraded lands, fix atmospheric nitrogen, and productivity in short-rotation plantations, as well as to study possible risks to biodiversity and the functioning of local ecosystems in the context of the spread of this species.

ANALYSIS OF LATEST RESEARCH AND PUBLICATIONS

Robinia pseudoacacia L. has been the subject of numerous studies evaluating its bioecological and energy potential. Due to its nitrogen-fixing capacity, rapid growth, and resistance to adverse conditions, this species is considered promising for the restoration of degraded lands, biomass production, and soil improvement [6]. A study by A. A. Dzyba found that the density and age of *Robinia pseudoacacia* L. plantations affect the vegetation composition and soil chemical properties in floodplain forests in Austria. With increasing density and age of plantations, the content of

nitrogen, nitrate, and carbon in the soil increases, promoting the spread of nitrophilous plant species. However, overall plant diversity does not change significantly, indicating the complex impact of *Robinia pseudoacacia* L. on the ecosystem [2].

S. A. Sytnyk investigated the potential of *Robinia pseudoacacia* L. for biomass production. She found that its rapid growth and strong regrowth ability after cutting make *Robinia pseudoacacia* L. a promising species for energy production [8].

S. A. Sytnyk analyzed the biomass productivity of *Robinia pseudoacacia* L. under two-year cultivation cycles. The results demonstrated that *Robinia pseudoacacia* L. can provide stable biomass yields with high energy potential, confirming its suitability for establishing short-rotation energy plantations [5; 8].

MATERIALS AND RESEARCH METHODS

To investigate the biological productivity as well as the ecological and energy potential of *Robinia pseudoacacia* L. plantations — specifically focusing on the above-ground phytomass of the trees — we conducted field research during 2024–2025. Temporary test plots were established within the territory of the Vinnytsia Forestry Branch to collect the necessary data and carry out the experiments.

According to the Ukrainian standard SOU 02.02-37-476, temporary sample plots (TSPs) used for forest research must meet the following requirements [7]:

1. Location: TSPs should be situated at least 30 meters away from forest boundaries, roads, clearings, logging sites, and other forest infrastructure;

2. Number of trees: Each plot must include no fewer than 200 trees of the main forest-forming species;

3. Area: The area of a TSP must be a multiple of 0.05 hectares, and its length-to-width ratio must not exceed 2:1 [2; 4].

To establish temporary sample plots, we selected forest areas within the territory of the Vinnytsia Forestry where artificially planted stands of *Robinia pseudoacacia* L. are widespread.

Using the "Divisional Taxation Characteristics of Forests" database, taxonomic descriptions, and stand planning materials, we selected sample plots on the lands managed by the forestry enterprise, which operates under the State Enterprise "Forests of Ukraine".

When selecting plots, the following stand characteristics were taken into consideration: forest vegetation type, forest type, stand com-

position, stand age, quality class, and relative stocking (completeness).

The next stage involved an on-site inspection of the selected forest plots. During this process:

- the current silvicultural and taxonomic characteristics of the stands were verified;
- the compliance with the designated forest vegetation conditions was assessed;
- the sanitary condition of the stands was evaluated.

If the *Robinia pseudoacacia* L. stands met the established criteria and were deemed representative, a temporary sample plot was established. The size of each TSP was determined based on the number of *Robinia pseudoacacia* L. trees subject to measurement.

RESULTS AND DISCUSSION

At the Vinnytsia Forestry District, where a sufficient number of *Robinia pseudoacacia* L. plantations are present, 15 temporary sample plots were established (Fig. 1). On these plots, the main silvicultural and mensurational characteristics of the stands and the phytomass of individual fractions of the above-ground tree parts were determined. The total area of the plots amounted to 5.25 hectares.

The silvicultural and taxonomic characteristics of *Robinia pseudoacacia* L. stands from sample plots are presented in Table 1.

According to S. A. Sytnyk when selecting the optimal method and number of model trees for accurately determining the phytomass of plantations, it is necessary to consider: the objectives of the study, the variability of key taxonomic indicators (such as age, quality class, and forest type), and the time and financial costs of fieldwork [5]. In other words, to effectively select model trees, it is necessary to balance the required accuracy of the study with available resources and the variability of forest characteristics. Based on our analysis of *Robinia pseudoacacia* L. plantations within forestry enterprises of the Vinnytsia Forestry Branch, these plantations are predominantly found in clumps. According to forest fund accounting data, clumps occupy more than half (54.3%) of the forested area, while thickets account for 38.1%. Pines are present only insignificantly, constituting 0.9%. To ensure the representativeness of the study, the temporary test plots we established reflected the typical structure of these stands (Table 2) [4].

Analysis of the distribution of temporary sample plots by predominant types of forest vegetation conditions (FVC) and quality classes indicates the predominance of medium-productive plantations, corresponding to quality classes I and III, with 6 and 5 plots respectively. The largest area is occupied by the type of conditions C2 (fresh clumps), which indicates sufficient pro-

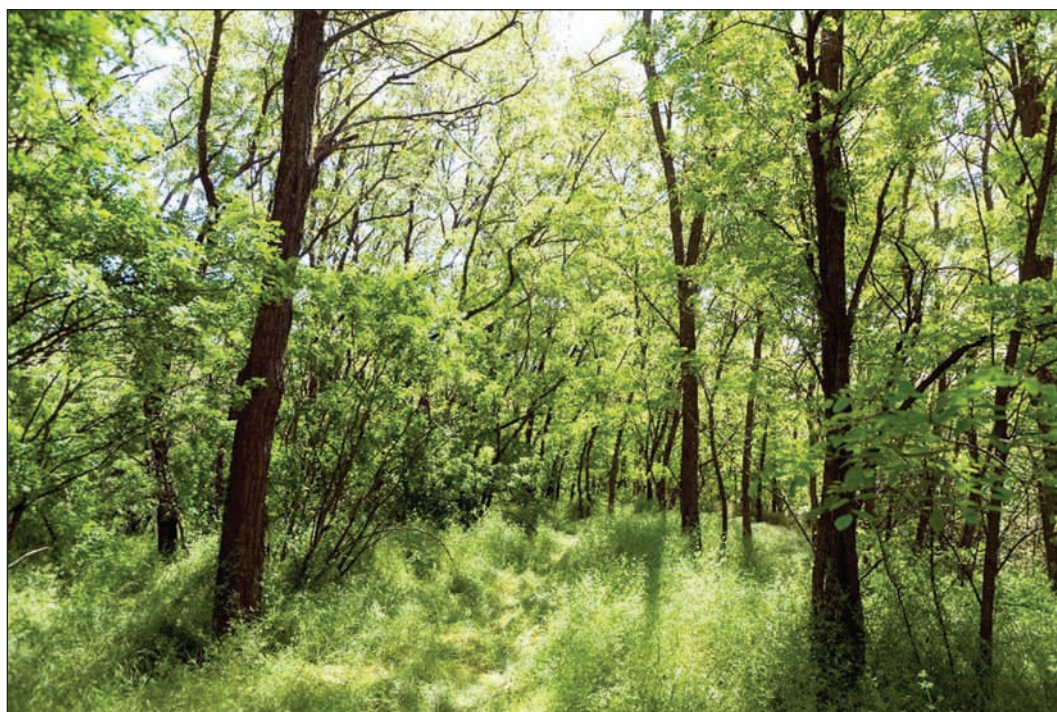


Fig. 1. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) plantations in the Vinnytsia Forestry District

Source: photo by the authors.

Table 1

Silvicultural and taxonomic characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantations (Vinnytsia Forestry District)

Trial plot code	Stand composition	Age, years	Average		Number of trees, pcs/ha	Absolute density, m ² /ha	Relative density	TFI	Quality class
			Diameter, cm	Height, m					
15021.1	10Rps.L.	21	12.6	17.5	288	15.49	0,66	C0	Ia
15022.2	10Rps.L.	63	22.4	23.3	312	38.00	1,09	B2	I
15023.7	7Rps.L3Psul. L.	13	5.8	6.7	431	4.47	0,35	A0	IV
15024.9	10Rps.L.	37	21.4	20.1	202	44.71	1,01	C2	Ia
15025.2	7Rps.L.3Psul. L.	4	3.7	4.2	418	1.24	0,22	B1	III
15026.1	10Rps.L.	54	21.8	21.5	303	25.87	0,83	B1	I
15027.8	7Rps.L.3Qrob.L.	82	27.8	24.5	252	25.84	0,89	C2	III
15028.4	9Rps.L.1Fex.L.	53	21.3	19.5	207	24.57	0,82	C1	II
15029.9	10Rps.L.	51	21.1	20.5	290	27.81	0,81	C0	I
15030.5	9Rps.L.1Psul. L.	31	15.2	18.2	382	4.91	0,22	B2	III
15031.6	10Rps.L.	62	22.6	20.4	229	24.76	0,88	B1	III
15032.9	10Rps.L.	71	24.1	22.1	208	28.54	0,73	B1	III
15033.10	10Rps.L.	43	19.6	13.4	271	39.65	0,82	C0	I
15034.15	10Rps.L.	12	6.3	6.7	229	37.87	0,88	C0	I
15035.17	10Rps.L.	15	6.6	5.3	259	27.87	0,78	C1	I

Source: formed on the basis of the authors' research.

Table 2

Distribution of TSPs by predominant types of forest vegetation conditions and quality classes

Type of forest vegetation conditions	Quality Class					Total
	Ia	I	II	III	IV	
B2	–	1	–	1	1	3
B1	–	2	–	2	1	5
C1	–	1	–	–	–	1
C2	–	2	–	3	1	6
Total	1	6		5	3	15

Source: formed on the basis of the authors' research.

ductivity of *Robinia pseudoacacia* L. plantations. Overall, the structure of the TTPs reflects the predominance of conditions with medium and sufficient productivity potential [9; 10].

The age structure of *Robinia pseudoacacia* L. plantations within the territory of the Vinnytsia Forestry Department is characterized by the predominance of young stands, which cover the largest area. The maximum age of *Robinia pseudoacacia* L. in this region reaches 90 years, although stands of this age occupy the smallest area.

Temporary test plots were established taking into account this age structure. Fig. 2 shows the distribution of *Robinia pseudoacacia* L. stands by age group across the temporary test plots.

According to Fig. 2, under the studied conditions, young and middle-aged stands prevail, each group accounting for approximately 28–29%. This indicates active regeneration and good representation of young stands in the overall forest fund structure. Maturing and mature stands occupy about 21–22%, suggesting a gradual transition of stands into the maturity phase. Overmature stands

have the smallest share — only about 8% — which may indicate timely final felling.

Table 3 presents a detailed distribution of temporary sample plots by age classes and quality [1; 7].

Analysis of the data from Table 3 shows that the experimental stands are distributed quite evenly by age and correspond to the actual age structure.

According to the distribution of temporary test plots, most are located in young and middle-aged stands, which reflects the real age distribution of the stands managed by the Vinnytsia Forestry District.

In addition to the aforementioned characteristics of the studied stands, it is also important to evaluate the research data by relative stand density. The distribution of temporary trial plots by relative stand density and age groups is presented in Table 4 [3].

Temporary test plots were established considering a range of relative completeness, with the most representative values between 0.7 and 0.9. Analysis of data from the Specific Taxation Characteristics of Forests database shows that the

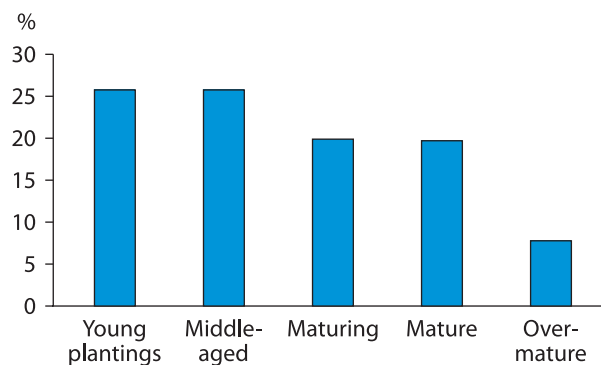


Fig. 2. Distribution of *Robinia pseudoacacia* L. plantations by age group in the Vinnytsia Forestry District

Source: formed on the basis of the authors' research.

relative completeness of *Robinia pseudoacacia* L. stands within the territory of the Vinnytsia Forestry Branch varies widely, ranging from 0.2 to 1.0.

An important aspect of studying both the energy potential and ecological functions of any stand is the analysis of wood density dynamics [4].

Table 3

Distribution of temporary sample plots by age class and creditworthiness

Credit rating	Age class										Total
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	
Ia	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	2
I	—	2	—	—	1	2	1	—	—	—	6
II	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	1
III	1	—	—	1	—	—	1	1	1	—	5
IV	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	1
Total	1	3	1	2	1	1	2	1	1	—	15

Source: formed on the basis of the authors' research.

Table 4

Distribution of TSPs stands by age group and relative completeness

Age group	Relative completeness						Total
	0.2–0.3	0.31–0.4	0.61–0.7	0.71–0.8	0.81–0.9	≥1.0	
Young	1	1	—	1	1	—	4
Middle-aged	1	—	1	—	1	1	4
Maturing	—	—	—	—	3	—	3
Mature	—	—	—	1	1	1	3
Overmature	—	—	—	—	1	—	1
Total	2	1	1	2	7	2	15

Source: formed on the basis of the authors' research.

Table 5

Energy reserve in the phytomass of *Robinia pseudoacacia* L. stands
in the Vinnytsia Forestry District (GJ/ha)

Average diameter, cm	Average height, m									
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
4	800									
6	750	1127								
8	732	1000	1280							
10	721	960	1233	1622						
12		935	1200	1577						
14		896	1167	1454	1780					
16			1112	1432	1721	2019				
18			1002	1411	1650	1987	2461			
20				1321	1612	1912	2333	2829		
22					1546	1892	2200	2698	2900	
24						1768	2102	2578	2868	3274
26							2050	2365	2645	3139
28									2428	3090

Source: formed on the basis of the authors' research.

In this context, the energy value of *Robinia pseudoacacia* L. stands in the Vinnytsia Forestry Branch was estimated by determining the amount of energy stored in their above-ground phytomass. Additionally, literature data were used, indicating that, on average, one ton of carbon in phytomass contains 35.76 GJ of energy [3].

Data on the energy content of the above-ground phytomass of *Robinia pseudoacacia* L.

stands per hectare, depending on their average diameter and height at a relative completeness of 0.9, are presented in Table 5.

According to the research results, the highest reserve values are observed at the largest sizes — 3090 GJ at a diameter of 28 cm and a height of 24 m. The growth of the energy reserve occurs unevenly, with a tendency to accelerate, which indicates a high bioenergy potential of the breed. The data confirm the effectiveness of us-

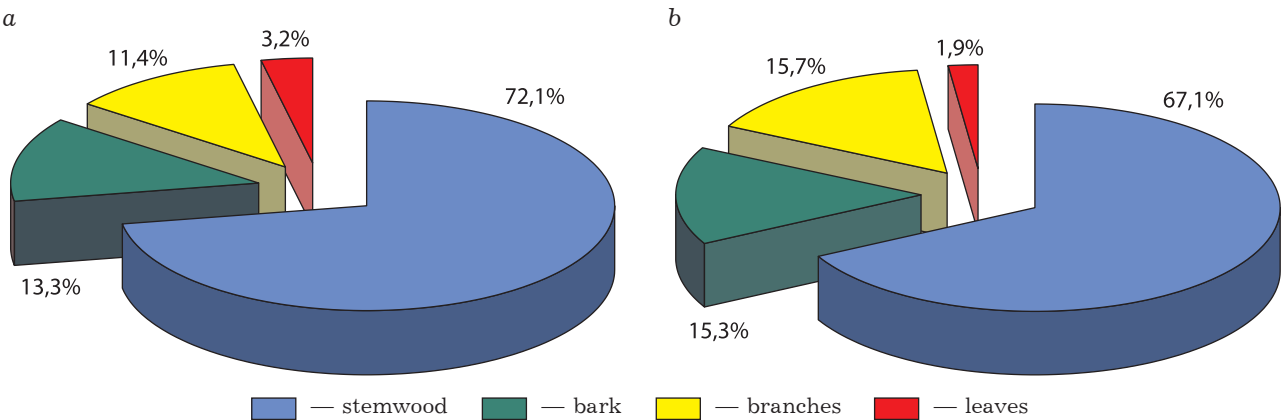


Fig. 3. Average energy potential of the structural components
of above-ground phytomass in *Robinia pseudoacacia* L. stands:

a — diameter (D) — 20 cm, height (H) — 18 m; b — diameter (D) — 10 cm, height (H) — 12 m.

Source: formed on the basis of the authors' research.

ing white acacia as a productive energy crop in the study conditions.

The size and density of *Robinia pseudoacacia* L. stands significantly influence energy accumulation. As tree size increases, energy content rises in the trunks but decreases in the crowns. Denser stands store more energy overall. According to analytical data, *Robinia pseudoacacia* L. forests in the Vinnytsia Forestry territory have the potential to accumulate up to 2 million GJ of energy annually.

We also estimated the distribution of structural fractions within the above-ground phytomass of *Robinia pseudoacacia* L. stands by calculating their relative proportions (Fig. 3).

A comparative analysis presented in Fig. 3 shows that in both cases, the largest share of the above-ground phytomass is accounted for by trunk wood. However, in variant (b), its relative proportion decreases by approximately 5%, while the shares of bark and branches increase. The smallest share in both variants belongs to leaves, with an additional decrease observed in variant (b). These changes likely reflect the influence of specific ecological and biological factors on the stands, as well as differences in their age groups.

CONCLUSIONS

The study confirmed the high productivity of *Robinia pseudoacacia* L. plantations in the

Vinnytsia Forest District, particularly under fresh clump conditions (site type C2). Average tree diameters ranged from 3.7 cm in young stands to 27.8 cm in mature ones, with heights varying from 4.2 to 24.5 m, indicating rapid growth and strong adaptability to local environmental conditions.

Robinia pseudoacacia L. exhibits high energy potential due to its dense and high-calorific wood. For instance, the energy reserve in the phytomass reaches 3090 GJ/ha for trees with a diameter of 28 cm and a height of 24 m, making the species a promising candidate for bioenergy production and renewable energy resource development.

The predominant forest vegetation condition is fresh clumps (C2), where *Robinia pseudoacacia* L. demonstrates optimal growth performance. The age structure of the stands is dominated by young and middle-aged trees, indicating active regeneration and contributing to ecosystem stability.

Robinia pseudoacacia L. plantations, particularly those of medium site quality (classes I and III), serve as an effective tool for bioenergy production, forest reclamation, and the stabilization of degraded lands.

However, their utilization requires careful planning, including consideration of environmental impacts and continuous monitoring of biodiversity effects.

REFERENCES

1. Sytnyk, S. A. (2017). Energy potential of Robinia plantations in the Northern Steppe of Ukraine. *Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, 27(1), 79–82. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2017/27_1/19.pdf
2. Dzyba, A. A. (2011). *Robinia pseudoacacia* in the urban forests of Kyiv. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 21(16), 306–311. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_16/306_Dzy.pdf
3. Matusiak, M. V. & Kozak, Yu. V. (2023). Specific features of introduction and prospects of the genus *Robinia* L. use in landscaping of Vinnytsia. *Agriculture and Forestry*, 3(30), 126–138. doi: 10.37128/2707-5826-2023-3-9
4. Sytnyk, S. A. (2014). Analysis of silvicultural and taxonomic indicators of modal stands of *Robinia pseudoacacia* L. in the Left-Bank Dnipro Steppe. *Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Forestry and Ornamental Gardening*, 198(1), 43–50. Retrieved from https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/2094/1/nvnau_lis_2014_198%281%29__8.pdf
5. Sytnyk, S. A. (2017). Natural density of components of *Robinia pseudoacacia* L. trunks in the Northern Steppe of Ukraine. *Forestry and Agroforestry*, 193–198. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/384/1/2222.pdf>
6. Bondar, A. O. & Matusiak, M. V. (2016). The current state of the forest fund of Podillia forestry enterprises. *Agriculture and Forestry*, 4, 170–179.
7. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine. (2006). Trial areas for forest inventory. Method of establishment. (SOU 02.02-37-476:2006). Kyiv: Ministry of Agrarian Policy of Ukraine.
8. Hrytsan, Yu. I. & Sytnyk, S. A. (2019). Ecological features of the transformative impact of forest vegetation on the steppe environment of Ukraine. In *Geobotanical, grounded and ecological studies of forest biogeocenoses of the Steppe zone: history, present day, prospects: Materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Biological Sciences, Professor A. P. Travleev* (pp. 24–27). Dnipro.
9. Matusiak, M. V. (2019). Using the typological potential of the main forest-forming species in Podillia. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 29(2), 20–22. doi: 10.15421/40290203
10. Didenko, M. M., & Poliakov, O. K. (2018). The state of natural regeneration of the common oak under the forest canopy in the Left-Bank Forest-Steppe. *Forestry and Agroforestry*, 132, 25–34. doi: 10.33220/1026-3365.132.2018.25

БІОЕКОЛОГІЧНИЙ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ДЕРЕВОСТАНІВ *ROBINIA PSEUDOACACIA* L. В УМОВАХ ВІННИЦЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА ДП "ЛІСИ УКРАЇНИ"

С. Ф. Разанов

доктор сільськогосподарських наук, професор
Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця, Україна)
e-mail: razanovsergej65@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-2696>

М. В. Матусяк

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця, Україна)
e-mail: mikhailo1988@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8099-7290>

А. О. Бондар

доктор сільськогосподарських наук, професор,
академік Лісівничої академії наук України (м. Вінниця, Україна)
e-mail: bondar19572204@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0063-7713>

О. І. Врадій

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Вінницький національний аграрний університет (м. Вінниця, Україна)
e-mail: oksanavradii@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7383-3829>

У науковій праці висвітлено результати комплексного дослідження продуктивності та екологічної ролі насаджень робінії псевдоакації на території Вінниччини. Актуальність роботи зумовлена широким використанням цього виду в агролісомеліорації, енергетичному лісівництві та рекультивaciji деградованих земель завдяки його високій екологічній пластичності, здатності до фіксації атмосферного азоту та швидкому приросту біомаси. Аналіз літературних джерел демонструє амбівалентність впливу робінії: з одного боку — покращення родючості ґрунту та підвищення вмісту азоту, з іншого — ризик витіснення аборигенних видів рослин і порушення гідрологічного режиму територій. На базі філії "Вінницьке лісове господарство" було закладено 15 тимчасових пробних площ загальною площею 5,25 га. Відбір ділянок здійснювався з урахуванням типу лісорослинних умов, віку деревостанів, складу насаджень, бонітету та санітарного стану. Методика обліку базувалася на державних стандартах СОУ 02.02-37-476:2006, що забезпечило репрезентативність даних. Результати дослідження свідчать про високу біологічну продуктивність робінієвих насаджень у межах Вінницького надлісництва. Переважаючими типами лісорослинних умов були свіжі сугруди (тип С2), що забезпечували найкращі умови для росту цієї породи. Вікова структура насаджень характеризується домінуванням молодняків і середньовікових деревостанів (понад 56%), що свідчить про активну динаміку відновлення. Пристигаючі, стиглі та перестійні насадження становили меншу частку, що вказує на ефективне лісгосподарське управління. Лісівничо-таксаційна характеристика показала значну варіативність таксаційних показників залежно від віку деревостанів. Середній діаметр дерев коливався від 3,7 см у 4-річних насадженнях до понад 27 см у 82-річних, а висота — від 4,2 до 24,5 м. Абсолютна повнота варіювалася від 1,24 м²/га до 44,71 м²/га, відносна повнота — від 0,22 до 1,09, що свідчить про різні стадії розвитку та густоту насаджень. Завдяки високій щільності та калорійності деревини, насадження демонструють значний потенціал для виробництва біомаси як джерела відновлюваної енергії. Дослідження фітомаси окремих фракцій надземної частини дерев дали змогу об'єктивно оцінити кількість акумульованої біомаси на одиницю площі та розрахувати можливі обсяги енергетичних ресурсів. Структурний аналіз пробних площ за класами бонітету засвідчив переважання середньобонітетних насаджень (І та ІІІ класи), що характеризуються оптимальним співвідношенням приросту та стабільності екосистеми. Це відкриває перспективи для подальшого використання робінії в лісгосподарській практиці регіону як одного з основних інструментів біоенергетичного розвитку та лісомеліорації деградованих територій.

Ключові слова: енергоефективність, лісівничо-таксаційні показники, тип лісорослинних умов, продуктивність, біомаса, фітомаса.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ситник С. А. Енергетичний потенціал робінієвих насаджень Північного Степу України. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2017. Т. 27, № 1. С. 79–82. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2017/27_1/19.pdf (дата звернення: 13.04.2025).
2. Дзиба А. А. Робінія псевдоакація у міських лісах Києва. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21 (16). С. 306–311. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_16/306_Dzy.pdf (дата звернення: 13.04.2025).

3. Matusiak M. V., Kozak Yu. V. Specific features of introduction and prospects of the genus *Robinia* L. use in landscaping of Vinnytsa. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 3 (30). С. 126–138. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-3-9>
4. Ситник С. А. Аналіз лісівничо-таксаційних показників модальних деревостанів *Robinia pseudoacacia* L. Лівобережного Придніпровського Степу. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*. 2014. Вип. 198 (1). С. 43–50. URL: https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/2094/1/nvnu_lis_2014_198%281%29__8.pdf (дата звернення: 13.04.2025).
5. Ситник С. А. Природна щільність компонентів стовбурів *Robinia pseudoacacia* L. в умовах Північного Степу України. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2017. № 1 (30). С. 193–198. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/bitstream/123456789/384/1/2222.pdf> (дата звернення: 13.04.2025).
6. Бондар А. О., Матусяк М. В. Сучасний стан лісового фонду лісгосподарських підприємств Поділля. *Сільське господарство і лісівництво*. 2016. № 4. С. 170–179.
7. СОУ 02.02-37-476:2006. Площі пробні лісовпорядні. Метод закладання. Чинний від 2007-05-01. Київ : Мінагрополітики України, 2006. 32 с.
8. Грицан Ю. І., Ситник С. А. Екологічні особливості перетворюючого впливу лісової рослинності на степове середовище України. *Геоботанічні, ґрунтові та екологічні дослідження лісових біогеоценозів Степової зони: історія, сучасність, перспективи*: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 90-річчю з дня народження чл.-кор. НАН України, д.б.н., професора А. П. Травлєєва (Дніпро, 11 вересня 2019 р.). Дніпро, 2019. С. 24–27.
9. Матусяк М. В. Використання типологічного потенціалу основних лісотвірних порід в умовах Поділля. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 2. С. 20–22. DOI: <https://doi.org/10.15421/40290203>
10. Діденко М. М., Поляков О. К. Стан природного поновлення дуба звичайного під наметом лісу в Лівобережному Лісостепу. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2018. Вип. 132. Харків: УкрНДІЛГА. С. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.132.2018.25>

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

РАЗАНОВ Сергій Федорович — доктор сільськогосподарських наук, професор, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008; e-mail: razanovsergej65@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4883-2696>).

МАТУСЯК Михайло Васильович — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008; e-mail: mikhailo1988@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8099-7290>).

БОНДАР Анатолій Омелянович — доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Лісівничої академії наук України, голова Вінницької обласної організації профспілки працівників лісового господарства (вул. Хмельницьке шосе, б. 2., к. 720, м. Вінниця, Україна, 21036; e-mail: bondar19572204@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-0063-7713>).

ВРАДІЙ Оксана Ігорівна — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Вінницький національний аграрний університет (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008; e-mail: oksanavradii@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7383-3829>).

РАДІОНУКЛІДНЕ ЗАБРУДНЕННЯ РІЧОК ЖИТОМИРСЬКОГО ПОЛІССЯ: АНАЛІЗ БІОАКУМУЛЯЦІЇ В ГІДРОБІОНТАХ

Р. Г. Махінько

аспірант

Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)

e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>**О. Ф. Дунаєвська**

доктор біологічних наук, професор

Поліський національний університет (м. Житомир, Україна)

e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>

Метою дослідження було проведення комплексної радіоекологічної оцінки водних екосистем Житомирського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС з детальним визначенням рівнів радіонуклідного забруднення донних відкладів, води і промислових видів риб, а також аналізом закономірностей біоаккумуляції радіоцезію та радіостронцію в гідробіонтах. Дослідження проведено в січні 2025 року на водних об'єктах басейну річки Тетерів у межах Житомирської області з використанням сучасних радіохімічних та гамма-спектрометричних методів аналізу. Відібрано та проаналізовано зразки донних відкладів із глибини 0,5–1,0 м, берегових осадових поверхневого шару (0–5 см) та води з р. Тетерів у межах м. Житомир, а також зразки м'язової тканини та комплексу “голова + внутрішні органи” чотирьох промислових видів риб (товстолоб білий, короп звичайний, карась сріблястий, щука звичайна) із р. Здвиж Брусилівського району. Визначення питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr та природного ^{40}K проводилося в акредитованій вимірювальній лабораторії Поліського національного університету з похибкою вимірювань, що не перевищувала 15–20% за довірчої ймовірності 0,95. Встановлено значну диференціацію концентрацій радіонуклідів між різними компонентами водної екосистеми. Найвищі концентрації ^{137}Cs спостерігалися в донних відкладах (25,81 Бк/кг) і берегових осадах (20,26 Бк/кг), що у 71,7 рази перевищує показники води (0,36 Бк/кг). Концентрації ^{90}Sr характеризуються протилежною закономірністю з максимальними значеннями в берегових осадах (8,60 Бк/кг) внаслідок вищої мобільності цього радіонукліда. Серед досліджених видів риб найвищий вміст ^{137}Cs зафіксовано в короп'ячих видів: коропа (3,16–5,45 Бк/кг), товстолоба (2,51–4,76 Бк/кг); найнижчий — у щуки (1,53–3,17 Бк/кг) та карася (0,95–2,05 Бк/кг). Концентрації ^{90}Sr у тканинах риб коливалися від 12,90 Бк/кг у щуки до 26,30 Бк/кг у товстолоба, що у 2–4 рази перевищує фонові значення для регіону. Виявлена видова специфічність біоаккумуляції радіонуклідів пов'язана з особливостями способу живлення, екології та фізіології досліджених видів. Концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині риб не перевищують чинних гігієнічних нормативів для продуктів харчування, однак підвищені рівні у внутрішніх органах вимагають їх обов'язкового вилучення під час переробки. Концентрації природного радіонукліда ^{40}K у донних відкладах і тканинах риб відповідають літературним значенням для регіону. Результати підтверджують необхідність продовження систематичного радіоекологічного моніторингу водних біоресурсів регіону та розроблення науково обґрунтованих заходів щодо мінімізації радіоекологічних ризиків для забезпечення безпечного використання водних екосистем Житомирського Полісся.

Ключові слова: радіонукліди, водні екосистеми, Чорнобильська аварія, радіоекологічний моніторинг.

ВСТУП

Аварія на Чорнобильській атомній електростанції в 1986 році призвела до масштабного радіоактивного забруднення території України та сусідніх країн. Особливо постраждав регіон Українського Полісся, включно з Житомирською областю, де сформувалися зони з підвищеним рівнем радіоактивного забруднення [1; 2]. Водні екосистеми виявилися найбільш чутливими до

радіонуклідного забруднення через інтенсивну міграцію радіонуклідів у водному середовищі та їхню біоаккумуляцію в гідробіонтах [3; 4].

У віддалений період після аварії (понад 35 років) актуальним залишається питання довгострокових змін радіоактивного забруднення водних екосистем та оцінки радіоекологічних ризиків для водних біоресурсів. Це особливо важливо для регіону Житомирського Полісся,

де розташовані численні водні об'єкти, що використовуються для рибогосподарських цілей і рекреації [5].

Сучасні дослідження показують, що концентрації основних дозоутворюючих радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у водних екосистемах Північної України залишаються підвищеними порівняно з доаварійним періодом [6; 7].

Подібні тенденції спостерігались і в країнах Азії після Фукусімської аварії, де наголошується на тривалості присутності радіонуклідів у продуктах харчування [8].

Процеси біоаккумуляції цих радіонуклідів у тканинах риб характеризуються видовою специфічністю та залежністю від екологічних особливостей водних об'єктів [4].

Метою дослідження є аналіз довгострокових змін радіоактивного забруднення водойм Житомирського Полісся шляхом оцінки рівнів біоаккумуляції ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{40}K у донних відкладах, воді та тканинах гідробіонтів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема радіоекологічного стану водних екосистем після Чорнобильської аварії досліджується протягом останніх десятиліть багатьма вітчизняними та зарубіжними науковцями.

Р. Bezhenar і співавт. у своєму дослідженні моделювали міграцію ^{137}Cs та ^{90}Sr у водоймі-охолоджувачі ЧАЕС до та після зниження рівня води, показавши складність процесів перерозподілу радіонуклідів у водних екосистемах [9].

А. І. Дворецький і співавт. проводили комплексні радіоекологічні дослідження водних екосистем Придніпров'я, встановивши закономірності накопичення радіонуклідів у різних компонентах водних екосистем [3]. Особливу увагу приділено дослідженню біоаккумуляції радіонуклідів у промислових видах риб Дніпровських водосховищ [10].

О. Є. Каглян та ін. досліджували динаміку питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у представників іхтіофауни зони відчуження ЧАЕС, виявивши значні міжвидові відмінності в накопиченні радіонуклідів. Автори встановили, що концентрації радіонуклідів у тканинах риб залежать від трофічного рівня, віку та екологічних особливостей видів [4].

Н. Sato та співавт. оцінювали зміни концентрацій радіонуклідів і рівнів підземних вод до та після спуску води з водойми-охолоджувача ЧАЕС, підтвердивши важливість гідрологічних чинників у процесах міграції радіонуклідів. Дослідження показало, що зміни гідрологічного режиму суттєво впливають на

перерозподіл радіоактивного забруднення у водних екосистемах [11].

В. В. Скиба проводив радіоекологічний моніторинг накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмах риб деяких водойм Лісостепу України, встановивши регіональні особливості радіонуклідного забруднення [6].

О. М. Волкова та співавт. досліджували техногенні радіонукліди в гідробіонтах водних об'єктів Північної України, підтвердивши необхідність продовження моніторингових досліджень [7].

Р. Г. Махінько у своїх дослідженнях розглядав довгострокові наслідки Чорнобильської катастрофи для водних екосистем і комплексні заходи з відновлення водойм Житомирського Полісся. Автор підкреслив важливість системного підходу до радіоекологічної реабілітації водних об'єктів регіону [5; 12].

О. Ф. Дунаєвська та ін. наголошують на значенні радіоекологічного моніторингу як інструменту екологічної безпеки в умовах сучасних загроз, особливо на важливості вивчення процесів накопичення радіонуклідів у лісових і болотних екосистемах Українського Полісся, охоплюючи роль мохового покриву як бар'єру для міграції ^{137}Cs [13].

Досвід систематичних досліджень, викладений у цій праці, підтверджує необхідність застосування автоматизованих систем радіоекологічного моніторингу для оперативного реагування на зміну радіаційної ситуації, що є актуальним і для водних екосистем регіону.

Аналіз літератури показує, що, незважаючи на численні дослідження, питання довгострокової динаміки радіонуклідного забруднення водних екосистем Житомирського Полісся потребує подальшого вивчення, особливо в контексті сучасного стану біоаккумуляції радіонуклідів у промислових видах риб.

У контексті зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії важливими є результати дослідження В. О. Кашпарова та співавт., які деталізують просторову структуру забруднення [14].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проведено у 2025 році на водних об'єктах басейну річки Тетерів у межах Житомирської області (рис. 1). Відбір зразків здійснювався згідно з чинними методичними рекомендаціями щодо радіоекологічного моніторингу водних об'єктів [15–18]. Радіаційна безпека під час польових досліджень забезпечувалася відповідно до норм НРБУ-97 [19].

Із річки Тетерів у межах м. Житомир відібрано зразки донних відкладів із глиби-



Рис. 1. Місце відбору проб

Джерело: розроблено авторами.

ни 0,5–1,0 м, берегових осадов та води. Відбір зразків донних відкладів проводився за допомогою дночерпака, берегових осадов — методом змішаної проби з поверхневого шару (0–5 см), води — у стерильні ємності об'ємом 1 л.

Зразки промислових видів риб відібрано з річки Здвиж Брусилівського району Житомирської області в січні 2025 року (рис. 1).

У процесі дослідження було вилучено чотири види риб, типових для іхтіофауни річкових екосистем Українського Полісся: товстолоб білий (*Hypophthalmichthys molitrix* Valenciennes, 1844), короп звичайний (*Cyprinus carpio* Linnaeus, 1758), карась сріблястий (*Carassius gibelio* Bloch, 1782) та щука звичайна (*Esox lucius* Linnaeus, 1758).

Для кожного зразка риби проводилося розділення на дві анатомічні фракції: м'язову тканину (істивна частина) та комплекс “голова + внутрішні органи” для окремого радіологічного аналізу. Усього було проаналізовано по три зразки кожного виду риб у кожній фракції, що становило загалом 24 проби (4 види × 2 анатомічні частини × 3 зразки). Для аналізу м'язової тканини відбиралися середні частини філе без луски та шкіри масою 200–300 г кожен зразок.

Підготовка зразків абіотичних компонентів екосистеми до аналізу охоплювала висушування за температури 105°C до постійної маси, подрібнення та гомогенізацію. Зразки риб досліджувалися у нативному стані без попередньої термічної обробки для збереження автентичного розподілу радіонуклідів.

Визначення питомої активності радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{40}K проводилося в акреди-

тованій вимірювальній лабораторії навчально-наукового центру екології та охорони навколишнього середовища Поліського національного університету (свідцтво про відповідність системи вимірювань вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 № 0073 від 15.06.2022).

Активність ^{137}Cs та ^{40}K визначалася гамма-спектрометричним методом із використанням спектрометра МКС-АТ1315 виробництва АТОМТЕХ. Реєстрація гамма-випромінювання здійснювалася сцинтиляційним блоком із кристалом NaI(Tl) розміром 63×63 мм. Процедура вимірювань охоплювала два основні етапи: попереднє вимірювання фоновому спектру протягом 3 годин із його збереженням у пам'яті приладу та аналіз досліджуваних зразків, поміщених у спеціальні ємності типу Марінеллі об'ємом 1 л, які заповнювалися повністю для дотримання стандартної геометрії вимірювання. Обробка спектрів проводилася в режимі реального часу за допомогою програмного забезпечення SPTR.

Визначення ^{90}Sr проводилося радіохімічним методом із виділенням іттрію-90 згідно зі стандартними методиками радіохімічного аналізу. Контроль потужності експозиційної дози гамма-випромінювання здійснювався спектрометром-дозиметром МКГ-АТ1321, обладнаним сцинтиляційним детектором NaI (25×40 мм) і лічильником Гейгера-Мюллера, в безперервному режимі.

Похибка вимірювань не перевищувала 15% для ^{137}Cs і ^{40}K та 20% — для ^{90}Sr за довірчої ймовірності 0,95. Мінімальна детектована активність становила 0,1 Бк/кг для ^{137}Cs і ^{40}K та 0,5 Бк/кг — для ^{90}Sr .

Статистична обробка результатів проводилася з використанням методів дескриптивної статистики. Розраховувалися середні арифметичні значення, стандартні відхилення та коефіцієнти варіації для кожного показника. Усі дослідження виконувались у межах науково-дослідної роботи “Радіоекологічна оцінка водних біоресурсів у віддалений період після аварії на Чорнобильській атомній електростанції”, зареєстрованої в МОН України (№ 0124U000593).

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати визначення питомої активності радіонуклідів у компонентах водної екосистеми річки Тетерів показали значну диференціацію концентрацій між різними середовищами (табл. 1).

Найвищі концентрації ^{137}Cs зафіксовано в донних відкладах (25,81 Бк/кг), що на 27,4% перевищує показники берегових осади і в 71,7 раза більше, ніж у воді (рис. 2).

Це пояснюється здатністю ^{137}Cs до сорбції на глинистих мінералах донних відкладів і

його низькою міграційною здатністю у водному середовищі [9; 11].

Концентрації ^{90}Sr характеризуються протилежною закономірністю: найвищі значення спостерігаються в берегових осадах (8,60 Бк/кг), тоді як у донних відкладах активність цього радіонукліда мінімальна (0,003 Бк/кг). Така відмінність пов'язана з вищою мобільністю ^{90}Sr у водному середовищі та його схильністю до латерального перенесення [4].

Природний радіонуклід ^{40}K показав очікувано високі концентрації в донних відкладах (380,29 Бк/кг) і берегових осадах (286,5 Бк/кг), що відповідає літературним даним щодо його поширення у ґрунтах і донних відкладах регіону [15].

Результати аналізу радіонуклідного забруднення промислових видів риб із річки Здвиж представлено в табл. 2.

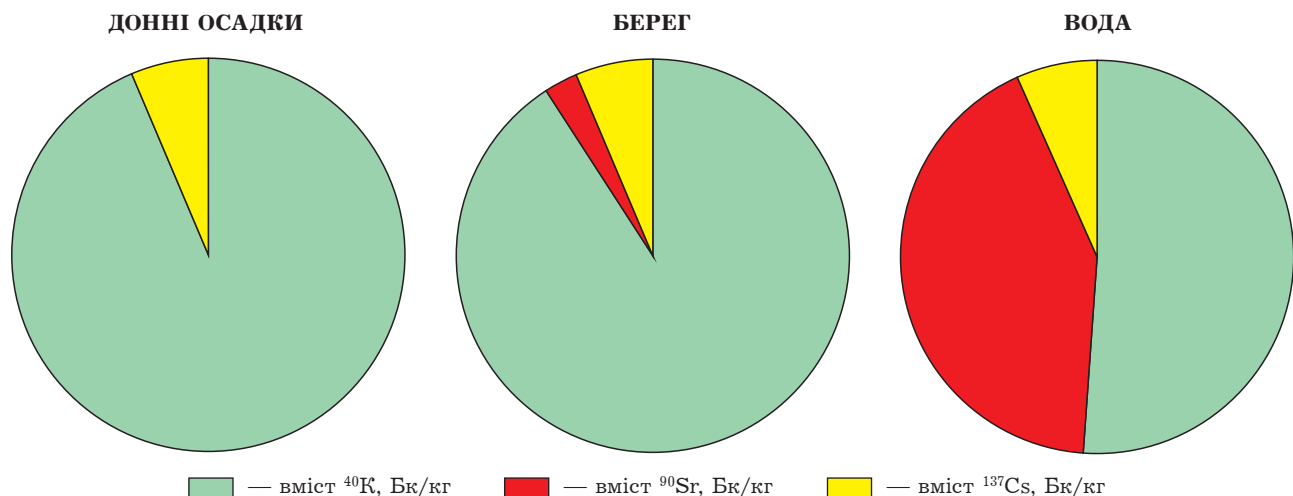
Аналіз розподілу ^{137}Cs у тканинах риб показав найвищі концентрації в короп'ячих видів (короп, товстолоб), що пов'язано з їхнім бентофагним способом живлення та тривалим перебуванням у придонних шарах води [4; 10]. У короп'ячих концентрації ^{137}Cs у комплексі

Таблиця 1

Питомі активності радіонуклідів у компонентах водного середовища

Зразок	^{137}Cs , Бк/кг	^{90}Sr , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
Донні осади	25.81 ± 3.87	0.003 ± 0.001	380.29 ± 57.04
Берегові осади	20.26 ± 3.04	8.600 ± 1.720	286.50 ± 42.98
Вода	0.36 ± 0.05	2.300 ± 0.460	2.77 ± 0.42

Джерело: сформовано авторами за результатами власних вимірювань.

Рис. 2. — вміст ^{40}K , Бк/кг вміст ^{137}Cs , ^{90}Sr і ^{40}K у водному середовищі

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2

Діапазони концентрацій радіонуклідів у тканинах риб

Вид риби	Тканини	^{137}Cs , Бк/кг	^{90}Sr , Бк/кг	^{40}K , Бк/кг
Товстолоб	Голова + нутрощі	4.05–5.47	21.04–31.56	50.80–68.74
Товстолоб	М'язова тканина	2.13–2.89	18.00–27.00	72.93–98.67
Короп	Голова + нутрощі	4.63–6.27	20.08–30.12	45.65–61.76
Короп	М'язова тканина	2.69–3.63	14.00–21.00	53.47–72.33
Карась	Голова + нутрощі	1.74–2.36	19.44–29.16	83.72–113.28
Карась	М'язова тканина	0.81–1.09	15.76–23.64	99.45–134.55
Щука	Голова + нутрощі	1.30–1.76	10.64–15.96	96.05–129.95
Щука	М'язова тканина	2.69–3.65	10.32–15.48	132.60–179.40

Джерело: сформовано авторами за результатами власних вимірювань.

“голова + нутрощі (внутрішні органи)” перевищують показники м'язової тканини в 1,5–2,2 рази, що узгоджується з даними попередніх досліджень про переважну акумуляцію радіоцезію у внутрішніх органах риби [16].

Карась демонстрував найнижчі концентрації ^{137}Cs серед коропа (0,95–2,05 Бк/кг), що може бути пов'язано з його еколого-фізіологічними особливостями та здатністю до детоксикації радіонуклідів.

Щука як хижий вид показала проміжні значення ^{137}Cs (1,53–3,17 Бк/кг), причому концентрації в м'язовій тканині виявились вищими, ніж у комплексі “голова + внутрішні органи”, що нетипово для більшості видів риби і потребує додаткового дослідження.

Концентрації ^{90}Sr у всіх досліджених видів риби значно перевищували фонові значення для регіону [6]. Найвищі показники зафіксовано в товстолоба (22,50–26,30 Бк/кг) та коропа (12,90–13,30 Бк/кг). Це пояснюється особливостями кальцієвого обміну в різних видів риби і селективністю накопичення ^{90}Sr у кістковій тканині [4].

Активність природного ^{40}K коливалася від 53,70 до 156,00 Бк/кг, що відповідає літературним даним для прісноводних риби регіону [6]. Найвищі концентрації ^{40}K зафіксовано в м'язовій тканині щуки (156,00 Бк/кг) та карася (117,00 Бк/кг).

Дослідження ^{40}K підтверджують його стабільну наявність у водному середовищі як природного радіонукліда, з вищими рівнями в м'язовій тканині, що відповідає фізіологічним потребам риби у калії.

Концентрації природного радіонукліда ^{40}K у донних відкладах, воді та тканинах риби не перевищують звичних для Житомирського Полісся фонових значень, що узгоджується з літературними даними.

Результати аналізу донних і берегових відкладів свідчать про стабільні рівні забруднення ^{137}Cs , що відображає довготривалу фіксацію радіонуклідів у ґрунтових шарах. Виявлені концентрації ^{90}Sr у воді є нижчими за санітарні нормативи, однак його вміст у внутрішніх органах риби потребує постійного моніторингу через потенційний ризик для споживачів. Висока біоаккумуляція ^{90}Sr порівняно з ^{137}Cs може бути пов'язана з кальцієподібними властивостями Sr і його накопиченням у кісткових тканинах.

За національним звітом щодо виконання Конвенції про безпеку поводження з радіоактивними відходами, особливу увагу рекомендовано приділяти таким джерелам забруднення у водному середовищі [20].

Порівняння отриманих результатів із гігієнічними нормативами [17; 18] показало, що концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині риби не перевищують допустимих рівнів для продуктів харчування. Однак вміст ^{90}Sr у внутрішніх органах у низці випадків наближається до граничних значень, що потребує вилучення цих частин під час переробки.

ВИСНОВКИ

Радіонуклідне забруднення водних екосистем Житомирського Полісся у віддалений період після Чорнобильської аварії характеризується нерівномірним розподілом ^{137}Cs та ^{90}Sr між різними компонентами екосистем.

Найвищі концентрації ^{137}Cs зафіксовано в донних відкладах р. Тетерів (25,81 Бк/кг), що свідчить про його тривале депонування в донних осадах. Концентрації ^{90}Sr найвищі в берегових осадах (8,60 Бк/кг) унаслідок його вищої мобільності у водному середовищі.

Біоаккумуляція радіонуклідів у промислових видах риби характеризується видовою

специфічністю: короп'ячі демонструють найвищі концентрації ^{137}Cs (до 5,45 Бк/кг) та ^{90}Sr (до 26,30 Бк/кг), тоді як у щуки ці показники нижчі.

Концентрації ^{137}Cs та ^{90}Sr у м'язовій тканині досліджених видів риб не перевищують гігієнічних нормативів, однак підвищені рівні у внутрішніх органах вимагають обов'язкового вилучення внутрішніх органів із технологічного ланцюга під час переробки.

Результати підтверджують необхідність продовження радіоекологічного моніторингу водних біоресурсів регіону та розроблення за-

ходів щодо мінімізації радіоекологічних ризиків для забезпечення безпечного використання водних екосистем Житомирського Полісся. Про це неодноразово наголошувалось у звітах ДАЗВ [21].

Це узгоджується з висновками UNSCEAR щодо довгострокових ризиків впливу іонізуючого випромінювання на екосистеми [22].

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні географії моніторингових досліджень і вивченні сезонної динаміки радіонуклідного забруднення водних біоресурсів регіону.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання: Закон України від 14.01.1988 № 15/98-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1998. № 22, ст. 115. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 01.04.2025).
2. Положення про державну систему моніторингу довкілля: Постанова КМУ від 30.03.1998 № 391-98-п. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.04.2025).
3. Дворецький А. І., Сапронова В. А., Байдак Л. І., Маренков О. М. Радіоекологія водних екосистем Придніпров'я. *Вісник ЖНАЕУ*. 2016. № 1 (55). С. 283–290. URL: https://www.researchgate.net/publication/329912973_Radioekologia_vodojm_Pridniprova_Radioecology_of_the_Pridneprovie_water_ecosystems (дата звернення: 01.04.2025).
4. Каглян О. Є., Гудков Д. І., Кіреєв С. І. та ін. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика*. 2021. Т. 22, № 1. С. 62–73. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.01.062>
5. Махінко Р. Г. Комплексні заходи по відновленню водойм Житомирського Полісся після Чорнобильської катастрофи. *Екологічні науки*. 2024. № 3 (54). С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7>
6. Скиба В. В. Радіоекологічний моніторинг накопичення ^{90}Sr та ^{137}Cs в організмах риб деяких водойм Лісостепу України. *Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва*. 2023. № 2. С. 145–154. DOI: <https://doi.org/10.33245/2310-9289-2023-182-2-145-154>
7. Volkova O. M., Belyaev V. V., Prishlyak S. P. et al. Technogenic radionuclides in hydrobionts of the Northern Ukraine water bodies. *Hydrobiological Journal*. 2024. № 60 (2). P. 86–106. DOI: <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v60.i2.70>
8. Kong S., Yang B., Tuo F., Lu T. Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident. *Radiation Medicine and Protection*. 2022. Vol. 3, iss. 1. P. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.01.006>
9. Bezhenar R., Zheleznyak M., Kanivets V. et al. Modelling of the fate of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Chornobyl nuclear power plant cooling pond before and after the water level drawdown. *Water*. 2023. Vol. 15, iss. 8. 1504. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15081504>
10. Маренков О. М., Дворецький А. І., Білоконь Г. С. Радіонуклідне забруднення промислових видів риб Дніпровського водосховища. *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біол.* 2010. № 2 (43). С. 338–341. URL: <https://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/30773/1/Marenkov.pdf> (дата звернення: 05.04.2025).
11. Sato H., Gusev M., Veremenko D. et al. Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl nuclear power plant vicinity. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 872. 161997. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161997>
12. Makhinko R. Long-term consequences of the Chornobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. Vol. 15, no. 2. P. 58–67. DOI: <https://doi.org/10.69628/esbur/2.2024.58>
13. Дунаєвська О. Ф., Зимарова А. А., Ішук О. В. та ін. Особливості та результати проведення радіоекологічного моніторингу для забезпечення екологічної безпеки в сучасних умовах. *Екологічні науки*. 2024. № 5 (56). С. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.40>
14. Кашпаров В. О., Голяка Д. М., Левчук С. Є., Берковський В. Б. Зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії. *Ядерна фізика та енергетика*. 2022. № 3. DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.182>
15. Державні гігієнічні нормативи “Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді”: затверджено Наказом МОЗ України від 03.05.2006 № 256. *Офіційний вісник України*. 2006. № 29. С. 142, ст. 2114.
16. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи: Закон України від 27.02.1991 № 791а-ХІІ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791%D0%B0-12> (дата звернення: 05.04.2025).
17. Про затвердження Державних гігієнічних нормативів “Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді”: Наказ від 03 травня 2006 р. № 256. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06#Text> (дата звернення: 05.04.2025).

18. Стратегія інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року: схвалено Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. *Урядовий кур'єр*. 2022. № 107.
19. Про введення в дію Державних гігієнічних нормативів “Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)”: Постанова МОЗ України від 01.12.97 № 62. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text> (дата звернення: 04.04.2025).
20. On compliance with the obligations under the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: National report. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine, 2005. 69 p. URL: https://snriu.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/Annual%20Reports/National%20Reports%20JC/JC_2005.pdf (дата звернення: 04.04.2025).
21. Про стан водних екосистем у зоні відчуження Чорнобиля: архівні матеріали. Київ: Державне агентство України з управління зоною відчуження. 2023. URL: <https://dazv.gov.ua/> (дата звернення: 01.04.2025).
22. Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2020/2021 report. Vol. 2. New York: United Nations Publications, 2022. URL: <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010047/read> (дата звернення: 01.04.2025).

RADIONUCLIDE CONTAMINATION OF RIVERS IN ZHYTOMYR POLISSIA: ANALYSIS OF BIOACCUMULATION IN HYDROBIONTS

Makhinko R.

Postraduate student

Polissia National University (Zhytomyr, Ukraine)

e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>

Dunaievskaya O.

Doctor of Biological Sciences, Professor

Polissia National University (Zhytomyr, Ukraine)

e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>

The objective of this study was to conduct a comprehensive radioecological assessment of aquatic ecosystems in Zhytomyr Polissia during the remote period following the Chornobyl Nuclear Power Plant accident, with detailed determination of radionuclide contamination levels in bottom sediments, water, and commercial fish species, as well as analysis of bioaccumulation patterns of radiocesium and radiostrontium in hydrobionts. The research was conducted in January 2025 on water bodies within the Teteriv River basin in Zhytomyr Oblast using modern radiochemical and gamma-spectrometric analytical methods. Samples of bottom sediments from depths of 0.5-1.0 m, surface layer coastal sediments (0-5 cm), and water from the Teteriv River within Zhytomyr city were collected and analyzed, along with samples of muscle tissue and the “head + internal organs” complex from four commercial fish species (silver carp, common carp, Prussian carp, northern pike) from the Zdvizh River in Brusyliv district. Determination of specific activity of radionuclides ^{137}Cs , ^{90}Sr , and natural ^{40}K was performed in the accredited measurement laboratory of Polissia National University with measurement error not exceeding 15-20% at a confidence probability of 0.95. Significant differentiation of radionuclide concentrations between different components of the aquatic ecosystem was established. The highest concentrations of ^{137}Cs are observed in bottom sediments (25.81 Bq/kg) and coastal sediments (20.26 Bq/kg), which is 71.7 times higher than water indicators (0.36 Bq/kg). Concentrations of ^{90}Sr are characterized by the opposite pattern with maximum values in coastal sediments (8.60 Bq/kg) due to the higher mobility of this radionuclide. Among the studied fish species, the highest ^{137}Cs content was recorded in cyprinid species: carp (3.16-5.45 Bq/kg), silver carp (2.51-4.76 Bq/kg), and the lowest in pike (1.53-3.17 Bq/kg) and Prussian carp (0.95-2.05 Bq/kg). Concentrations of ^{90}Sr in fish tissues ranged from 12.90 Bq/kg in pike to 26.30 Bq/kg in silver carp, which is 2-4 times higher than background values for the region. The identified species-specific bioaccumulation of radionuclides is related to the peculiarities of feeding behavior, ecology, and physiology of the studied species. Concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr in fish muscle tissue do not exceed current hygienic standards for food products; however, elevated levels in internal organs require their mandatory removal during processing. Concentrations of the natural radionuclide ^{40}K in bottom sediments and fish tissues correspond to literature values for the region. The results demonstrate the necessity of continuing systematic radioecological monitoring of aquatic bioresources in the region and developing scientifically based measures to minimize radioecological risks to ensure safe utilization of aquatic ecosystems in Zhytomyr Polissia.

Keywords: radionuclides, aquatic ecosystems, Chornobyl accident, radioecological monitoring.

REFERENCES

1. Law of Ukraine No. 15/98-VR “On human protection against the impact of ionizing radiation”. (1998, January 14). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 391-98-p “Regulation on the State Environmental Monitoring

- System". (1998, March 30). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/391-98-%D0%BF#Text>
3. Dvoretzkyi, A. I., Sapronova, V. A., Baidak, L. I., & Marenkov, O. M. (2016). Radioecology of the Pridniprovia water ecosystems. *Visnyk ZhNAU*, 1(55), 283–290. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/329912973_Radioekologia_vodojm_Pridniprov_a_Radioecology_of_the_Pridniprovia_water_ecosystems
 4. Kaglyan, A. Ye., Gudkov, D. I., Kireev, S. I., Klenus, V. G., Belyaev, V. V., Yurchuk, L. P., ... Hupalo, O. O. (2021). Dynamics of specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in representatives of ichthyofauna of Chornobyl exclusion zone. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 22(1), 62–73. doi: 10.15407/jnpae2021.01.062
 5. Makhinko, R. H. (2024). Comprehensive measures for the restoration of water bodies in Zhytomyr Polissia after the Chornobyl disaster. *Ecological Sciences*, 3(54), 57–63. doi: 10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.7
 6. Skyba, V. V. (2023). Radioecological monitoring of ^{90}Sr and ^{137}Cs accumulation in fish organisms of some forest-steppe reservoirs of Ukraine. *Technology of Production and Processing of Livestock Products*, 2, 145–154. doi: 10.33245/2310-9289-2023-182-2-145-154
 7. Volkova, O. M., Belyaev, V. V., Prishlyak, S. P., Gudkov, D. I., Kaglyan, O. Ye., & Skyba, V. V. (2024). Technogenic radionuclides in hydrobionts of the Northern Ukraine water bodies. *Hydrobiological Journal*, 60(2), 86–106. doi: 10.1615/HydrobJ.v60.i2.70
 8. Kong, S., Yang, B., Tuo, F., & Lu, T. (2022). Advance on monitoring of radioactivity in food in China and Japan after Fukushima nuclear accident. *Radiation Medicine and Protection*, 3(1), 37–42. doi: 10.1016/j.radmp.2022.01.006
 9. Bezhenar, R., Zheleznyak, M., Kanivets, V., Protsak, V., Gudkov, D., Kaglyan, A., ... Nasvit, O. (2023). Modelling of the fate of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the Chornobyl nuclear power plant cooling pond before and after the water level drawdown. *Water*, 15(8), 1504. doi: 10.3390/w15081504
 10. Marenkov, O. M., Dvoretzkyi, A. I., & Bilokon, H. S. (2010). Radionuclides contamination of industrial types of fishes of Dnieper reservoir. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(43), 338–341. Retrieved from <http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/30773/1/Marenkov.pdf>
 11. Sato, H., Gusyev, M., Veremenko, D., Laptev, G., Shibasaki, N., Onda, Y., ... Nanba, K. (2023). Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl nuclear power plant vicinity. *Science of The Total Environment*, 872, 161997. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.161997
 12. Makhinko, R. (2024). Long-term consequences of the Chornobyl disaster for aquatic ecosystems: A retrospective analysis and prognosis. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 15(2), 58–67. doi: 10.69628/esbur/2.2024.58
 13. Dunaievska, O. F., Zymarioieva, A. A., Ishchuk, O. V., Sokulskyi, I. M., & Pitsil, A. O. (2024). Environmental problems of agriculture under martial law conditions. *Ecological Sciences*, 1(52), 22–27. doi: 10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.40
 14. Kashparov, V. O., Holiaka, D. M., Levchuk, S. Ye., & Berkovskyi, V. B. (2022). Zoning of radioactive contamination territories after the Chornobyl accident. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 3. doi: 10.15407/jnpae2022.03.182
 15. Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 256 "On the approval of the State hygienic regulations 'Permissible levels of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in food products and drinking water'". (2006, May). *Official Bulletin of Ukraine*, 29, 142, Art. 2114.
 16. Law of Ukraine No. 791a-XII "On the legal regime of the territory exposed to radioactive contamination as a result of the Chornobyl disaster". (1991, February). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/791a-12>
 17. Order of Ministry of Health of Ukraine No. 256 "On the approval of the state hygienic regulations 'Permissible levels of radionuclides Cs-137 and Sr-90 in food and drinking water'" (2006, May). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06#Text>
 18. Strategy of the integrated automated radiation monitoring system for the period until 2024". (2022, April). Uriadovi Kurier, 107.
 19. Resolution of the Ministry of Health of Ukraine No. 62 "On the enforcement of the State Hygienic Standards "Radiation Safety Standards of Ukraine (NRBU-97)". (1997, December). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0062282-97#Text>
 20. State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. (2005). On compliance with the obligations under the joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: National report. Kyiv: State Nuclear Regulatory Committee of Ukraine. Retrieved from https://snrii.gov.ua/storage/app/sites/1/docs/Annual%20Reports/National%20Reports%20JC/JC_2005.pdf
 21. State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management. (2023). Archival materials on the state of aquatic ecosystems in the Chornobyl exclusion zone. Kyiv: State Agency of Ukraine on Exclusion Zone Management. Retrieved from <https://dazv.gov.ua/>
 22. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2022). Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2020/2021 report (Vol. 2). New York, NY: United Nations Publications. Retrieved from <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210010047/read>

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

МАХІНЬКО Роман Григорович — аспірант, Поліський національний університет (Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська область, Україна, 10002; e-mail: vse-svit@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-8401-8226>).

ДУНАЄВСЬКА Оксана Феліксівна — доктор біологічних наук, професор, Поліський національний університет (Старий бульвар, 7, Житомир, Житомирська область, Україна, 10002; e-mail: oksana_fd@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8999-8211>).

ОПТИМІЗАЦІЯ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ РОСЛИН ЯК ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО АГРОВИРОБНИЦТВА

Н. В. Карачинська

кандидат біологічних наук

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: karachinskan051177@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>**А. М. Ліщук**

доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>

У роботі розглядається оптимізація фізіологічного стану рослин як механізм зниження екологічних ризиків в агроценозах. Запропоновано модель, що ґрунтується на поетапній оптимізації метаболічної активності агрофітоценозів і забезпечує зниження екологічних ризиків у них. Показано, що ефективна взаємодія між метаболічною активністю рослин, станом ґрунтової мікробіоти та абіотичними чинниками середовища формує основу для підвищення їхньої толерантності до стресових факторів. Доведено значення поетапної активації сигнальних і метаболічних каскадів у регуляції фізіологічного стану рослин за участі мінерального живлення, біостимуляторів та симбіотичних організмів. Підкреслено, що біосинтез біологічно активних фітосполук (вторинних метаболітів) виконує захисну функцію (антипатогенну, антистресову), а також слугує медіатором трофічних і регуляторних взаємодій у ризосфері. Доведено, що регуляція біосинтезу таких сполук має вирішальне значення для підтримання життєздатності рослин в умовах несприятливого середовища та мінімізації екологічних ризиків, пов'язаних із деградацією ґрунтів, поширенням фітопатогенів і зменшенням агробіорізноманіття. Запропонована модель оптимізації фізіологічного стану рослин, що є удосконаленням концепції "піраміди здоров'я рослин" J. Kempf, обумовлює підвищення енергетичної ефективності їхнього функціонування, сприяє зростанню врожайності та стійкості, а також активно стимулює відновлення ґрунту. Це робить фізіологічно оптимізовані рослини визначальним чинником регенеративного землеробства, дозволяючи впроваджувати екологічно безпечні агротехнології для формування сталих агроєкосистем. Розкрито потенціал використання природних механізмів для створення таких агротехнологій шляхом інтеграції біотехнологічних і агроєкологічних підходів, спрямованих на підвищення адаптивності та стійкості агроєкосистем, забезпечення сталої продуктивності культур і зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Ключові слова: фізіологічно оптимізовані рослини, екологічні ризики, агроценози, фотосинтез, білковий обмін, синтез ліпідів, симбіоз, вторинні метаболіти, імунітет рослин.

ВСТУП

Фотосинтетична активність є фундаментальним екологічним механізмом, що забезпечує енергетичну й метаболічну підтримку рослин, а також інтегрує сигнали зовнішнього середовища для регуляції росту, розвитку та адаптаційних процесів в агроценозах. Актуальність дослідження фотосинтетичної активності та її ролі в регуляції фізіолого-біохімічних процесів суттєво зростає, оскільки агроєкосистеми дедалі частіше потерпають від кліматичних змін, забруднення, деградації ґрунтів та інших дестабілізуючих чинників.

Одна з адаптивних реакцій рослин на стресові умови полягає в посиленому синтезі біоактивних вторинних метаболітів, які модулюють мікробні спільноти ґрунту та коло-

обіг поживних речовин, тим самим сприяючи екологічній стабільності агроєкосистем [1]. Підтримання фотосинтетичної активності в умовах стресу, спричиненого фітопатогенними мікроорганізмами, може сприяти збереженню біомаси та активувати захисні механізми, підкреслюючи її важливу роль у захисних реакціях рослин [2]. За даними J. Kempf, рослини з активним фотосинтетичним апаратом здатні підвищувати в тканинах рівень цукру в 3–4 рази (за шкалою Брікса (Brix)), що підтверджується зростанням вмісту розчинних твердих речовин до 12–15 Brix порівняно з базовими 3–5 Brix [3].

Посилення фотосинтезу збільшує кількість вуглеводневих кореневих ексудатів, які слугують ключовими джерелами вуглецю та

сигнальними молекулами для корисних ризобактерій, тим самим формуючи структуру та функціонування ризосферного мікробіому [4]. Таким чином, фізіологічний стан рослин регулюється завдяки фотосинтетичній активності та біосинтезу біологічно активних фітосполук за участю мікроорганізмів, що формують основу адаптації рослин до стресових чинників.

Мета роботи — теоретично обґрунтувати роль фотосинтезу як регулятора біосинтезу біоактивних фітосполук і його опосередкований вплив через ґрунтовий біоценоз на фізіологічний стан рослин для мінімізації екологічних ризиків та забезпечення сталої продуктивності агроєкосистем в умовах біотичних й абіотичних стрес-факторів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній науковій спільноті зростає зацікавленість до концепцій відновлення родючості ґрунту та покращення фізіологічного стану рослин як ефективного підходу до мінімізації екологічних ризиків в агроєкосистемах [5]. Підвищення фотосинтетичної продуктивності рослин є стратегією, що сприяє покращенню структури ґрунту, збільшенню накопичення вуглецю та зниженню залежності від хімічних засобів захисту, що, своєю чергою, підвищує стійкість до абіотичних і біотичних стрес-факторів [6; 7].

У наукових працях [8; 9] учені наголошують на вагомості колообігу фотосинтетично фіксованого вуглецю до ґрунту через кореневі екsudати, що стимулює розвиток симбіотичних і сапрофітних мікроорганізмів, а також сприяє формуванню стабільної агрегатної структури, підвищенню біологічної активності та відновленню родючості ґрунту. Управління вуглеводним метаболізмом агроценозів, згідно з цими дослідженнями, забезпечує трофічну підтримку ризосферної мікробіоти та активізує процеси самоорганізації ґрунтових біогеохімічних циклів.

Л. Kempf зазначає, що рослини в оптимізованому фізіологічному стані (тобто в добромu здоров'ї та з активним метаболізмом) здатні самостійно протистояти більшості патогенів і шкідників завдяки підвищеному вмісту складних вуглеводів, амінокислот та біоактивних сполук [3]. Особливу увагу зосереджено на моніторингу асиміляційного потенціалу за використання показника цукристості (Brix) як індикатора метаболічної активності. Підвищення цього показника відображає зростання метаболічної активності рослини та її стійкості до зовнішніх стресів. Згідно з теорією поживної привабливості ослаблених рослин (метаболічної

вразливості), яку обґрунтували В. У. Thomas і М. Dykstra, патогени та шкідники уражають рослини переважно тоді, коли їхній метаболізм порушений, що призводить до накопичення в тканинах легкодоступних, неасимільованих цукрів й амінокислот, які слугують живильним середовищем для збудників хвороб [10].

У низці фундаментальних досліджень, опублікованих J. F. White та ін. протягом останнього десятиліття, представлено новий тип взаємодії між рослинами та мікроорганізмами. Встановлено, що механізм ризофагії є важливим для розуміння цих симбіотичних взаємодій і суттєво залежить від фотосинтетичної активності рослин: види з високим асиміляційним потенціалом краще регулюють мікробні взаємодії в ризосфері [11].

У сучасних дослідженнях ґрунтової біології все більше уваги приділяється ролі фотосинтетичних екsudатів як основного джерела енергії для ґрунтової харчової мережі. Як зазначають L. Zhong та ін., ефективне залучення вуглецю кореневого походження є вирішальним для підтримки функціонування ґрунтових екосистем. За їхніми висновками, родючість ґрунту значною мірою залежить від наявності органічної речовини та від активного метаболізму мікро- та мезоорганізмів, що обумовлено фотосинтетичною продуктивністю рослин [12].

Особливу роль у забезпеченні біоактивності ґрунту відіграють представники макрота мезофауни: дощові черв'яки (*Lumbricidae*), нематоди (*Steinernematidae*, *Rhabditidae*), кліщі (*Acari*), колемболи (*Collembola*) та інші детритофаги. Як підкреслюють L. Zhong і співавт., взаємодія систем землеробства з функціональними групами ґрунтових тварин визначає ефективність переносу вуглецю з коренів у ґрунтову харчову мережу, а також впливає на засвоєння мінерального азоту, що зумовлює формування стабільних і продуктивних агроєкосистем [12].

Отже, фотосинтетичні екsudати забезпечують живлення ґрунтової харчової мережі, підтримуючи біологічну активність, яка, своєю чергою, є функцією здорової та фотосинтетично активної рослинності. Численні наукові дослідження підтверджують, що покращення фізіологічного стану рослин є не лише ефективним засобом підвищення врожайності, а й фундаментальним чинником підтримання екологічної рівноваги агроєкосистем. Підвищення фотосинтетичної активності, стимуляція біоактивного метаболізму та формування стабільного мікробіому — це взаємопов'язані процеси, які створюють надійну основу для розвитку сталого землеробства з мінімізацією агрохімічних втручань.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У дослідженні застосовано системний підхід, що передбачає комплексний аналіз взаємозв'язків між фізіологічним станом рослин та їхньою екологічною стабільністю. Методологічну основу становлять загальноприйняті наукові методи: абстрактно-логічний аналіз, методи синтезу, аналогії, порівняння та узагальнення, що використовуються для інтеграції емпіричних даних і теоретичних положень у сфері агроекології.

Інформаційне підґрунтя дослідження сформоване на основі аналізу монографічних джерел, наукових публікацій, даних періодичних фахових видань, а також результатів експериментальних досліджень, присвячених впливу агротехнологічних практик на фотосинтетичну активність, трофічну взаємодію в ризосфері та біоадаптивний потенціал культурних рослин.

Вивчення механізмів зниження екологічних ризиків здійснювалося шляхом виявлення причинно-наслідкових зв'язків між фотосинтетичним потенціалом, біологічною активністю ґрунту та стійкістю культур до біотичних і абіотичних чинників. Такий підхід дозволив сформулювати науково обґрунтовані пропозиції щодо впровадження біологічно обґрунтованих підходів для забезпечення екологічно сталого землеробства.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За узагальненням сучасних наукових підходів до управління фізіологічним станом рослин і формування агроекологічної рівноваги, нами запропоновано модель, що ґрунтується на поетапній оптимізації метаболічної активності агрофітоценозів і забезпечує зниження екологічних ризиків в агроценозах. Запропонована модель охоплює п'ять послідовних етапів

оптимізації процесів розвитку рослин, а саме: 1) фотосинтетичної активності, 2) білкового обміну, 3) синтезу ліпідів, 4) симбіозу у трофічних мережах, 5) секреції вторинних метаболітів (рис. 1).

Модель оптимізації фізіологічного стану рослин є удосконаленою та обґрунтованою модифікацією оригінальної концепції “піраміди здоров'я рослин” J. Kempf, яка пояснює фізіологічні процеси в рослинах, є практичною базою для агрономічного управління та повністю корелює з принципами регенеративного землеробства [3]. Модель зосереджується на внутрішньому здоров'ї рослин, їхній оптимальній фотосинтетичній ефективності та глибокій взаємодії з ґрунтовим біоценозом. Такий механізм дозволяє досягти не лише підвищення врожайності та стійкості до біотичних й абіотичних стресів, але й активно сприяє відновленню та покращенню здоров'я ґрунту, а отже, й агроєкосистеми загалом. Тобто здорові рослини визнаються рушійною силою процесів регенерації ґрунту, підкреслюючи взаємозв'язок між рослиною, ґрунтовим біоценозом як основою для екологічно безпечних агротехнологій, зокрема регенеративного землеробства.

Характеристика етапів оптимізації метаболічної активності рослин наведена в табл. 1.

Переваги запропонованої нами модифікованої моделі полягають у тому, що вона є не просто доповненням, а системним удосконаленням концепції J. Kempf, яка інтегрує сучасні теорії взаємодій між мікроорганізмами та рослинами й біосинтезом захисних сполук. Модель містить розширені можливості ефективнішого управління здоров'ям рослин в агроценозах для досягнення екологічної безпеки та сталої продуктивності агроєкосистем.

Згідно з модифікованою моделлю, оптимізація фізіологічного стану рослин на кожному

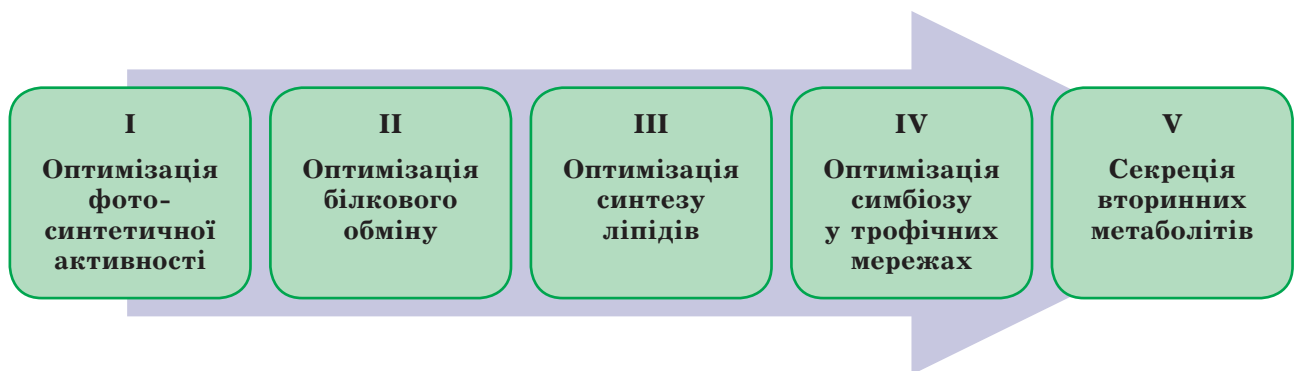


Рис. 1. Модель оптимізації фізіологічного стану рослин
(у модифікації концепції “піраміди здоров'я рослин” J. Kempf)

Джерело: сформовано авторами на основі [3; 10; 11].

Таблиця 1

Характеристика етапів оптимізації метаболічної активності рослин

Етап	Основні процеси, що відбуваються за оптимізації етапу	Екологічні чинники впливу на етап	Екологічне значення
I. Оптимізація фотосинтетичної активності	Фіксація CO ₂ , синтез цукрів і біологічно активних речовин	Доступність світла, CO ₂ , елементів живлення (Mg, Fe, Mn, P, N)	Стартовий рівень енергозабезпечення
II. Оптимізація білкового обміну	Повне перетворення азоту на амінокислоти та білки	Доступність елементів живлення (S, Mo, B)	Зниження привабливості для фітофагів
III. Оптимізація синтезу ліпідів	Синтез восків і жирів, формування гідрофобного бар'єру	Симбіоз із ризосферною мікробіотою	Захист від аерогенних патогенів
IV. Оптимізація симбіозу у трофічних мережах	Мобілізація поживних речовин у біодоступній формі	Різноманіття ґрунтових мікроорганізмів	Зниження екологічного навантаження
V. Секреція вторинних метаболітів	Індукція алкалоїдів, фенолів, терпеноїдів	Стабільність симбіотичних мікробних популяцій	Стійкість до вірусів, бактерій, грибів, нематод, комах

Джерело: сформовано авторами на основі [3; 10–11].

етапі охоплює низку основних процесів. А саме *фотосинтетичну активність* забезпечують такі процеси, як: ефективна фіксація CO₂ за максимального поглинання вуглекислого газу та його перетворення в органічні сполуки; оптимальне використання сонячної енергії шляхом збільшення квантового виходу фотосинтезу, ефективної роботи фотосистем; синтез первинних цукрів (глюкоза, сахароза) за безпосереднього утворення основних енергетичних і будівельних матеріалів рослини та збалансованого обміну речовин для забезпечення достатньої кількості енергії для всіх метаболічних потреб. *Оптимізацію білкового обміну* забезпечують: ефективний синтез амінокислот та функціональних білків, збалансований азотний обмін і підвищення ефективності азотфіксації у разі симбіотичних взаємодій. *Оптимізація синтезу ліпідів* охоплює ефективне утворення жирних кислот і гліцерину як базових компонентів, що забезпечують формування структурних ліпідів для клітинних мембран та їхніх бар'єрних і транспортних функцій, накопичення енергетичних резервів, а також синтез сигнальних ліпідів, які беруть участь у внутрішньо- та міжклітинній сигналізації. *Оптимізація симбіозу у трофічних мережах* досягається через посилення кореневої секреції, що приваблює корисні мікроорганізми, стимулює їхній ріст та активність для ефективного обміну поживними речовинами (зокрема фосфором та азотом) і водою, а також сприяє пригніченню патогенів завдяки конкуренції та виробленню антимік-

робних сполук. *Модуляція секреції вторинних метаболітів* забезпечує цілеспрямований синтез і регульоване виділення захисних та сигнальних сполук, що призводить до підвищення антиоксидантної здатності та посилення імункомпетентності рослин у відповідь на біотичні й абіотичні стреси. Ці етапи відображають комплексний і взаємопов'язаний підхід до управління фізіологією рослин, що є основою для їхньої стійкості та продуктивності в агроценозах.

Оптимізація фотосинтетичної активності як основа метаболічної стійкості агроценозів. Наявність і доступність елементів живлення, що безпосередньо впливають на процес фотосинтезу, є лімітуючими факторами його продуктивності. Важливо створювати умови для збалансованого живлення рослин і забезпечувати доступність ключових макро- та мікроелементів, необхідних для підвищення ефективності фотосинтезу. Як зазначають дослідники [13], на початкових етапах вкрай важливими для фотосинтезу є наявність органічного вуглецю, магнію, заліза, марганцю, азоту і фосфору. Їхня доступність оптимізує метаболізм фотосинтетичних продуктів, змінює склад рослинного соку та корневих ексудатів, що знижує чутливість рослин до зовнішніх чинників.

Більшість досліджень фотосинтезу зосереджені на впливі світла, температури, водного режиму та мінерального живлення [14], проте повноцінна реалізація фотосинтетичного

потенціалу, зокрема синтез якісних вуглеводів і біоактивних фітосполук, неможлива без достатнього забезпечення вуглекислим газом і підтримання стабільного вуглецевого балансу в агроєкосистемі. Так, наприклад, зниження концентрації вуглекислого газу в умовах ущільнених посівів, надмірного зрошення або вирощування культур у закритому ґрунті, здатне істотно зменшувати швидкість фіксації вуглецю та, відповідно, продуктивність фотосинтезу [14]. Вміст органічної речовини безпосередньо впливає на стабільність кореневих ексудатів, які секретуються коренями і визначають якісний склад ризосферних мікроорганізмів [15]. За умов дефіциту органічного вуглецю (менше 1,5%) спостерігається зниження біологічної активності ґрунту, зменшення буферної здатності та посилення ризику деградації фотосинтетичних функцій [16].

Ефективна реалізація фотосинтетичного потенціалу рослин тісно пов'язана з наявністю основних мінеральних елементів живлення, які беруть безпосередню участь у структурі, регуляції та енергетичному забезпеченні фотосинтетичного апарату. Дефіцит кожного з них викликає глибокі порушення функціонування фотосистеми та знижує продуктивність агроєкосистем і стійкість рослин до стресових чинників. Основні процеси фотосинтезу забезпечують магній, азот, залізо, марганець і фосфор [17]. Дефіцит цих елементів впливає на вміст хлорофілу, площу листової поверхні, ферментну активність і загальну фотосинтетичну ефективність та обмежує продуктивність культур у стресових умовах.

Оптимальна інтенсивність фотосинтезу сприяє ефективному синтезу високоякісних вуглеводів із переважанням структурованих форм, що мають низький вміст простих, метаболічно нестабільних цукрів, що зумовлено швидкою трансформацією моносахаридів, зокрема глюкози та фруктози, у складні вуглеводи, такі як сахароза, крохмаль або целюлоза [3; 10]. Оптимальна інтенсивність фотосинтезу є важливим чинником, що підвищує стійкість рослин до ґрунтових фітопатогенних мікроміцетів і знижує сприйнятливість до збудників таких захворювань, як вертицильозне в'янення (*Verticillium* spp.), фузаріозна коренева гниль (*Fusarium* spp.), ризоктоніозна гниль (*Rhizoctonia* spp.), пітіозна гниль (*Pythium* spp.) та фітофтороз (*Phytophthora* spp.) [2; 18]. Натомість недостатня активність фотосинтезу підвищує вразливість рослин, роблячи їх привабливими для фітопатогенних ґрунтових мікроорганізмів.

Отже, фотосинтез є фундаментальним процесом, що забезпечує енергією та інтегровано регулює синтез фітосполук, які формують

резистентність агроєкосистем до біотичних й абіотичних несприятливих чинників. Оптимізація фотосинтетичної активності обумовлює метаболічну стійкість агроценозів, оскільки вона забезпечує ефективне засвоєння вуглекислого газу, синтез якісних вуглеводів, опосередковано впливає на склад кореневих ексудатів, посилює імунітет рослин до патогенів і стресів, а також підтримує життєздатність ґрунтового мікробіому через збалансоване живлення та доступність основних елементів.

Оптимізація білкового обміну як механізму зниження біотичних ризиків у агроценозах. Одним із недостатньо вивчених, але надзвичайно важливих механізмів підвищення стійкості агроценозів до біотичних факторів є повноцінний білковий синтез у рослинному організмі [19]. Цей процес обумовлює ефективне засвоєння різних форм азоту (аміачна, нітратна, амідна, амінокислотна) та їх оперативне включення до високомолекулярних білкових структур. У фізіологічно стабільному стані рослина здатна майже повністю трансформувати доступний азот у протеїни без накопичення проміжних нестабільних сполук, таких як амоній і нітрати, що супроводжується високим вмістом загального азоту в соку рослин за відсутності його розчинних форм, що корелює з інтенсивною фотосинтетичною активністю [3].

З екологічної точки зору, зазначений механізм має виняткове значення, оскільки саме розчинні форми азоту є основним джерелом живлення для багатьох фітофагів, особливо на ранніх стадіях розвитку. Відомо, що шкідники, зокрема попелиця (*Myzus persicae*), білокрилка (*Trialeurodes vaporariorum*), трипс (*Thrips tabaci*), капустяна пильщик (*Plutella xylostella*), павутинний кліщ (*Tetranychus urticae*) та щитівка (*Bemisia tabaci*), надають перевагу ослабленим рослинам із високим вмістом амонійного чи нітратного азоту в тканинах [3; 10]. Дослідження [20] підтверджують, що рослини з високим вмістом доступного азоту можуть бути більш привабливими для самок комах, оскільки вони забезпечують більший ресурс для росту та розвитку нових поколінь. Доведено зростання популяції трав'янистих комах в агроценозах завдяки внесенню високих норм азоту порівняно з контрольною групою [21]. Наприклад, самки бурякової молі (*Spodoptera exigua*) надавали перевагу відкладанню яєць на рослинах бавовни, що отримували високі дози азотних добрив порівняно з контролем.

Як стверджує J. Kempf, пасивний імунітет у рослин, які перебувають у стані повного білкового синтезу, реалізується не шляхом вироблення фітозахисних метаболітів, а через усунення поживної бази для фітофагів [3].

Унаслідок відсутності розчинних форм азоту шкідники уникають таких рослин або мігрують до фізіологічно нестабільних особин, де азот міститься у доступній формі. Це забезпечує ефект так званої “функціональної репелентності”, що є екологічно сталим механізмом зниження біотичного тиску в агроценозах. За високих температур або дефіциту специфічних кофакторів азотного метаболізму (зокрема молібдену, який є коферментом нітратредуктази) у рослинних тканинах накопичується амонійний азот. Це супроводжується підвищенням концентрації вільних амінів, які слугують атрактантами для трипсів (*Thysanoptera*), кліщів (*Acari*) та інших шкідників [3]. Це свідчить, що порушення балансу між органічними та неорганічними формами азоту не тільки знижує синтетичну активність рослин, але й суттєво послаблює їхню загальну імунну реактивність. Проте активний імунітет рослин може бути повністю сформований лише за умови відновлення біологічної активності ґрунту. У цьому процесі головну роль відіграють симбіотичні мікроорганізми, фітогормони та вторинні метаболіти, які спільно регулюють трофічні й сигнальні шляхи, посилюючи імунну відповідь рослини на патогени та абіотичні стреси.

Отже, оптимізація білкового обміну в рослинах обумовлює зниження біотичних ризиків в агроценозах, оскільки ефективний синтез протеїнів забезпечує повноцінне засвоєння азоту без накопичення привабливих для фітофагів розчинних форм, формуючи таким чином “функціональну репелентність” і підвищуючи загальну імунну реактивність рослин.

Оптимізація синтезу ліпідів в адаптації рослин до надлишкової енергії. Завдяки повноцінному фотосинтезу та взаємодії з мікроорганізмами концентрація ліпідів у тканинах рослин підвищується з 1,5–2% до 4–6% сухої речовини [3]. Це свідчить про суттєву перебудову метаболічних процесів, зумовлену підвищеною фотосинтетичною активністю та ефективним засвоєнням елементів живлення. Циклічний процес ризофагії сприяє передачі поживних речовин від симбіотичних мікроорганізмів до коренів рослин-господарів [11]. У цьому процесі мікроорганізми спочатку акумулюють поживні елементи у ґрунті. Потім вони, потрапляючи в кореневі клітини, частково руйнуються під дією активних форм кисню та вивільняють накопичені речовини. Резистентні мікроорганізми ревертують до ризосфери, чим забезпечується циклічність процесу. Саме через ризофагічний механізм трав'янисті рослини можуть отримувати до 30% азоту [22].

Досягнення рівня ліпідної надбудови в рослинах можливе лише за умов тісної симбіо-

тичної взаємодії з ґрунтовими мікроорганізмами. Ці мікроорганізми здатні забезпечувати рослини складними органічними сполуками — амінокислотами, жирними кислотами, вітамінами, полісахаридами та іншими метаболітами, які є безпосередньо доступними для клітинного метаболізму [23]. Так, у випадку, коли рослина засвоює азот у формі нітратів, на процес синтезу амінокислот витрачається до 16% загального енергетичного бюджету. Натомість, якщо амінокислоти надходять напряду від мікробіому, ця енергія може бути збережена та перенаправлена на синтез запасних речовин, зокрема ліпідів [24]. Такий механізм зумовлює зниження енергетичних витрат та формування фізіологічного захисту за рахунок епідермальних восків і жирів, що відіграють бар'єрну функцію проти патогенів.

Накопичення ліпідів у рослин проявляється через специфічні анатомо-морфологічні маркери, зокрема, листки набувають воскового блиску або стають гладкими завдяки утворенню гідрофобної ліпідної плівки [25]. Такий ефект має важливе фізіологічне та екологічне значення, оскільки ліпідний шар функціонує як ефективний бар'єр проти патогенів, особливо тих, що здатні проникати через листову поверхню. Ліпіди слугують не лише цінними енергетичними резервами, а й формують гідрофобний фізико-хімічний бар'єр на поверхні листя, підвищуючи імунітет та стійкість рослин до патогенів і стресів. А ліпідний профіль рослини є важливим індикатором її фотосинтетичної активності та ефективності симбіотичних зв'язків у ризосфері, що має особливе значення в системах екологічного та біологізованого землеробства, оскільки високий рівень ліпідної продукції свідчить про оптимальне функціонування ґрунтового біоценозу без надмірного використання синтетичних добрив чи стимуляторів.

Отже, оптимізація синтезу ліпідів у рослинах обумовлює адаптивну відповідь на енергетичний надлишок, що виникає внаслідок повноцінного фотосинтезу та ефективної симбіотичної взаємодії з ґрунтовим біоценозом, зокрема через механізм ризофагії. Цей процес дозволяє рослинам мінімізувати енергетичні витрати на поглинання поживних речовин, перенаправляючи вивільнені ресурси на утворення та накопичення ліпідів.

Оптимізація симбіозу у трофічних мережах. Мікроорганізми ризосфери сприяють мінералізації органічних решток і вивільненню поживних речовин, забезпечуючи доступний трофічний ресурс для коренів. Коріння рослин модулює ґрунтову мікробіоту шляхом секреції фітохімічних сполук, що призводить

до формування ризосферного мікробіому. Так, J. Chaparro та ін. досліджували зміни мікробного складу за допомогою піросеквенування ^{16}S рРНК. Вони встановили, що ексудати коренів *Arabidopsis* можуть модулювати склад ґрунтових мікроорганізмів без рослин. Окремі фітохімічні сполуки по-різному впливають на групи мікроорганізмів, а фенольні сполуки (н-д, саліцилова кислота), специфічно корелюють з певними мікроорганізмами. Флавоноїди забезпечують розгалуження гіф, а отже, сприяють мікоризній взаємодії [26].

Мікоризний шлях живлення, що реалізується через симбіотичну взаємодію кореневих систем з арбускулярно-мікоризними грибами (зокрема родів *Rhizophagus*, *Funneliformis*, *Claroideoglomus*), сприяє забезпеченню рослин поживними речовинами [27]. Формуючи арбускули та екстраадикальні гіфи, гриби значно розширюють зону поглинання води, фосфору та мікроелементів, особливо в умовах дефіциту. Гіфи значно розширюють зону поглинання води, фосфору, цинку, міді та інших малорухомих і слабкодоступних сполук, що робить мікоризний канал основним шляхом живлення в умовах дефіциту елементів. Через гіфи мікоризи відбувається передача сигналів між рослиною та мікробіомом, що стимулює захисні реакції і посилює імунітет. Корені рослин формують унікальний ризосферний мікробіом, виділяючи специфічні сигнальні та метаболічні сполуки, які селективно впливають на склад ґрунтових мікробних угруповань [28].

Отже, оптимізація симбіозу в трофічних мережах забезпечує функціонування агроєко-систем і високий рівень імунного захисту рослин. Для цього необхідний різноманітний та активний мікробіом як у надземних, так і в підземних (ґрунтових) частинах рослини. Правильно сформований мікробіом здатний ініціювати імунну відповідь рослини, включно із системною набутою резистентністю та індукованою системною резистентністю. Важливо, щоб мікробіом містив саме ті мікроорганізми, які ефективно пригнічують розвиток захворювань, забезпечують активацію імунних механізмів і посилений синтез вторинних метаболітів.

Секреція вторинних метаболітів. Імунна система рослин є багаторівневою та здатною до активної адаптації в умовах дії біотичних чинників, завдяки чому формується підвищена стійкість до їх повторного інфікування. Важливою складовою такого захисту є системна набута резистентність, за якої після первинного патогенного ураження формується стан довготривалої неспецифічної стійкості. Системна набута резистентність активується через сигнальні шляхи саліцилової кислоти й супроводжується

накопиченням PR-білків (*pathogenesis-related proteins*), які пригнічують розвиток широкого спектра патогенів [29].

Індукована системна резистентність є механізмом, що доповнює системну набуту резистентність. Вона виникає, коли рослина взаємодіє з корисними мікроорганізмами в ризосфері, такими як представники родів *Pseudomonas*, *Bacillus* та *Trichoderma*. На відміну від набутої, індукована системна резистентність активується за участю жасмонової кислоти та етилену і не характеризується значним виробленням PR-білків. Натомість цей механізм "готує" рослину до швидшої та ефективнішої імунної відповіді на майбутні загрози, фактично запускаючи її захисні реакції [29].

Незважаючи на відмінності в сигнальних шляхах, системна набута резистентність та індукована системна резистентність функціонують синергічно, зміцнюючи фізіологічні та бар'єрні функції тканин і знижуючи енергетичні витрати на імунну відповідь. Важливу роль у реалізації обох механізмів відіграє ризосферний мікробіом, який є не лише трофічним партнером, але й сигнальним посередником, що активує захисні механізми через хімічну комунікацію з рослиною.

Вторинні метаболіти, що синтезуються завдяки активації системної набутої резистентності та індукованої системної резистентності, значно розширюють спектр неспецифічної стійкості рослин до біотичних і абіотичних стресів. До них належать флаванолі, фітоалексини, біфлавоноїди, алкалоїди, терпеноїди та інші сполуки, які проявляють антибактеріальну, фунгіцидну, антиоксидантну й інсектицидну дію [30].

Важливо підкреслити, що синтез вторинних метаболітів тісно інтегрований в загальну імунну мережу рослини та залежить від ефективності системної набутої резистентності й індукованої системної резистентності, активності сигнальних молекул (саліцилової та жасмонової кислот, етилену), а також складу та біоактивності ризосферного мікробіому. Таким чином, активація генів вторинного метаболізму є результатом скоординованої взаємодії між внутрішньорослинною сигналізацією та екзогенними біологічними стимулами.

З огляду на енерговитратність цього процесу, ефективність хімічного захисту через вторинні метаболіти залежить від фізіологічного стану рослини, зокрема рівня забезпечення макро- та мікроелементами, фотосинтетичної активності та інтенсивності трофічних взаємодій у кореневій зоні. Стимуляція системної набутої резистентності та індукованої системної резистентності в таких умовах виконує не лише

імунну, а й регуляторну енергетичну функцію, спрямовану на раціональне використання ресурсів.

Накопичення захисних метаболітів підвищує стійкість рослин до фітофагів, зокрема японських жуків (*Popillia japonica*), кукурудзяних вогнівок (*Helicoverpa zea*), гарбузових клопів (*Anasa tristis*), колорадських жуків (*Leptinotarsa decemlineata*) і бурих мармурових клопів-щитників (*Halyomorpha halys*). Крім того, ці метаболіти забезпечують опірність до нематод, охоплюючи ті, що спричиняють кореневу гниль (*Nematodis radicis putredinis*) [12].

Таким чином, у синтезі й секреції вторинних метаболітів кульмують системна набута резистентність та індукована системна резистентність. Вони виступають основоположними тригерами багаторівневої захисної системи, де секреція вторинних метаболітів (флаванолів, фітоалексинів та алкалоїдів) є завершальною фазою, що забезпечує тривалий і комплексний імунний ефект, забезпечуючи їхній ефективний захист від патогенів, фітофагів та абіотичних стресів. Такий інтегрований підхід забезпечує підвищення енергетичної ефективності функціонування рослинного організму та сприяє формуванню сталих екологічно безпечних агро-екосистем із мінімальною залежністю від агрохімічного втручання.

ВИСНОВКИ

Оптимізація фізіологічного стану рослин, що здійснюється за запропонованою моделлю поетапної метаболічної активності агрофітоценозів, безпосередньо призводить до зниження

екологічних ризиків. Такий ефект досягається завдяки ефективній взаємодії між метаболічною активністю рослин, станом ґрунтової мікробіоти та абіотичними чинниками середовища, що обумовлює підвищену толерантність культур до стресових факторів. Поетапна активація сигнальних і метаболічних каскадів, за участі мінерального живлення, біостимуляторів і симбіотичних організмів, регулює фізіологічний стан рослин, тоді як біосинтез вторинних метаболітів виконує захисну функцію та слугує медіатором трофічних і регуляторних взаємодій у ризосфері. Така регуляція біосинтезу обумовлює підтримання життєздатності рослин у несприятливих умовах, а також сприяє мінімізації екологічних ризиків, пов'язаних із деградацією ґрунтів, поширенням фітопатогенів і зменшенням агробіорізноманіття.

Запропонований інтегрований підхід до оптимізації фізіологічного стану рослин обумовлює підвищення енергетичної ефективності їхнього функціонування, сприяє зростанню врожайності та стійкості, а також активно стимулює відновлення ґрунту. Це робить фізіологічно оптимізовані рослини визначальним чинником регенеративного землеробства, дозволяючи впроваджувати екологічно безпечні агротехнології для формування сталих агро-екосистем. Використання природних механізмів, інтегрованих у біотехнологічні й агро-екологічні підходи, спрямоване на підвищення адаптивності та стійкості агро-екосистем, забезпечення сталої продуктивності культур і зниження антропогенного навантаження на довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Clemensen A. K., Provenza F. D., Hendrickson J. R., Grusak M. A. Ecological implications of plant secondary metabolites — phytochemical diversity can enhance agricultural sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2020. Vol. 4. 547826. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.547826>
2. Yang H., Luo P. Changes in photosynthesis could provide important insight into the interaction between wheat and fungal pathogens. *International journal of molecular sciences*. 2021. Vol. 22, iss. 16. 8865. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms22168865>
3. Kempf J. Quality agriculture: Conversations about regenerative agronomy with innovative scientists and growers. *Regenerative Agriculture Publishing*. 2020. 298 p. URL: https://books.google.com.ua/books/about/Quality_Agriculture.html?id=DZ_qDwAAQBAJ (accessed: 12.05.2025).
4. Liu Y., Xu Z., Chen L. et al. Root colonization by beneficial rhizobacteria. *FEMS Microbiology reviews*. 2024. Vol. 48, iss. 1. fuad066. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad066>
5. Cárcelos Rodríguez B., Durán-Zuazo V. H., Soriano Rodríguez M. et al. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review. *Soil systems*. 2022. Vol. 6, iss. 4. 87. DOI: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6040087>
6. Husson O., Sarthou J. P., Bousset L. et al. Soil and plant health in relation to dynamic sustainment of Eh and pH homeostasis: a review. *Plant and soil*. 2021. Vol. 466, no. 1. P. 391–447. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05047-z>
7. Zhang Y., Zhou T., Zeng J. et al. Impact of annual plant prevalence on soil carbon storage through root turnover and productivity. *Plant soil*. 2025. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07439-x>
8. Seitz V. A., McGivern B. B., Daly R. A. et al. Variation in root exudate composition influences soil microbiome membership and function. *Applied and environmental microbiology*. 2022. Vol. 88, no. 11. e00226-22. DOI: <https://doi.org/10.1128/aem.00226-22>
9. Low K. E., Tingley J. P., Klassen L. et al. Carbohydrate flow through agricultural ecosystems: Implications for synthesis and microbial conversion of carbohydrates. *Biotechnology Advances*. 2023. Vol. 69. 108245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108245>
10. Thomas B. Y., Dykstra M. Picky-eater insects pass on high brix plants. Acres U.S.A., 2019.

11. White J. F., Kingsley K. L., Verma S. K., Kowalski K. P. Rhizophagy cycle: an oxidative process in plants for nutrient extraction from symbiotic microbes. *Microorganisms*. 2018. Vol. 6, iss. 3. 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms6030095>
12. Zhong L., Li Z., Shi L. et al. Cropping systems and ecological groups of soil animals jointly affect the transfer of root-derived carbon and mineral nitrogen into the soil food web. *Soil biology and biochemistry*. 2025. Vol. 200. 109646. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109646>
13. Cakmak I., Engels C. Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. In *Mineral nutrition of crops*. 2024. P. 141–168. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003578468-6>
14. Shi Y., Wang, Z., Zhao X. et al. Harnessing the power of photosynthesis: from current engineering strategies to cell factory applications. *Small Methods*. 2025. 2402147. DOI: <https://doi.org/10.1002/smt.202402147>
15. Molefe R. R., Amoo A. E., Babalola O. O. Communication between plant roots and the soil microbiome; involvement in plant growth and development. *Symbiosis*. 2023. Vol. 90. P. 231–239. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13199-023-00941-9>
16. Bhattacharyya S. S., Ros G. H., Furtak K. et al. Soil carbon sequestration — An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of the total environment*. 2022. Vol. 815. 152928. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152928>
17. Kumari V. V., Banerjee P., Verma V. C. et al. Plant nutrition: an effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. *International journal of molecular sciences*. 2022. Vol. 23, iss. 15. 8519. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23158519>
18. Yang S., Li X., Chen W. et al. Wheat resistance to fusarium head blight is associated with changes in photosynthetic parameters. *Plant Disease*. 2016. Vol. 100. P. 847–852. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-14-0398-RE>
19. Ullah S., Ali I. Understanding the molecular mechanisms of nitrogen assimilation in C3 plants under abiotic stress: a mini review. *Phyton*. 2025. Vol. 94, no. 4. P. 1029. DOI: <https://doi.org/10.32604/phyton.2025.064608>
20. Braswell L. R., Reisig D. D., Sorenson C. E. Helicoverpa zea (*Lepidoptera: Noctuidae*) oviposition and larval vertical distribution in Bt cotton under different levels of nitrogen and irrigation. *Journal of Economic Entomology*. 2019. Vol. 112. P. 1237–1250. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toz023>
21. Lange E. S. D., Kyryczenko-Roth V., Johnson-Cicalese J. et al. Increased nutrient availability decreases insect resistance in cranberry. *Agricultural and Forest Entomology*. 2019. Vol. 21. P. 326–335. DOI: <https://doi.org/10.1111/afe.12335>
22. Das P. P., Singh K. R., Nagpure G. et al. Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental research*. 2022. Vol. 214. 113821. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113821>
23. Jacoby R., Peukert M., Succurro A. et al. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition — current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8. 1617. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
24. Kraiser T., Gras D. E., Gutiérrez A. G. et al. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of experimental botany*. 2011. Vol. 62, iss. 4. P. 1455–1466. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq425>
25. Tian R., Liu W., Wang Y., Wang W. Cuticular wax in wheat: biosynthesis, genetics, and the stress response. *Frontiers in Plant Science*. 2024. 3. Vol. 15. 1498505. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1498505>
26. Chaparro J. M., Badri D. V., Bakker M. G. et al. Root exudation of phytochemicals in arabidopsis follows specific patterns that are developmentally programmed and correlate with soil microbial functions. *Plos one*. 2013. Vol. 8, iss. 2. e55731. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055731>
27. Chen M., Arato M., Borghi L. et al. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi — from ecology to application. *Frontiers in plant science*. 2018. Vol. 9. Article 1270. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01270>
28. Trivedi P., Leach J. E., Tringe S. G. et al. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*. 2020. Vol. 18, no.11. P. 607–621. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>
29. Sharma S., Kumar P., Singh A. Systemic acquired resistance vs induced systemic resistance: a review. *Agricultural reviews*. 2024. Vol. 45, iss. 3. P. 410–419. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag.R-2411>
30. Kumar S., Korra T., Thakur R. et al. Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress. *Plant stress*. 2023. Vol. 8. 100154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100154>

OPTIMIZATION OF PLANT PHYSIOLOGICAL STATUS AS A BASIS FOR ENVIRONMENTALLY SAFE AGRICULTURAL PRODUCTION

Karachynska N.

Candidate of Biological Sciences

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: karachinskana051177@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>

Lishchuk A.

Doctor of Agricultural Sciences, Senior Researcher

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>

This study examines the optimization of plant physiological status as a mechanism for reducing environmental risks in agroecosystems. A model is proposed based on the stepwise optimization of the metabolic activity of agro-phytocenoses, which ensures a reduction in environmental risks. It is shown that effective interaction

between plant metabolic activity, the state of soil microbiota, and abiotic environmental factors forms the basis for enhancing plant tolerance to stress conditions. The importance of phased activation of signaling and metabolic cascades in regulating plant physiological status is demonstrated, involving mineral nutrition, biostimulants, and symbiotic organisms. It is emphasized that the biosynthesis of biologically active phytochemicals (secondary metabolites) not only performs protective functions (anti-pathogenic, anti-stress) but also acts as a mediator of trophic and regulatory interactions in the rhizosphere. It is proven that the regulation of the biosynthesis of such compounds plays a decisive role in maintaining plant viability under unfavorable conditions and minimizing ecological risks associated with soil degradation, the spread of phytopathogens, and the decline of agrobiodiversity. The proposed integrated approach to managing plant physiological status, which advances J. Kempf's "plant health pyramid" concept, enhances the energetic efficiency of plant functioning, increases yield and resilience, and actively contributes to soil regeneration. This makes healthy plants a key factor in regenerative agriculture, enabling the implementation of environmentally safe agrotechnologies for building sustainable agroecosystems. Abiotic stresses (temperature, water regime, CO₂ concentration, light, etc.) increase plant susceptibility to pathogens and pests. The study highlights the potential of leveraging natural mechanisms for developing such agrotechnologies through the integration of biotechnological and agroecological solutions aimed at enhancing the adaptability and stability of agroecosystems, ensuring sustainable crop productivity, and reducing anthropogenic pressure on the environment.

Keywords: environmental risks, agroecosystems, photosynthesis, protein metabolism, lipid synthesis, symbiosis, secondary metabolites, plant immunity.

REFERENCES

- Clemensen, A. K., Provenza, F. D., Hendrickson, J. R., & Grusak M. A. (2020). Ecological implications of plant secondary metabolites: Phytochemical diversity can enhance agricultural sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 547826. doi: 10.3389/fsufs.2020.547826
- Yang, H., & Luo, P. (2021). Changes in photosynthesis could provide important insight into the interaction between wheat and fungal pathogens. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(16), 8865. doi: 10.3390/ijms22168865
- Kempf, J. (2020). Quality agriculture: Conversations about regenerative agronomy with innovative scientists and growers. *Regenerative Agriculture Publishing*. Retrieved from https://books.google.com.ua/books/about/Quality_Agriculture.html?id=DZ_qDwAAQBAJ
- Liu, Y., Xu, Z., Chen, L., Xun, W., Shu, X., Chen, Y., & Zhang, R. (2024). Root colonization by beneficial rhizobacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 48(1), fuad066. doi: 10.1093/femsre/fuad066
- Cárceles Rodríguez, B., Durán-Zuazo, V. H., Soriano Rodríguez, M., García-Tejero, I. F., Gálvez Ruiz, B., & Cuadros Távira, S. (2022). Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: A review. *Soil Systems*, 6(4), 87. doi: 10.3390/soilsystems6040087
- Husson O., Sarthou J. P., Bousset L., Ratnadass A., Schmidt H. P., Kempf J., & Lamichhane J. R. (2021). Soil and plant health in relation to dynamic sustaiment of Eh and pH homeostasis: A review. *Plant and Soil*, 466(1), 391–447. doi: 10.1007/s11104-021-05047-z
- Zhang, Y., Zhou, T., Zeng, J., Tan, E., Zhang, J., Wu, X., & Liu, B. (2025). Impact of annual plant prevalence on soil carbon storage through root turnover and productivity. *Plant Soil*, 1–17. doi: 10.1007/s11104-025-07439-x
- Seitz, V. A., McGivern, B. B., Daly, R. A., Chaparro, J. M., Borton, M. A., Sheflin, A. M., & Prenni, J. E. (2022). Variation in root exudate composition influences soil microbiome membership and function. *Applied and Environmental Microbiology*, 88(11), e00226-22. doi: 10.1128/aem.00226-22
- Low, K. E., Tingley, J. P., Klassen, L., King, M. L., Xing, X., Watt, C.,... & Abbott, D. W. (2023). Carbohydrate flow through agricultural ecosystems: Implications for synthesis and microbial conversion of carbohydrates. *Biotechnology Advances*, 69, 108245. doi: 10.1016/j.biotechadv.2023.108245
- Thomas, B. Y., & Dykstra, M. (2019). Picky-eater insects pass on high brix plants. *Acres U.S.A.*
- White, J. F., Kingsley, K. L., Verma, S. K., & Kowalski, K. P. (2018) Rhizophagy cycle: an oxidative process in plants for nutrient extraction from symbiotic microbes. *Microorganisms*, 6(3), 95. doi: 10.3390/microorganisms6030095
- Zhong, L., Li, Z., Shi, L., Larsen, T., Scheu, S., & Pollierer, M. M. (2025). Cropping systems and ecological groups of soil animals jointly affect the transfer of root-derived carbon and mineral nitrogen into the soil food web. *Soil Biology and Biochemistry*, 200, 109646. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109646
- Cakmak, I., & Engels, C. (2024). Role of mineral nutrients in photosynthesis and yield formation. In *Mineral nutrition of crops*, 141–168. doi: 10.1201/9781003578468-6
- Shi, Y., Wang, Z., Zhao, X., Li, Z., Zheng, J., & Liu, J. (2025). Harnessing the power of photosynthesis: from current engineering strategies to cell factory applications. *Small Methods*, 2402147. doi: 10.1002/smt.202402147
- Molefe, R. R., Amoo, A. E., & Babalola, O. O. (2023). Communication between plant roots and the soil microbiome; involvement in plant growth and development. *Symbiosis*, 90, 231–239. doi: 10.1007/s13199-023-00941-9
- Bhattacharyya, S. S., Ros, G. H., Furtak, K., Iqbal, H. M., & Parra-Saldívar, R. (2022). Soil carbon sequestration—An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. *Science of the Total Environment*, 815, 152928. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.152928
- Kumari, V. V., Banerjee, P., Verma, V. C., Sukumaran, S., Chandran, M. A. S., Gopinath, K. A., ... Awasthi, N. K. (2022). Plant nutrition: an effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15), 8519. doi: 10.3390/ijms23158519

18. Yang, S., Li X., Chen, W., Liu, T., Zhong, S., Ma, L., ... Luo, P. (2016). Wheat resistance to fusarium head blight is associated with changes in photosynthetic parameters. *Plant Disease*, 100, 847–852. doi: 10.1094/PDIS-04-14-0398-RE
19. Ullah, S., & Ali, I. (2025). Understanding the molecular mechanisms of nitrogen assimilation in C3 plants under abiotic stress: A mini review. *Phyton*, 94(4), 1029. doi: 10.32604/phyton.2025.064608
20. Braswell, L. R., Reisig, D. D., & Sorenson, C. E. (2019). Helicoverpa zea (*Lepidoptera: Noctuidae*) oviposition and larval vertical distribution in Bt cotton under different levels of nitrogen and irrigation. *Journal of Economic Entomology*, 112, 1237–1250. doi: 10.1093/jee/toz023
21. Lange, E. S. D., Kyrzychenko-Roth, V., Johnson-Cicalese, J., Davenport, J., Vorsa, N., & Rodriguez-Saona, C. (2019). Increased nutrient availability decreases insect resistance in cranberry. *Agricultural and Forest Entomology*, 21, 326–335. doi: 10.1111/afe.12335
22. Das, P. P., Singh, K. R., Nagpure, G., Mansoori, A., Singh, R. P., Ghazi, I. A., & Singh, J. (2022). Plant-soil-microbes: A tripartite interaction for nutrient acquisition and better plant growth for sustainable agricultural practices. *Environmental Research*, 214, 113821. doi: 10.1016/j.envres.2022.113821
23. Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition-current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1617. doi: 10.3389/fpls.2017.01617
24. Kraiser, T., Gras, D. E., Gutiérrez, A. G., González, B., & Gutiérrez, R. A. (2011). A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of experimental botany*, 62(4), 1455–1466. doi: 10.1093/jxb/erq425
25. Tian, R., Liu, W., Wang, Y., & Wang, W. (2024). Cuticular wax in wheat: biosynthesis, genetics, and the stress response. *Frontiers in Plant Science*, 3, 15, 1498505. doi: 10.3389/fpls.2024.1498505
26. Chaparro, J. M., Badri, D. V., Bakker, M. G., Sugiyama, A., Manter, D. K., & Vivanco, J. M. (2013). Root Exudation of Phytochemicals in Arabidopsis Follows Specific Patterns That Are Developmentally Programmed and Correlate with Soil Microbial Functions. *Plos one*, 8(2), e55731. doi: 10.1371/journal.pone.0055731
27. Chen, M., Arato, M., Borghi, L., Nouri, E., & Reinhardt, D. (2018). Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi — from ecology to application. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1270. doi: 10.3389/fpls.2018.01270
28. Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020). Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607–621. doi:10.1038/s41579-020-0412-1
29. Sharma, S., Kumar, P., & Singh, A. (2024). Systemic acquired resistance vs induced systemic resistance: A review. *Agricultural Reviews*, 45(3), 410–419. doi: 10.18805/ag.R-2411
30. Kumar, S., Korra, T., Thakur, R., Arutselvan, R., Kashyap, A. S., Nehela, Y., & Keswani, C. (2023). Role of plant secondary metabolites in defence and transcriptional regulation in response to biotic stress. *Plant stress*, 8, 100154. doi: 10.1016/j.stress.2023.100154

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

КАРАЧИНСЬКА Надія Василівна — кандидат біологічних наук, науковий співробітник лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: karachinskana051177@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6571-8430>).

ЛІЩУК Алла Миколаївна — доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник лабораторії біоконтролю агроєкосистем і органічного виробництва відділу агробіоресурсів та екологічно безпечних технологій, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8339-9365>).

РОЛЬ МУЛОВИХ МАС СТИЧНИХ ВОД У РОЗШИРЕННІ АСОРТИМЕНТУ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ

В. І. Дубовий

доктор сільськогосподарських наук, професор

Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)

e-mail: vidubovy@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8637-0023>**О. О. Будає**

кандидат сільськогосподарських наук

Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)

e-mail: olegkrivbas@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9166-1557>**І. В. Холоденко**

аспірант

Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)

e-mail: khodenkoivan@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4978-9079>**О. В. Ляшинська**

аспірантка

Білоцерківський національний аграрний університет (м. Біла Церква, Україна)

e-mail: 0977604549@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3322-0873>

У статті розглянуто перспективи та технології використання мулових мас стічних вод (далі — ММСВ) у сільському господарстві, а також екологічні та економічні аспекти їх утилізації. Висвітлено потенційні ризики, пов'язані з наявністю важких металів, стійких органічних забруднювачів і патогенних мікроорганізмів, що можуть становити загрозу для довкілля та здоров'я людини. Наведено аналіз сучасних підходів до переробки та утилізації ММСВ, що дозволяють знизити екологічне навантаження на довкілля. Здійснено огляд актуальних нормативно-правових актів щодо регулювання використання мулових мас в Україні та країнах світу. За результатами дослідження підкреслено доцільність науково обґрунтованого застосування ММСВ як економічно вигідного та екологічно прийняттого ресурсу в системі стійкого сільського господарства. Проведено агрохімічний аналіз ММСВ у картах-відстійниках і буртах. Показано, що вміст важких металів не перевищує ГДК. Відзначається важливість використання ММСВ під час вирощування зернових (пшениці та ячменю), зернобобових (сої), круп'яних (гречки) і технічних (соняшнику, кукурудзи на зерно) культур, що й передбачено нашими дослідженнями.

Ключові слова: ґрунт, важкі метали, мулові маси стічних вод, органічне землеробство, органічні добрива, сільське господарство.

.....

ВСТУП

ММСВ є важливим ресурсом, що може бути використаний у різних галузях господарства, зокрема в сільському господарстві, біоенергетиці та екологічних технологіях. Оскільки процес їх утворення супроводжується значними обсягами відходів, актуальним стає питання ефективної утилізації ММСВ.

У сучасних умовах чільне місце серед ефективних методів утилізації відходів, що дозволяють зменшити залежність від мінеральних добрив, відведено ММСВ як альтернативі орґано-мінеральним добривам. Цей підхід не лише сприяє зменшенню обсягів відходів, але й дозволяє повернути цінні поживні речовини

в ґрунт, підтримуючи його структуру та родючість [1; 2].

Використання ММСВ як добрив має значний потенціал у контексті стійкого сільського господарства, відповідає концепції *circular esopotu* та, як наслідок, сприяє зменшенню використання невідновлюваних ресурсів. Водночас для підвищення безпеки та ефективності використання ММСВ необхідно вирішити завдання щодо зменшення ризиків для здоров'я людини та довкілля. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розроблення методів ефективного застосування ММСВ під час вирощування зернових і технічних культур, вивчення їхньої продуктивності та якості зерна,

встановлення нормативних вимог і моніторинг впливу на екосистеми.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні наукові дослідження показують як переваги, так і ризики, пов'язані з використанням ММСВ у сільському господарстві [3; 4].

ММСВ містять велику кількість макро- та мікроелементів, таких як N, P, K, Zn та Cu, а також органічну складову, що робить їх перспективним добривом [5]. Проте, поряд із цими важливими компонентами, вони можуть мати в складі також важкі метали (Pb, Cd, Ni), патогенні мікроорганізми, залишки лікарських засобів і стійкі органічні забруднювачі типу PFAS (синтетичні фторорганічні сполуки) [2; 6–8].

Незважаючи на можливі переваги, існують ризики, пов'язані з безпекою використання ММСВ у сільському господарстві. Зокрема, накопичення важких металів у ґрунті може призвести до їх потрапляння в харчові ланцюги, а потенційна присутність патогенних мікроорганізмів і стійких забруднювачів — до негативних наслідків для екосистем і здоров'я людини [9].

Дослідження показують, що застосування ММСВ може призводити до накопичення важких металів у ґрунті та рослинах, що становить загрозу для здоров'я людини [3].

Так, у дослідженнях Н. Kominko, К. Gorazda та З. Wzorek показано вплив добрив на основі мулових мас стічних вод на приріст біомаси та накопичення важких металів у рослинах. Результати свідчать про підвищення врожайності ріпаку, кукурудзи та соняшнику внаслідок застосування таких добрив, однак виявлено потенційне підвищення концентрацій Cd, Ni та Pb у біомасі залежно від дози внесення.

ММСВ можуть містити PFAS (перфторалкільні і поліфторалкільні речовини) й інші стійкі органічні сполуки, які не розкладаються в навколишньому середовищі та можуть накопичуватися в харчовому ланцюгу.

У 2025 році Агентство з охорони навколишнього середовища США (англ. *Environmental Protection Agency, EPA*) оприлюднило проєкт оцінки ризиків, пов'язаних із наявністю PFAS у мулі стічних вод. У документі зазначено, що ці хімічні речовини можуть спричиняти серйозні захворювання, зокрема рак, порушення роботи імунної системи та проблеми з розвитком у дітей. EPA рекомендує штатам проводити моніторинг біосолід для виявлення PFAS і впроваджувати заходи з попередньої обробки промислових стоків [6].

Дослідження, проведене в Канаді, виявило наявність 80 сполук PFAS у мулі стічних вод, біосолідах, компостах і хімічних добривах. Це свідчить про широке поширення цих забруднювачів у різних типах добрив, що застосовуються в сільському господарстві [10].

Застосування ММСВ, що містять PFAS, на сільськогосподарських угіддях може призвести до перенесення цих речовин у вирощувані культури. Дослідження показують, що деякі рослини здатні поглинати PFAS через кореневу систему, що може призвести до їх накопичення в їстівних частинах рослин [4].

Згідно з дослідженням [7], очисні споруди, які використовують анаеробне зброджування, мають тенденцію до накопичення вищих концентрацій поліциклічних ароматичних вуглеводнів і поліхлорованих біфенілів у мулі. Ці сполуки є стійкими органічними забруднювачами, що можуть негативно впливати на здоров'я людини та екосистеми.

У статті [11] розглядаються можливості використання осадів стічних вод у сільському господарстві як добрив. Автор аналізує агрохімічні характеристики осадів, потенційні ризики для довкілля та здоров'я людей, а також надає пропозиції щодо вдосконалення системи контролю за їх використанням. Зроблено висновки про доцільність застосування осадів за умови попереднього очищення та дотримання екологічних нормативів.

У [12] встановлено нормативно-правові вимоги до повторного використання очищених стічних вод та осаду стічних вод, зокрема в сільському господарстві. Визначено критерії безпеки та гранично допустимі концентрації забруднюючих речовин для забезпечення екологічної безпеки під час їх застосування.

У статті [1] досліджено вплив застосування мулових добрив на фізико-хімічні властивості чорноземів. Результати показали, що внесення мулу сприяє підвищенню вмісту гумусу та покращенню структури ґрунту. Однак автори наголошують на необхідності контролю за вмістом важких металів у мулі, щоб запобігти можливому забрудненню ґрунтів і негативному впливу на рослини.

У звіті EFSA (англ. *European Food Safety Authority*) за 2024 рік розглядаються ризики, пов'язані з наявністю пер- та поліфторалкільних речовин (PFAS) у навколишньому середовищі, зокрема в мулі стічних вод. Зазначено, що PFAS є стійкими забруднювачами, які можуть накопичуватися в харчовому ланцюгу, спричиняючи потенційні загрози для здоров'я людини. EFSA підкреслює необхідність обмеження вмісту таких речовин у добривах і впровадження заходів

контролю для мінімізації їхнього впливу на довкілля та здоров'я населення [2].

У роботі [13] досліджено можливості виробництва органомінеральних добрив на основі осади стічних вод у Польщі. Автори аналізують вміст поживних речовин, важких металів і фітотоксичність таких добрив для вирощування ріпаку. Результати показують, що за умов дотримання нормативів щодо вмісту важких металів, такі добрива можуть бути ефективним і безпечним джерелом поживних речовин для сільського господарства, відповідаючи вимогам ЄС.

У статті [14] досліджено вплив біовугілля, отриманого з мулу стічних вод, на адсорбцію та біодоступність важких металів у ґрунтах. Автори показали, що додавання такого біовугілля суттєво зменшує рухомість токсичних металів, покращуючи екологічну безпеку використання мулових продуктів у сільському господарстві. Результати свідчать про ефективність цього підходу для ремедіації забруднених ґрунтів і його потенційне застосування як безпечного компонента органомінеральних добрив.

У дослідженні [8] представлено огляд сучасних методів перетворення мулу стічних вод на добрива з акцентом на відновлення поживних речовин (азоту, фосфору) і зниження екологічних ризиків. Описано ефективні технології обробки мулу, що дозволяють зменшити вміст патогенних організмів, органічних забруднювачів і важких металів. Автори підкреслюють важливість збалансованого підходу до утилізації мулу для підвищення його агрономічної цінності та екологічної безпеки.

Автори статті [15] аналізують міжнародні практики утилізації осади стічних вод, такі як компостування, спалювання, виробництво будівельних матеріалів, та оцінюють їхню придатність для впровадження в Україні. Наголошується на необхідності розвитку нормативно-правової бази та інфраструктури для ефективного використання осади у сільському господарстві.

У дослідженнях [16] встановлено, що осади стічних вод мають високий вміст органічної речовини та макроелементів, що робить їх перспективними для використання як добрив за умови контролю за вмістом важких металів.

Саме тому ми поставили за мету дослідити агрохімічні особливості мулових мас стічних вод безпосередньо в картах-відстійниках і буртах.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Агрохімічний аналіз як вологого, так і сухого осади було проведено в сертифікованій ла-

бораторії Київської обласної проєктно-наукової станції хімізації сільського господарства. У сухому вигляді осад є розсипчастим, однорідним матеріалом темно-сірого кольору, без запаху, з вмістом органічної речовини від 41 до 45% при слабокислій реакції ($\text{pH}_{\text{сол}}$ 5,3–6,7); $\text{N}_{\text{заг}}$ 0,7–1,5%; P_2O_5 0,9–1,4%; K_2O 0,1–0,2%; гумус 10,2–10,4%. Відбір проб ММСВ на мулових майданчиках каналізаційних очисних споруд здійснювали згідно з загальноприйнятою методикою [17].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Численні дослідження показують негативні наслідки систематичного використання мінеральних добрив. В умовах мінеральної системи живлення рослин відбувається надмірне накопичення у ґрунті мінеральних форм азоту в нітратній формі. Мінеральні добрива часто незбалансовані за поживними речовинами і представлені формами, які розчиняються та засвоюються лише на 40%, тоді як залишок (60%) змивається поверхневими і внутрішніми стоками у Світовий океан або втрачається внаслідок денітрифікації. Значна їхня кількість є продуктами переробки відходів промисловості або низькозбагачених агроруд, які небезпечно впливають на живі організми та природні екосистеми через наявність у них домішок важких металів, радіонуклідів, органічних і неорганічних речовин.

Серед різних типів підприємств хімічної промисловості найбільший інтерес становлять підприємства з виробництва фосфорних і комплексних добрив, у зв'язку зі шкідливістю вихідних продуктів — фосфору, азотної кислоти, апатитів, а також складним комплексом технологічних процесів та утворення токсичних інгредієнтів у процесі їх виробництва — фтору, аміаку, окисів азоту та інших сполук.

Шкода, яку завдають мінеральні добрива під час їх виробництва, для навколишнього середовища є колосальною. Це охоплює викиди шкідливих речовин у повітря та воду, енерго- і ресурсоспоживання, викиди парникових газів тощо.

Слід зазначити, що це виробництво є надзвичайно небезпечним, адже вимагає суворого дотримання технології. Не важко провести аналогію з виробництвом інших видів добрив.

Водночас у процесі життєдіяльності людина виробляє значну кількість каналізаційних відходів, на очищення яких виділяються відповідні енергетичні ресурси. Тобто очищення каналізаційних стоків є життєво необхідною ланкою для існування людства. Очевидно, що такі каналізаційні стоки є специфічними залежно від промислового розвитку регіону, але

в процесі зберігання осаду очисних споруд каналізації його мікробіологічна складова стабілізується.

У зв'язку з цим ми виконали дослідження агрохімічного стану ММСВ. У березні 2024 р. було відібрано зразки ММСВ на мулових майданчиках очисних споруд м. Біла Церква.

Агрохімічний аналіз як вологого, так і сухого осадів був проведений у сертифікованій лабораторії Київської обласної проектно-наукової станції хімізації сільського господарства, а його результати представлені в *табл. 1*.

ММСВ є індивідуальними за своїм хімічним складом. На сьогодні вони нові та досі мало досліджені, що нерідко викликає підозри щодо їх використання.

Таблиця 1

**Агрохімічний аналіз
вологого та сухого осадів**

Показники	Агрофізичний стан мулових мас	
	сухих	вологих
Вологість, %	32,77	67,37
Суха р-на, %	67,23	32,63
Зола, %	58,75	55,0
Органічна речовина, %	41,25	45,0
pH _{сол.}	5,3	6,7
N _{заг.} , %	1,533	0,731
P ₂ O ₅ , %	1,412	0,881
K ₂ O, %	0,227	0,109
Гумус	10,15	10,37

Джерело: сформовано авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 2

**Вміст важких металів в осаді очисних
споруд міської каналізації, мг/кг**

Показники	Сухий осад	ГДК
Кадмій (Cd)	0,02	1,5
Свинець (Pb)	0,066	32
Цинк (Zn)	11,359	23
Мідь (Cu)	2,883	3,0
Кобальт (Co)	0,218	5,0

Джерело: сформовано авторами на основі власних досліджень.

Органічні сполуки, макро- і мікроелементи, високий вміст фосфору та реакція, наближена до нейтральної, характеризують ММСВ як відповідні добрива.

Вміст важких металів у ММСВ представлений у *табл. 2*, з якої видно, що вони не перевищують показники ГДК.

Слід зазначити, що органічні сполуки, високий вміст фосфору, загального азоту, калію та реакція, наближена до нейтральної, свідчать про високу поживну цінність цих добрив з агрономічної точки зору.

Під час очищення стічних вод каналізації осади піддаються знешкодженню, знезараженню, обезводненню та сушці. Вміст гумусу в сухому осаді становив 10,15%, тоді як у вологому — 10,37%. Підсушування ММСВ незначно вплинуло на зміну цього показника.

Мінеральна частина осадів переважно представлена сполуками азоту, фосфору та калію.

Нагромадження калію в ґрунті не відбувається, оскільки в осадах цього елемента недостатньо. Вміст великої кількості органічних речовин (41,25–45,0%) дозволяє використовувати осади для рекультивації ґрунтів, у яких втрачено верхній родючий шар, що є особливо важливим для відновлення його природної родючості.

Вміст загального азоту становить 0,7–1,5%; загального фосфору — 0,9–1,4%; загального калію — 0,1–0,2%. У процесі зневоднення спостерігається зменшення валового азоту на 0,8%. Зафіксовано також зниження вмісту фосфору, який зменшився на 0,5%, а калію — на 0,1% у сухому осаді. Загалом вміст загальних форм поживних елементів у сухому осаді свідчить про його високу поживну цінність.

Отже, на підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що ММСВ можна віднести до одного з видів орґано-мінеральних добрив, що є альтернативою як органічним, так і мінеральним добривам. Виробництво останніх, як відомо, супроводжується значними витратами хімічно небезпечних речовин, що суттєво погіршують екологічний стан території їх виробництва та регіону загалом.

Звісно, кожен вид осаду стічних вод каналізації необхідно використовувати лише після об'єктивної агроекологічної оцінки. Надходження виробничих стоків на очисні станції міст призводить до наявності в осадах низки мікроелементів, таких як бор, кобальт, марганець, мідь, молибден і цинк. Особливі вимоги стосуються вмісту важких металів в осаді стічних вод, оскільки цей санітарно-хімічний чинник може стати на заваді використанню осаду як добрива.

ВИСНОВКИ

Наведено аналіз сучасних підходів до переробки та утилізації ММСВ, а також показано шляхи зниження екологічного навантаження на довкілля. Проведено агрохімічний аналіз ММСВ в картах-відстійниках (вологий осад) і буртах (сухий осад).

Показано, що мулові маси стічних вод є важливим ресурсом, який може бути використаний у сільському господарстві як органомінеральне добриво.

Вміст порівняно великої кількості органічних речовин (41,25–45,0%) дозволяє рекомендувати мулові маси також для рекультивативі ґрунтів, у яких втрачено верхній родючий шар, що є особливо важливим для відновлення їхньої природної родючості.

Наголошується на доцільності науково обґрунтованого застосування ММСВ як економічно вигідного та екологічно прийняттого ресурсу в системі стійкого сільського господарства.

Отже, можна припустити, що очисні споруди населених пунктів виконують не тільки функцію позбавлення стічних вод від небажаних речовин, а й можуть бути підприємствами з виробництва органомінеральних добрив.

Зазначається важливість використання ММСВ при вирощуванні зернових (пшениці, ячменю), зернобобових (сої), круп'яних (гречки) і технічних (соняшнику, кукурудзи на зерно) культур, що також передбачено нашими дослідженнями.

ЛІТЕРАТУРА

1. Савенко І. М., Шевченко Л. П. Вплив мулових добрив на фізико-хімічні показники чорноземів. *Агро-екологічний журнал*. 2020. № 3. С. 45–50.
2. European Food Safety Authority (EFSA). Emerging risks and horizon scanning report 2024. *EFSA Supporting Publications*. 2025. EN-9475. 32 p.
3. Kominko H., Gorazda K., Wzorek Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417>
4. PFAS in agriculture: How sewage sludge contaminates crops. *Envirotech Online*. URL: <https://www.envirotech-online.com/news/pfas-analysis/105/international-environmental-technology/how-sewage-sludge-in-us-agriculture-contaminates-crops-with-pfas/63323> (дата звернення: 01.04.2025).
5. Manca G., Manca S., Sanna G. et al. Systematic Review and Meta-Analysis of the Sustainable Impact of Sewage Sludge Application on Soil Organic Matter and Nutrient Content. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16229865>
6. U.S. Environmental Protection Agency. Biosolids and per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). URL: <https://www.epa.gov/biosolids/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-sewage-sludge> (дата звернення: 01.04.2025).
7. Guo X., Wang Y., Liu H., Zhang J. Occurrence and fate of persistent organic pollutants in sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121564>
8. Gusiati Z. M., Klimiuk P. Transformation of sewage sludge into fertilizers: nutrient recovery and risk mitigation. *Waste and Biomass Valorization*. 2021. Vol. 12. P. 789–804. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00993-w>
9. Farsang A., Babcsányi I., Ladányi Z. et al. Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on the microbial activity, the nutrient and heavy metal content of a Chernozem soil in a field survey. *Arabian Journal of Geosciences*. 2020. Vol. 13, no. 19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06005-2>
10. McCarthy S. A., Mallavarapu M., Naidu R. Distribution and risk assessment of PFAS in biosolids, composts and fertilizers. *Chemosphere*. 2024. Vol. 349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141021>
11. Березовська Н. В. Перспективи застосування осадів стічних вод у сільському господарстві. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 2. С. 58–64.
12. Про затвердження Порядку повторного використання очищених стічних вод та осаду стічних вод за умови дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин: Наказ Міністерства регіонального розвитку і будівництва від 12.12.2018 р. № 341. *Офіційний вісник України*. 2018. № 102. С. 114.
13. Malinowska E., Jarosz-Krzemińska K. Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 660. P. 1413–1421. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.067>
14. Li R., Wang Z., Sun Y. Effects of sewage sludge-derived biochar on heavy metal adsorption and bioavailability. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29, no. 2. P. 2314–2326. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15765-9>
15. Шквірко О. М., Тимчук І. С., Мальований М. С. Адаптація світового досвіду утилізації осадів стічних вод до екологічних умов України. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 2. С. 82–87.
16. Дишлюк В. Є., Пиляк Н. В., Лобан Л. Л. Агроекологічна характеристика та оцінка придатності осадів стічних вод очисних споруд м. Одеси для використання в сільському господарстві. *Біологія та сільське господарство*. 2020. № 2. С. 45–51.
17. ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. Чинний від 2005-07-01. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 16 с.

THE ROLE OF SEWAGE SLUDGE MASSES IN EXPANDING THE RANGE OF ORGANO-MINERAL FERTILIZERS

Dubovyi V.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Bila Tserkva National Agrarian University (Bila Tserkva, Ukraine)

e-mail: vidubovy@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8637-0023>

Budak O.

Candidate of Agricultural Sciences

Bila Tserkva National Agrarian University (Bila Tserkva, Ukraine)

e-mail: olegkrivbas@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9166-1557>

Kholodenko I.

Postgraduate student

Bila Tserkva National Agrarian University (Bila Tserkva, Ukraine)

e-mail: khodenkoivan@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4978-9079>

Liashynska O.

Postgraduate student

Bila Tserkva National Agrarian University (Bila Tserkva, Ukraine)

e-mail: 0977604549@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3322-0873>

The article examines the prospects and technologies for the use of sewage sludge masses (SSM) in agriculture, as well as the environmental and economic aspects of their utilization. It highlights potential risks associated with the presence of heavy metals and pathogenic microorganisms, which may pose threats to the environment and human health. The paper provides an analysis of current approaches to the processing and utilization of sewage sludge, aimed at reducing environmental impact. A review of current regulatory frameworks governing the use of sewage sludge in Ukraine and other countries is presented. Based on the research findings, the paper emphasizes the feasibility of scientifically justified application of SSM as an economically viable and environmentally acceptable resource in sustainable agriculture systems. An agrochemical analysis of SSM from sedimentation maps (wet) and dry storage (heaps) was conducted. It was shown that the concentration of heavy metals does not exceed maximum permissible limits. The importance of using SSM in the cultivation of cereal crops (wheat and barley), legumes (soybean), pseudocereals (buckwheat), and industrial crops (sunflower, corn for grain) is noted, which corresponds with the focus of our research.

Keywords: soil, heavy metals, sewage sludge, organic farming, organic fertilizers, PFAS, agriculture.

REFERENCES

1. Savenko, I. M., & Shevchenko, L. P. (2020). Influence of sludge fertilizers on physicochemical properties of chernozems. *Agroecological Journal*, 3, 45–50.
2. European Food Safety Authority. (2025). Emerging risks and horizon scanning report 2024. *EFSA Supporting Publications*.
3. Kominko, H., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2022). Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Journal of Environmental Management*, 305, 114417. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114417
4. Envirotech Online. (n.d.). *PFAS in agriculture: How sewage sludge contaminates crops*. Retrieved from <https://www.envirotech-online.com/news/pfas-analysis/105/international-environmental-technology/how-sewage-sludge-in-us-agriculture-contaminates-crops-with-pfas/63323>
5. Manca, G., Manca, S., Sanna, G., Manca, P., & Manca, A. (2024). A systematic review and meta-analysis of the sustainable impact of sewage sludge application on soil organic matter and nutrient content. *Sustainability*, 16(22), 9865. doi: 10.3390/su16229865
6. U.S. Environmental Protection Agency. (2025). *Biosolids and per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS)*. Retrieved from <https://www.epa.gov/biosolids/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas-sewage-sludge>
7. Guo, X., Wang, Y., Liu, H., & Zhang, J. (2023). Occurrence and fate of persistent organic pollutants in sewage sludge: A review. *Environmental Pollution*, 326, 121564. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121564
8. Gusiatin, Z. M., & Klimiuk, P. (2021). Transformation of sewage sludge into fertilizers: Nutrient recovery and risk mitigation. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 789–804. doi: 10.1007/s12649-020-00993-w
9. Farsang, A., Babcsányi, I., Ladányi, Z., Perei, K., Bodor, A., Csányi, K., & Barta, K. (2020). Evaluating the effects of sewage sludge compost applications on microbial activity, nutrient and heavy metal content of a Chernozem soil in a field survey. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(19), 987. doi: 10.1007/s12517-020-06005-2
10. McCarthy, S. A., Mallavarapu, M., & Naidu, R. (2024). Distribution and risk assessment of PFAS in biosolids, composts and fertilizers. *Chemosphere*, 349, 141021. doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141021
11. Berezovska, N. V. (2021). Prospects for the use of sewage sludge in agriculture. *Agroecological Journal*, 2, 58–64.
12. Order of the Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine No. 341 “On approval of the proce-

- ture for reuse of treated wastewater and sewage sludge under compliance with maximum allowable concentrations of pollutants". (2018, December). *Official Bulletin of Ukraine*, 102, 114.
13. Malinowska, E., & Jarosz-Krzemińska, K. (2019). Potentiality of sewage sludge-based organo-mineral fertilizer production in Poland considering nutrient value, heavy metal content and phytotoxicity for rapeseed crops. *Science of The Total Environment*, 660, 1413–1421. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.067
 14. Li, R., Wang, Z., & Sun, Y. (2022). Effects of sewage sludge-derived biochar on heavy metal adsorption and bio-availability. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2314–2326. doi: 10.1007/s11356-021-15765-9
 15. Shkvirko, O. M., Tymchuk, I. S., & Malovanyi, M. S. (2019). Adaptation of global experience in sewage sludge disposal to environmental conditions of Ukraine. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 29(2), 82–87.
 16. Dyshliuk, V. Ye., Pilyak, N. V., & Loban, L. L. (2020). Agroecological characteristics and suitability assessment of sewage sludge from Odesa treatment facilities for agricultural use. *Biology and Agriculture*, 2, 45–51.
 17. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2005). Soil quality. Sampling (DSTU 4287:2004). Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ДУБОВИЙ Володимир Іванович — доктор сільськогосподарських наук, професор, Білоцерківський національний аграрний університет (Соборна площа, 8/1, м. Біла Церква, Україна, 09117; e-mail: vidubovy@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8637-0023>).

БУДАК Олег Олегович — кандидат сільськогосподарських наук, асистент, Білоцерківський національний аграрний університет (Соборна площа, 8/1, м. Біла Церква, Україна, 09117; e-mail: olegkrivbas@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9166-1557>).

ХОЛОДЕНКО Іван Володимирович — аспірант, Білоцерківський національний аграрний університет (Соборна площа, 8/1, м. Біла Церква, Україна, 09117; e-mail: khodenkoivan@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-4978-9079>).

ЛЯШИНСЬКА Олена Володимирівна — аспірантка, Білоцерківський національний аграрний університет (Соборна площа, 8/1, м. Біла Церква, Україна, 09117; e-mail: 0977604549@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3322-0873>).

Новини

Новини

Новини • Новини • Новини

За даними дослідження Ініціативи з обліку викидів парникових газів від війни росії, у 2024 році кліматичний слід збройного конфлікту в Україні зріс на 30%, досягнувши 230 млн тонн CO₂-еквіваленту з початку повномасштабного вторгнення. Як зазначила **Світлана Краковська** з Українського гідрометеорологічного інституту під час сесії МГЕЗК у Ханчжоу, фінансова відповідальність рф за ці викиди, розрахована за соціальною ціною вуглецю (\$185/т), перевищує \$42 млрд. Міндовкілля України акцентує, що світова спільнота має усвідомити нерозривний зв'язок між кліматичною безпекою та миротворенням, що вимагає консолідованих міжнародних дій.

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ҐРУНТУ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН КВАСОЛІ ЗА РІЗНИХ СТРОКІВ СІВБИ В УМОВАХ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

О. В. Овчарук

доктор сільськогосподарських наук, доцент
ЗВО “Подільський державний університет” (м. Кам’янець-Подільський, Україна)
e-mail: ovcharuk.oleh@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1117-962X>

Я. В. Бабій

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
ЗВО “Подільський державний університет” (м. Кам’янець-Подільський, Україна)
e-mail: agroslava2017@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2115-0916>

В. І. Овчарук

доктор сільськогосподарських наук, професор
ЗВО “Подільський державний університет” (м. Кам’янець-Подільський, Україна)
e-mail: plspg@pdatu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3298-9685>

Г. А. Аветісян

аспірант
ЗВО “Подільський державний університет” (м. Кам’янець-Подільський, Україна)
e-mail: Gor.avetisian17@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5112-7240>

О. В. Ткач

доктор сільськогосподарських наук, професор
ЗВО “Подільський державний університет” (м. Кам’янець-Подільський, Україна)
e-mail: oleg.v.tkach@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1368-673X>

О. О. Кічігіна

кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник
Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: seednlen @ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0879-627X>

Температура ґрунту і повітря дозволяє кореневій системі квасолі засвоювати поживні речовини, підвищувати інтенсивність фотосинтезу й дихання рослин, транспірації та інших фізіологічних процесів. Температура, за якої рослини ростуть і розвиваються найбільш інтенсивно, є оптимальною, а відхилення від неї сповільнює ріст і розвиток. Оптимальна температура сприяє активному процесу фотосинтезу, водночас асиміляція переважає над дисиміляцією, внаслідок чого в рослинах накопичуються сухі речовини. Коливання температури негативно впливає на ріст і розвиток рослин квасолі та часто призводить до ураження їх хворобами. З підвищенням температури посилюються процеси асиміляції та синтезу органічних речовин, одночасно підвищується інтенсивність дихання. Слід зазначити, що рослини квасолі ранніх строків сівби завжди будуть краще розвинені, ніж ті, що посіяні пізніше, і матимуть вищу продуктивність. Це можна пояснити тим, що за ранніх строків сівби (за нижчих температур) хоча сходи рослин з’являються дещо пізніше, але їхня коренева система розвивається краще порівняно з рослинами, посіяними пізніше. Такі сходи легше реагують на короточасні посухи, і рослини формують більшу врожайність. За пізніших строків сівби (коли температура ґрунту вища) сходи з’являються швидше, і, відповідно, інтенсивніше розвивається коренева система та наростає вегетативна маса. Це призводить до порушення балансу між кореневою системою та листовим апаратом у забезпеченні вологою рослин квасолі, внаслідок чого в жарку сонячну погоду листки в’януть, спостерігається стрес і зниження продуктивності рослин. Вплив температури на ріст і розвиток рослин квасолі залежить також від їхнього фізіологічного стану та дії інших факторів. Із підвищенням інтенсивності сонячного освітлення за достатнього вмісту в ґрунті вологи і поживних речовин підвищується інтенсивність фотосинтетичної діяльності рослин та інших фізіологічних процесів рослин.

Ключові слова: сорт, періоди розвитку рослин, тривалість фази та вегетаційного періоду, агро-ценоз.

ВСТУП

Квасоля має значний попит серед населення України і є одним із улюблених продуктів харчування завдяки високому вмісту білка. Вона займає провідне місце серед бобових культур і є невід'ємною частиною збалансованого раціону в багатьох країнах [1; 2].

Результати наукових досліджень і практика передових господарств показують, що одним із важливих чинників, які підвищують урожай і якість насіння квасолі, є оптимальні строки сівби, сорти та удобрення, що відповідають конкретній зоні вирощування [2; 3]. Дружні сходи та оптимальна густота розміщення рослин — важливі умови для формування високого врожаю. Квасоля дуже чутлива до приморозків, тому її висівають, коли ґрунт на глибині 10 см прогріється до 10–12°C [4].

Сорти квасолі звичайної особливо чутливі до регульованих антропогенних чинників, таких як удобрення, зрошення, застосування хімічних препаратів та ін. Крім того, період онтогенезу рослин є дуже чутливим до несприятливих факторів [5; 6]. Частка впливу сорту становить від 25% до 50%, а в екстремальних погодних умовах (посухи, епіфітотії, хвороби) зменшується [7; 8].

Квасоля є вимогливою до умов вирощування, що призводить до зростання витрат, зокрема на застосування мінеральних добрив. Приріст врожаю не завжди забезпечує їхню окупність [2].

Мета дослідження — виявити вплив різних строків сівби за різної температури ґрунту на ріст і розвиток рослин квасолі в умовах Західного Лісостепу України, враховуючи сортові особливості.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Нашими дослідженнями, а також роботами науковців Л. П. Михайленка, В. Ф. Петриченка та інших доведено, що строки сівби суттєво впливають на майбутній урожай сільськогосподарських культур, зокрема квасолі [3; 5; 6; 10]. Вибираючи строк сівби для квасолі звичайної, потрібно визначити наявність у ґрунті вологи та рівень температурного режиму, вести спостереження за зміною температури повітря й ґрунту, появою шкідників і хвороб, коливанням погодних умов. Це обумовлено біологічними особливостями, що є важливою умовою для отримання дружніх сходів і, як наслідок, високого врожаю [2; 9].

Квасоля — теплолюбна рослина, яка не витримує температури нижче 0°C. За нашими дослідженнями, сходи квасолі пошкоджуються за зниження температури до 2–3°C, а за 0°C

і нижче — гинуть [2; 10; 11]. Також встановлено, що температура повітря і ґрунту як основний фактор корелює з тривалістю вегетації рослин. З підвищенням температури прискорюється інтенсивність росту та розвитку рослин — від набубнявіння насіння, яке потрапило в ґрунт, до формування та дозрівання врожаю.

Для одержання дружніх сходів і формування оптимальної густоти агроценозу квасолі висівають, коли мине загроза повернення холодів, і ґрунт на глибині 10 см прогріється до 10–12°C. У зв'язку з цим для ранніх посівів квасолі характерні повільний розвиток і пошкодження тимчасовими зниженнями температури, що призводить до загибелі рослин і, відповідно, зрідження посівів.

Інтенсифікація процесів росту та розвитку рослин квасолі звичайної обумовлюється впливом екологічних, едафічних і біотичних чинників, проте головну роль все ж таки відіграють сорти та адаптована технологія вирощування [4; 10; 12; 13].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальну роботу проводили впродовж 2022–2024 років відповідно до загальноприйнятої методики [9; 14] та плану науково-дослідної роботи кафедри садівництва і виноградарства ЗВО “Подільський державний університет” у ТОВ “Агро-Слава-2017” Хмельницької області.

Ґрунтовий покрив дослідної ділянки представлений переважно чорноземом опідзоленим середньосуглинкового складу. Забезпеченість поживними елементами: загальним азотом (за Корнфільдом) — 0,157–0,169%, рухомими формами фосфору та калію (за Чириковим) — 16,5 та 11,5 мг на 100 г ґрунту відповідно.

Погодно-кліматичні умови регіону характеризуються достатнім забезпеченням температурного режиму за недостатнього зволоження. Підвищення температури спостерігається в ранньовесняний і літній періоди. Тривалість теплового періоду становить 230–265 днів, а період активної вегетації — від 155 до 170 діб. Показники суми активних температур варіюються від 2300 до 2750°C, ГТК — на рівні 1,3–2,0, кількість опадів за рік коливається в межах 498–675 мм, із середньою температурою повітря 7,8°C.

У дослідженні вивчали сорти квасолі звичайної, внесені до Державного реєстру сортів, дозволених для використання на території України: Буковинка, Славія, Ассоль і Рось. Сівбу проводили з шириною міжрядь 45 см і нормою висіву 400 тис. схожих насінин на 1 га. Загальна площа елементарної ділянки стано-

вила 45,0 м², облікової — 25,2 м² у трикратній повторності.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати експериментальних досліджень показали, що за сівби в різні строки довжина періоду “сівба — сходи” змінюється залежно від температури повітря та ґрунту. Насіння квасолі дружно проростало за сівби, коли ґрунт на глибині 10 см прогрівався до температури 15–17°C, а середньодобова температура повітря не була нижчою за 13–15°C. Сходи з’являлися на 8–9 добу порівняно із сівбою в менш прогрітій ґрунт за умов, що склалися у 2023 році, де сходи з’являлися через 14–17 діб (рис. 1).

За роки досліджень мінімальна тривалість періоду “сівба — сходи”, що становила 6 діб, була зафіксована за сівби 1–3 травня в умовах 2024 року.

На тривалість появи сходів вплинуло тимчасове зниження температури в нічні та ранкові години. Так, за сівби в оптимальні строки, коли середньодобова температура повітря за період “сівба — сходи” становила 16,2–15,8°C, сходи з’являлися на 7–10 добу. Це можна пояснити тим, що на поверхні ґрунту середня мінімальна температура повітря змінювалася в межах від 9,4 до 4,5°C, а відхилення мінімальних температур варіювали від 26,0 за 12,0°C до 0,5 за 9,5°C.

Під час аналізу результатів досліджень 2022–2024 років встановлено, що за період “сівба — сходи” сума активних температур була значно вищою за сівби в ранні квітневі строки (200°C і вище) порівняно з травневими строками (153,4–155,7°C).

Також встановлено, що залежно від рівня прогрівання ґрунту на глибині 10 см сума температур від сівби до сходів змінюється: за сівби в добре прогрітій ґрунт вона становила 123,9–160°C, а в менш прогрітій — 170–232,2°C. Біологічно активні температури (вище 10°C) відповідно становили 57,6°C і 89,1°C (табл. 1).

Сума біологічно активних температур зростає від ранніх до пізніх строків сівби. Середня температура ґрунту за період проведення дослідження та показники суми біологічно активних температур були в прямій залежності: з підвищенням температури ґрунту збільшуються показники суми біологічно активних температур вище встановленого рівня за рахунок включення в підсумок баластних температур.

Аналізуючи показники суми біологічно активних температур для встановлення загальної закономірності, було виявлено, що в день сівби температура ґрунту на глибині 10 см підвищувалася від 11,5°C — за сівби 14–17 квітня, до 21,8°C — 19–21 травня. За період “сівба — сходи” показники середніх температур підвищувалися від 13,5°C до 20,8°C. Сума активних температур зменшилася від 213,7°C до 155,7°C. Для уточнення біологічно активної температури під час проростання насіння квасолі в ґрунті використовували суми біологічно активних температур вище 10°C, 9°C, 8°C, 7°C, 6°C. Було зроблено висновок, що різниця між ними за строками становила до 7°C, а за 6°C знову підвищувалася. Суми біологічно активних температур вище 10°C, 9 і 8°C підвищувалися від ранніх до пізніх строків сівби і були в зворотному зв’язку з кількістю діб за період “сівба — сходи” (табл. 2).

Розрахунки показали, що за біологічно активних температур вище 10°C розбіжність

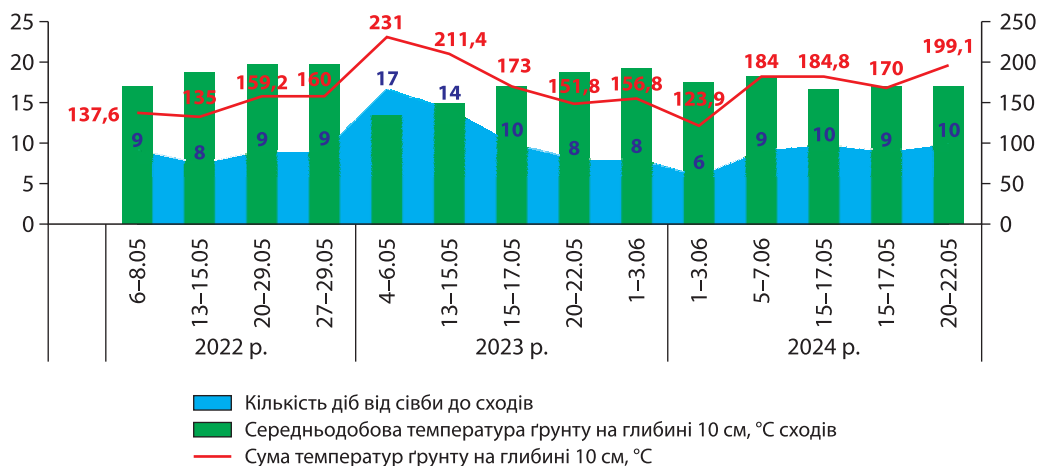


Рис. 1. Динаміка тривалості періоду від сівби до сходів сорту Буковинка залежно від температури ґрунту, діб

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 1

Вплив температурних умов на продуктивність періоду
“сівба – сходи” сорту Буковинка

Строк сівби	Кількість діб від сівби до сходів	Середньодобова температура, °C		Сума температур ґрунту на глибині 10 см, °C	Сума біологічно активних температур ґрунту вище 10°C
		ґрунту на глибині 10 см	повітря		
2022					
6–8.05	9	17,2	16,5	137,6	57,6
13–15.05	8	19,0	18,0	135,0	63,0
20–29.05	9	19,9	18,5	159,2	79,2
27–29.05	9	20,0	18,0	160,0	80,0
Середнє	8,8	19,2	17,8	147,9	69,9
2023					
4–6.05	17	13,6	13,0	232,2	61,2
9–11.05	14	15,1	14,6	211,4	71,4
15–17.05	10	17,3	16,4	173,0	73,0
20–22.05	8	18,9	15,9	151,8	71,2
1–3.06	8	19,6	17,6	156,8	76,8
Середнє	11,4	16,8	15,5	184,4	70,7
2024					
1–3.05	6	17,7	17,1	123,9	53,4
5–7.05	9	18,4	17,5	184,0	84,0
10–12.05	10	16,8	15,9	184,8	74,8
15–17.05	9	17,0	15,7	170,0	70,0
20–22.05	10	17,1	16,1	199,1	89,1
Середнє	8,8	17,6	16,5	170,7	74,3

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 2

Зміна суми біологічно активних температур за різних показників
за період “сівба – сходи” сорту Буковинка

Строк сівби	Температура, °С			Сума біологічно активних температур вище				Тривалість періоду, діб
	у день сівби	середня	сума	10°С	9°С	8°С	7°С	
14–17.04	14,5	13,5	213,7	52,7	72,1	88,6	104,7	16,1
21–23.04	12,8	14,7	201,6	63,6	78,7	92,5	106,3	13,8
28–30.04	13,9	16,2	178,6	66,8	80,6	80,6	91,8	11,2
5–7.05	17,3	17,4	176,7	73,7	86,5	86,5	96,8	10,3
12–16.05	18,3	20,0	153,4	74,4	86,9	86,9	94,8	7,9
19–21.05	21,8	20,8	155,7	77,2	90,9	90,9	98,6	7,7

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

суми температур між пізніми строками сівби становила 24,5°C (31,7%), за 9°C — 18,5°C (20,4%), а за 7°C — 1,6°C (1,5%). Довжина періоду “сівби – сходи” зменшувалася від ранніх до пізніх строків сівби.

При вивченні тривалості періоду “сходи – цвітіння” виявлено, що показники змінювалися залежно від умов і строків сівби та становили 34–48 діб.

Результатами досліджень встановлено, що фаза цвітіння в рослин квасолі у 2023 р. настала на 43–48 добу, у 2024 р. — на 34–38 добу після сходів. Пізні строки сівби скоротили цей період на 3–7 діб. Також результати підтверджують, що за підвищеної температури повітря фаза цвітіння настає раніше, а за зниженої — значно пізніше. Так, за сівби 4–5 травня з температурою повітря 16,5°C у 2023 році цвітіння настало на 48 добу після сходів, а за пізніших строків 20–22 травня і 1 червня з температурою повітря 17,7°C — на 41 добу, що на 7 діб раніше. В умовах 2023 р. підвищення середньодобової температури прискорило фазу цвітіння на 3 доби. Підвищення середньодобової температури на 1°C прискорило настання фази цвітіння на 7–11 діб (табл. 3).

Нами встановлено, що сума температур повітря зменшувалася приблизно на 100°C, вод-

ночас сума біологічно активних температур вище 10°C не змінилась і становила майже 300°C.

Ріст і розвиток рослин квасолі, за нашими показниками, демонструють пропорційну залежність від кількості тепла в повітрі та ґрунті. Так, у 2022, 2023 і 2024 роках було встановлено закономірність, що з підвищенням температури повітря скорочується період від сходів до цвітіння (табл. 4).

Як встановлено результатами досліджень, незначна кількість опадів і підвищення температури прискорюють дозрівання рослин квасолі, а зниження температури й часті випадання опадів, навпаки, продовжують період вегетації. У наших дослідженнях для різних сортів встановлена однакова закономірність: зі зниженням середньодобової температури повітря зменшується сума біологічно активних температур. Так, за температури 18°C сума біологічно активних температур була постійною для всіх строків сівби і становила 326–335°C, а за підвищення температури на 2°C вона збільшилася до 388–403°C.

В умовах проведення експериментальних досліджень у різні роки сума біологічно активних температур змінювалася від 365°C (за знижених температур) до 500°C і вище. У се-

Таблиця 3

Вплив строків сівби на подовженість періоду “сходи – цвітіння” сорту Буковинка залежно від температури

Строк сівби	Тривалість періоду “сходи – цвітіння”, діб	Середньодобова температура повітря, °C	Сума температур, °C	
			позитивні	біологічно активні (вище 10°C)
2023				
4–6.05	48	16,5	792	312
9–11.05	45	16,8	767	306
15–17.05	43	17,0	733	301
20–22.05	41	17,7	726	315
1.06	41	17,7	726	315
Середнє	43	17,1	746,8	309,8
2024				
1–3.05	37	17,4	644	274
5–7.05	37	17,8	658	288
10–12.05	38	18,4	698	319
15–17.05	38	18,1	689	308
20–22.05	34	18,7	637	296
Середнє	36	18,1	665,2	297,0

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 4

Тривалість періоду “сходи – цвітіння” сортів квасолі залежно від температури

Строки сівби	Кількість діб від цвітіння до дозрівання				Середня температура повітря за період, °С			Сума біологічно активних температур вище 10°С			
	2022	2023	2024	Середнє	2022	2023	2024	2022	2023	2024	Середнє
Буковинка											
14–17.04	33	33	35	32,7	23,2	20,9	23,1	436	360	499	439
21–23.04	33	37	36	33,3	23,8	21,6	24,6	457	431	555	481
28–30.04	33	35	39	34,9	23,8	21,1	23,0	450	500	528	495
5–7.05	42	32	35	35,3	23,9	23,0	25,6	585	417	493	498
12–16.05	40	34	34	35,0	23,5	22,0	23,4	538	408	485	477
19–21.05	36	31	33	32,7	22,9	22,5	22,7	466	387	442	431
Славія											
14–17.04	39	34	-	37,0	22,0	19,5	23,2	471	507	-	489
21–23.04	39	36	37	38,3	22,6	20,9	23,6	490	428	490	469
28–30.04	36	35	40	37,0	23,5	20,3	23,6	487	360	545	464
5–7.05	46	33	36	38,3	23,6	21,6	23,8	625	385	500	503
12–16.05	40	32	35	35,6	29,4	21,5	23,3	537	368	468	457
19–21.05	36	34	36	35,3	22,8	23,2	22,3	462	449	444	451
Ассоль											
14–17.04	37	36	-	36,5	22,4	21,4	-	459	412	-	435
21–23.04	37	42	38	39,0	22,6	21,6	20,5	466	490	401	452
28–30.04	36	37	41	38,0	29,0	21,8	23,7	468	436	562	488
5–7.05	37	37	36	36,7	21,3	20,7	24,6	418	495	526	446
12–16.05	43	37	36	38,7	22,1	21,8	22,4	520	437	519	492
19–21.05	40	34	35	36,3	22,3	22,0	22,9	491	409	454	451
Рось											
14–17.04	35	39	35	36,3	21,9	21,9	24,2	417	467	497	460
21–23.04	36	38	35	35,3	21,9	21,5	24,2	438	497	455	455
28–30.04	33	34	39	35,0	23,1	20,9	24,0	411	377	547	452
5–7.05	37	35	35	37,6	23,4	20,4	23,9	494	365	452	437
12–16.05	39	31	36	35,0	22,2	22,1	22,8	477	378	462	439
19–21.05	37	35	34	35,0	29,1	22,5	21,7	488	439	399	441

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

редньому за роками показники були близькими за всіма строками сівби і для сорту Буковинка становили 498°С, для сорту Славія — 503°С, для сорту Ассоль — 492°С і для сорту Рось — 460°С.

Також слід зазначити, що, незважаючи на значну різницю в період фази розвитку рослин квасолі сорту Буковинка “сівба – сходи” — від 17 до 8 діб, період вегетації практично однаковий — 80–81 діб (табл. 5).

Таблиця 5

Вплив строків сівби квасолі на тривалість фази “сходи – дозрівання насіння” сорту Буковинка

Строк сівби		Період вегетації, діб				Відхилення за періодами вегетації	
		“сівба – сходи”		“сходи – дозрівання”			
2023	2024	2023	2024	2023	2024	2023	2024
4–6.05	1–3.05	17	7	81	95	—	—
9–11.05	5–8.05	14	10	81	89	—	–6
15–17.05	10–12.05	10	11	81	87	—	–8
20–22.05	15–17.05	8	10	81	87	—	–8
1.06	20.05	8	11	80	83	–1	–12

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень.

У 2024 році за пізніх строків сівби, незалежно від тривалості періоду “сівби – сходи”, дозрівання рослин квасолі настало на 12 діб раніше. Також слід зазначити, що взаємозв'язок між періодом вегетації та тривалістю дня не був розглянутий у наших дослідженнях. Проте освітленість зменшувалася з ранніх до пізніших строків сівби.

ВИСНОВКИ

Результатами наших досліджень встановлено, що мінімальна температура ґрунту для проростання насіння квасолі звичайної становить 7°C, із сумою біологічно активних

температур, що за нормальної вологості ґрунту не змінюється і становить 103–107°C.

Фенологічна фаза “сходи – цвітіння” в середньому за роки дослідження триває від 34 до 48 діб. За пізніх строків сівби цей період скорочується на 3–7 діб. Підвищення середньодобової температури на 1°C сприяє скороченню фази цвітіння на 7–10 діб. Сума температур повітря зменшується на 100°C, тоді як сума біологічно активних температур вище 10°C була незмінною і становила майже 300°C. Фаза “сходи – дозрівання насіння” для ранніх строків сівби триває 81–95 діб, для пізніх — 80–87 діб.

ЛІТЕРАТУРА

- Мазур О. В., Колісник О. М., Телекало Н. В. Генотипні відмінності сортозразків квасолі звичайної за технологічністю. *Сільське господарство та лісівництво*. 2017. № 7. Т. 2. С. 33–39.
- Овчарук О. В., Овчарук В. І., Ткач О. В., Кравченко В. С. Вплив строків сівби і крупності насіння на цвітіння та плодоутворення квасолі звичайної. *Збірник наукових праць УНУС*. 2022. Вип. 101. Ч. 1. С. 115–121. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-8240-2022-101-1-115-121>
- Корнійчук О. В., Юрчук С. С. Вплив погодно-кліматичних параметрів на урожайність насіння ріпаку озимого. *Корми і кормовиробництво*. 2023. № 95. С. 74–87. DOI: <https://doi.org/10.31073/kormovyrobnytstvo202395-06>
- Бабенко Л. М., Мартин Г. І., Мусатенко Л. І., Харченко О. В., Казачков М. Г. Структурно-функціональні особливості проростання насіння квасолі. *Фізіологія і біохімія культур. рослин*. 2003. № 2. С. 138–143.
- Didur I., Chynchuk O., Pansyryeva H., Olifirovych S., Olifirovych V., Tkachuk O. Effect of fertilizers for *Phaseolus vulgaris* L. productivity in Western Forest-Steppe of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. No. 11 (1). P. 419–424.
- Оліфірович С. Й., Оліфірович В. О. Урожайність вітчизняних сортів квасолі звичайної (зернової) в умовах південної частини Лісостепу Західного. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2020. Вип. 68 (1). С. 162–175. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2020-\(68\)-1-12](https://doi.org/10.32636/01308521.2020-(68)-1-12)
- Безугла О. М., Кобизева Л. Н. Генетичні ресурси рослин у вирішенні проблем селекції квасолі в Україні. *Зб. наук. пр. Селекційно-генетичного інституту*. 2015. Вип. 26. С. 74–83.
- Голодна А. В., Акуленко В. В., Столяр О. О. Формування продуктивності квасолі звичайної залежно від елементів технології вирощування в північній частині Лісостепу. *Збірник наукових праць ННЦ “Інститут землеробства НААН”*. 2013. Вип. 1–2. С. 120–124.
- Кириченко В. В., Кобизева Л. Н., Петренкова В. П. та ін. Ідентифікація ознак зерно-бобових культур (квасоля, нут, сочевиця) / за ред. В. В. Кириченка. Харків, 2009. С. 87–115.
- Овчарук О. В., Овчарук В. І., Ткач О. В., Рудь А. В. Показники схожості насіння при проростанні квасолі, звичайної залежно від різних погодно-кліматичних умов. *Таврійський науковий вісник*. 2023. Вип. 131. С. 168–174. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.131.21>

11. Кіндрук М., Слюсаренко О., Гечу В. та ін. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 173 с. (Національний стандарт України).
12. BEANS: One of the First Cultivated Crops. Foodreference.com. URL: <http://www.foodreference.com/html/artbeans.html> (дата звернення: 05.04.2025).
13. Овчарук О. В., Рахметов Д. Б., Єременко О. А., Федорчук М. І. Вплив абіотичних і біотичних факторів на сільськогосподарські рослини. *Тенденції та виклики сучасної аграрної науки: теорія і практика*: збірник наук. праць Міжн. наук.-практ. конф. (м. Київ, 20–22 жовтня 2021 р.) Київ: НУБІП України. С. 215–217.
14. Овчарук О. В., Овчарук В. І., Хоміна В. Я. та ін. Методи аналізу в агрономії та агроєкології: навчальний посібник. Кам'янець-Подільський, Харків: Мачулін, 2019. 364 с.

INFLUENCE OF SOIL TEMPERATURE ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF BEAN PLANTS AT DIFFERENT SOWING DATES IN THE CONDITIONS OF THE RIGHT-BANK FOREST-STEPPE OF UKRAINE

Ovcharuk O.

Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor

Higher educational institution "Podillia State University" (Kamianets-Podilskyi, Ukraine)

e-mail: ovcharuk.oleh@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1117-962X>

Babii Ya.

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

Higher educational institution "Podillia State University" (Kamianets-Podilskyi, Ukraine)

e-mail: agroslava2017@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2115-0916>

Ovcharuk V.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Higher educational institution "Podillia State University" (Kamianets-Podilskyi, Ukraine)

e-mail: plspg@pdatu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3298-9685>

Avetisian G.

Postgraduate student

Higher educational institution "Podillia State University" (Kamianets-Podilskyi, Ukraine)

e-mail: Gor.avetisian17@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5112-7240>

Tkach O.

Doctor of Agricultural Sciences, Professor

Higher educational institution "Podillia State University" (Kamianets-Podilskyi, Ukraine)

e-mail: oleg.vtkach@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1368-673X>

Kichigina O.

Senior Research Scientist, Senior Researcher

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS (Kyiv, Ukraine)

e-mail: seednlen@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0879-627X>

Soil and air temperature enable the bean root system to absorb nutrients, increase the intensity of photosynthesis and plant respiration, transpiration and other physiological processes. The temperature at which plants grow and develop most intensively is optimal, and deviation from it slows down growth and development. The optimal temperature promotes the active process of photosynthesis, while assimilation prevails over dissimilation, as a result of which dry matter accumulates in plants. Temperature fluctuations negatively affect the growth and development of bean plants and often lead to their defeat by diseases. As the temperature increases, the processes of assimilation and synthesis of organic substances intensify, while the intensity of respiration increases. It should be noted that bean plants of early sowing dates will always be better developed than those sown later, and will have higher productivity. This can be explained by the fact that at early sowing dates (at lower temperatures), although plant shoots appear somewhat later, their root system develops better compared to plants sown later. Such shoots respond more easily to short-term droughts, and plants form a greater yield. At later sowing dates (when the soil temperature is higher), shoots appear faster, and accordingly the root system develops more intensively and the vegetative mass increases. This leads to a disruption of the balance between the root system and the leaf apparatus in providing bean plants with moisture, as a result of which in hot, sunny weather the leaves wither, stress is observed and plant productivity decreases. The effect of temperature on the growth and development of bean plants also depends on their physiological state and the action of other factors. With an increase in the intensity of sunlight with a sufficient content of moisture and nutrients in the soil, the intensity of photosynthetic activity of plants and other physiological processes of plants increases.

Keywords: variety, plant development periods, duration of phase and growing season, agroecology.

REFERENCES

1. Mazur, O. V., Kolisnyk, O. M., & Telekalo, N. V. (2017). Genotypic differences of common bean varieties in terms of technologization. *Agriculture and Forestry*, 7(2), 33–39.
2. Ovcharuk, O. V., Ovcharuk, V. I., Tkach, O. V., & Kravchenko, V. S. (2022). The influence of sowing dates and seed size on flowering and fruiting of common bean. *Collection of scientific works of UNUH*, 101(1), 115–121. doi: 10.32782/2415-8240-2022-101-1-115-121
3. Korniiichuk, O. V., & Yurchuk, S. S. (2023). The influence of weather and climatic parameters on the yield of winter rapeseed. *Feeds and Feed Production*, 95, 74–87. doi: 10.31073/kormovyrobnytstvo202395-06
4. Babenko, L. M., Martyn, H. I., Musatenko, L. I., Kharchenko, O. V., & Kazachkov, M. H. (2003). Structural-functional features of bean seed germination. *Physiology and Biochemistry of Plants*, 2, 138–143.
5. Didur, I., Chynchyk, O., Pantsyryeva, H., Olifirovych, S., Olifirovych, V., & Tkachuk, O. (2021). Effect of fertilizers on *Phaseolus vulgaris* L. productivity in the Western Forest-Steppe of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*, 11(1), 419–424.
6. Olifirovych, S. Y., & Olifirovych, V. O. (2020). Yield of domestic varieties of common beans (grain) in the conditions of the southern part of the Western Forest-Steppe. *Foothill and Mountain Agriculture and Animal Stockbreeding*, 68(1), 162–175. doi: 10.32636/01308521.2020-(68)-1-12
7. Bezuhla, O. M. & Kobzyieva, L. N. (2015). Plant genetic resources in solving problems of bean breeding in Ukraine. *Collection of scientific works of the Breeding and Genetic Institute*, 26, 74–83.
8. Holodna, A. V., Akulenko, V. V., & Stoliar, O. O. (2013). Formation of common bean productivity depending on the elements of cultivation technology in the northern part of the Forest-Steppe. *Collection of Scientific Papers of the National Scientific Center "Institute of Agriculture of the NAAS"*, 1–2, 120–124.
9. Kyrychenko, V. V. (Ed.), Kobzyieva, L. N., Petrenkova, V. P. et al. (2009). *Identification of traits of leguminous crops (bean, chickpea, lentil)* (pp. 87–115). Kharkiv.
10. Ovcharuk, O. V., Ovcharuk, V. I., Tkach, O. V. & Rud, A. V. (2023). Seed germination indicators during the germination of common beans depending on different weather and climatic conditions. *Taurida Scientific Herald*, 131, 168–174. doi: 10.32782/2226-0099.2023.131.21
11. Kindruk, M., Sliusarenko, O., Hechu, V., Malasai, V., Havryliuk, M., Myshynska, O. ... Rubel, V. (2003). *Seeds of agricultural crops. Methods of quality determination* (DSTU 4138-2002). Kyiv: State Consumer Standards of Ukraine. (National standard of Ukraine).
12. Foodreference.com. (n.d.). *BEANS: One of the First Cultivated Crops*. Retrieved from <http://www.foodreference.com/html/artbeans.html>
13. Ovcharuk, O. V., Rakhmetov, D. B., Yeremenko, O. A., & Fedorchuk, M. I. (2021). Influence of abiotic and biotic factors on agricultural plants. In *Trends and challenges of modern agricultural science: Theory and practice: Proceedings of the international scientific and practical conference* (pp. 215–217). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.
14. Ovcharuk, O. V., Ovcharuk, V. I., Khomina, V. Ya., Mostipan, M. I., & Kulyk, H. A. (2019). *Methods of analysis in agronomy and agroecology: a textbook*. Kamianets-Podilskyi, Kharkiv: Machulyn.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ОВЧАРУК Олег Васильович — доктор сільськогосподарських наук, доцент, ЗВО “Подільський державний університет” (вул. Шевченка, 12, м. Кам’янець-Подільський, Україна, 32300; e-mail: ovcharuk.oleh@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1117-962X>).

БАБІЙ Ярослава Василівна — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, ЗВО “Подільський державний університет” (вул. Шевченка, 12, м. Кам’янець-Подільський, Україна, 32300; e-mail: agroslava2017@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3298-9685>).

ОВЧАРУК Василь Іванович — доктор сільськогосподарських наук, професор, ЗВО “Подільський державний університет” (вул. Шевченка, 12, м. Кам’янець-Подільський, Україна, 32300; e-mail: plsrg@pdatu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2115-0916>).

АВЕТІСЯН Гор Артушович — аспірант, ЗВО “Подільський державний університет” (вул. Шевченка, 12, м. Кам’янець-Подільський, Україна, 32300; e-mail: Gor.avetisian17@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-5112-7240>).

ТКАЧ Олег Васильович — доктор сільськогосподарських наук, професор, ЗВО “Подільський державний університет” (вул. Шевченка, 12, м. Кам’янець-Подільський, Україна, 32300; e-mail: oleg.v.tkach@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1368-673X>).

КІЧІГІНА Ольга Олександрівна — кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, завідувач Незалежної лабораторії екології насінництва, Інститут агроєкології і природокористування НААН (вул. Метрологічна, 12, м. Київ, Україна, 03143; e-mail: seednlen@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0879-627X>).

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

ВИМОГИ ДО ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Під час подання рукопису до журналу автори повинні підтвердити його відповідність всім встановленим вимогам, вказаним нижче. В разі виявлення невідповідності поданої роботи пунктам цих вимог редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання. Це подання раніше не було опубліковане і не надсиалося до розгляду редакціям інших журналів (або у коментарях для редактора нижче дані необхідні пояснення). Файл подання є документом у форматі Microsoft Word, OpenOffice, RTF. Інтернет-посилання у тексті супроводжуються повними коректними адресами URL. Текст набраний 14-м розміром кеглю з одинарним міжрядковим інтервалом; авторські акценти виділені курсивом, а не підкресленням (всюди, крім адрес URL); всі ілюстрації, графіки та таблиці розміщені безпосередньо у тексті, там, де вони повинні бути за змістом (а не у кінці документу). Текст відповідає вимогам до стилістики та бібліографії, викладеним у Керівництві для авторів розділу "Про журнал".

Якщо матеріал подається у рецензований розділ журналу, при оформленні файлу подання були виконані інструкції щодо Гарантій сліпого рецензування.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Представлені для публікації статті мають бути оригінальними (раніше не опублікованими в інших виданнях), в яких висвітлено результати наукових досліджень зі статистичною обробкою даних, що мають теоретичне та/чи практичне значення, а також є актуальними, відповідати профілю журналу та мати новизну. Статті оглядового характеру приймають за авторства провідних українських та зарубіжних учених, визнаних фахівців у своїй галузі, як правило докторів наук.

Статті подають українською або англійською мовою.

До розгляду приймаються наукові статті обсягом від 10 до 20 сторінок, включаючи анотації, таблиці, рисунки та бібліографічні списки. Якщо стаття містить вагомий науковий результат, за рішенням редакційної колегії її обсяг може бути збільшено. Формат паперу — A4, орієнтація — книжкова, поля з усіх сторін — 20 мм, міжрядковий інтервал — 1,5, кегль шрифту — 14, гарнітура — Times New Roman, абзац — 1,25 см (не допускається створення абзацного відступу за допомогою клавіші Tab і

знаків пропуску); текст вирівнюється по ширині. Обов'язковим є використання в тексті тире, а не дефіса між цифрами на означення кількісних меж від ... до ... (напр., 3–5 га) або часового інтервалу (напр., 2010–2015 рр.).

Структура статті:

- Тематична рубрика (напр., "Економіка", "Екологія", "Агрономія", "Лісове господарство").
- Індекс УДК (вирівнювання відповідно до лівого краю).
- Назва статті українською мовою (вирівнювання по центру, напівжирний шрифт, великі літери).
- Ініціали та прізвище авторів (вирівнювання по центру, напівжирний шрифт), науковий ступінь і вчене звання, місце роботи/навчання (із вказанням країни, міста), адреса електронної пошти для кожного співавтора, код ORCID ID автора (вирівнювання по центру, курсив).
- Анотація (українська мова, обсяг 200–250 слів (1800–2000 знаків з пробілами), курсив) Анотація повинна бути інформативною і змістовною. Має відображати вихідні дані, методологію та результати проведення досліджень, висновки та сферу застосування результатів. Будь ласка, не використовуйте невизначені скорочення або не вказані посилання.
- Ключові слова (5–10 слів), жодне з яких не дублює слова з назви статті.
- Текст статті із урахуванням необхідних елементів (наведені нижче).
- Література.
- References.
- Анотація (не менше 2000 знаків) та ключові слова англійською мовою.
- Відомості про авторів (розширені) українською мовою.

Текст статті з відображенням у ній обов'язкових елементів згідно з вимогами МОН України має таку послідовність:

ВСТУП (постановка проблеми). Повинен містити актуальність наукової проблеми, наводяться відомі в світовій літературі факти із зазначенням ще невирішених аспектів питання. Завершується вступ характеристикою мети роботи — "виявити...", "охарактеризувати...", "з'ясувати...", "описати...".

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ, повинен розкрити стан досліджень проблеми у вітчизняній і світовій науковій літературі, включаючи посилання на статті у провідних вітчизняних і міжнародних фахових журналах (не менше 10) за останні 5 років.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Наводиться детальне викладення методів і методик з посиланням на першоджерело (схеми дослідів, повторність, методи лабораторного аналізу, методи статистичної обробки).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ. Викладення результатів має зводитись не до переказу змісту таблиць і рисунків, а до визначення обґрунтованих закономірностей. В обговоренні результатів слід висвітлити причинно-наслідкові зв'язки між одержаними ефектами, порівняти одержані дані.

ВИСНОВКИ з проведеного дослідження (підсумки дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі; висновки мають відповідати меті).

ЛІТЕРАТУРА. У статті має бути наведено не менше ніж 10–15 джерел (оформлення відповідно до ДСТУ 8302:2015). Посилання на використані в тексті джерела робляться за зразком: [2], декілька джерел відділяються крапкою з комою [1; 4–6].

REFERENCES. Бібліографічний опис у романській абетці, який здійснюється відповідно до стандарту APA (American Psychological Association).

Оглядова стаття може мати будь-яку кількість розділів із будь-якими назвами. Висновок обов'язковий.

Таблиці (Excel або Word, кегль 12) розміщуються у тексті відразу після його першого подання. Вони повинні бути згадані і пронумеровані послідовно (напр., табл. 1). Назви таблиць (напівжирний шрифт, кегль 14, вирівнювання по центру), що надають інформаційний заголовок розташовані у верхній їх частині, а порядковий номер зліва перед назвою. Кожен стовець повинен мати коротку назву. Таблиці будуть відтворені у журналі, як представлено в остаточному поданні. Подробиці статистики та опису слід розміщувати під таблицею в якості виноски. Використовуйте зірочки для значень значущості та інших статистичних даних.

Рисунок повинен бути єдиним графічним об'єктом і згрупованим; мати номер і назву, що вказується поза об'єктом (кегль шрифту — 14, напівжирний, міжрядковий інтервал — 1, розміщення по ширині).

Розташування рисунку має бути в тексті. Рисунки повинні бути згруповані та виконані в чорно-білому форматі (лише книжний). Букви і символи повинні бути пояснені у підписі, і тільки у виняткових випадках — на малюнку. Підписи рисунків повинні бути доступні для редагування. Якість ілюстрацій повинна забезпечувати їхнє чітке відтворення. Графічні матеріали не повинні бути сканованими.

На всі рисунки й таблиці давати посилання в тексті. Усі рисунки мають супроводжуватися підписаними підписами, а таблиці повинні мати заголовки.

Не можна посилатися на національні стандарти, технічні умови, підручники, навчальні посібники та іншу ненаукову літературу. Посилання на патенти доцільно робити у тексті статті, вказавши лише номер та назву патенту, не зазначаючи у списку джерел.

Формули (зі стандартною технічною нумерацією) мають бути виконані в редакторі Microsoft Equation. Всі формули повинні бути вказані у тексті і пронумеровані послідовно: наприклад, (1). Цифри та підписи формул повинні бути хорошої якості, а також доступні для редагування.

Після списку використаних джерел надається відомість про автора (-ів) українською мовою: прізвище, ім'я, по батькові повністю; науковий ступень, вчене звання кожного автора; повна назва організації — місця роботи/навчання, із наведенням повної поштової адреси; адреса електронної пошти та телефон для кожного автора (зазначити для контактування); ORCID (за наявності) для кожного автора.

У наступному блоці інформація англійською мовою — відомість про автора, назва статті, анотація (більш розширена), ключові слова. Анотація має відображати вихідні дані, предмет, мету дослідження, метод або методологію проведення роботи, результати роботи, висновки та сферу застосування результатів. Переклад матеріалів, що подаються англійською мовою, повинен бути виконаний або відредагований професійним перекладачем. Комп'ютерний переклад не допускається. Якщо текст статті англійською мовою виконано не професійно, потребує значного обсягу редагування, він може бути повернений автору на доопрацювання або відхилений від публікації.

Згідно зі стандартами міжнародних систем цитування, автори статей також мають подавати список використаних джерел (References) відповідно до вимог APA (American Psychological Association). У випадку, якщо стаття підготовлена українською мовою, реферат українською мовою розміщується на початку статті, а далі наводиться її англійський варіант. У разі підготовки статті англійською мовою, послідовність розміщення рефератів — протилежна.

Всі автори мають підписати статтю на останній сторінці.

Рукопис необхідно надіслати у вигляді одного файлу у форматі Microsoft Word на адресу:

nature_us@ukr.net.

Телефон редакції: (044) 522-33-36.

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ АГРОЕКОЛОГІЇ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

