

# Інтегральне геопросторове оцінювання геодинамічної небезпеки вздовж магістральних трубопроводів на території Українських Карпат

О.В. Титаренко<sup>1</sup>, А.А. Андреєв<sup>1</sup>, Л.М. Артюшин<sup>2</sup>, А.Д. Бондаренко<sup>1</sup>, 2026

<sup>1</sup>Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ, Україна

<sup>2</sup>Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ, Україна

Надійшла 2 березня 2026 р.

Розглянуто проблему оцінювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування магістральних трубопроводів у межах Українських Карпат — регіону з високою геодинамічною активністю та значним поширенням зсувних явищ. Актуальність роботи зумовлена зростанням частоти та інтенсивності екзогенних процесів у гірських районах, впливом кліматичних змін та необхідністю підвищення надійності та безпеки об'єктів критичної інфраструктури. Метою дослідження є виявлення ділянок підвищеної геодинамічної небезпеки вздовж магістральних трубопроводів у межах Українських Карпат шляхом інтегрального оцінювання багатofакторних даних дистанційного зондування Землі.

Запропонований методичний підхід ґрунтується на інтеграції морфометричних, кліматичних та інфраструктурних компонентів з використанням даних дистанційного зондування Землі і методів ГІС-аналізу. На основі цифрової моделі рельєфу SRTM розраховано набір топографічних індексів, що характеризують потенційну схильність території до розвитку зсувних і ерозійних процесів. Зазначені індекси відображають крутизну схилів, акумуляцію стоку, енергію поверхневого стоку та розчленованість рельєфу як ключові чинники нестійкості схилів у гірських умовах. Додатково враховано температуру земної поверхні (LST за даними Landsat) і середньорічні показники атмосферних опадів як кліматичні чинники впливу на процеси зволоження ґрунтів і розвиток схилових процесів.

Усі чинники інтегровано в єдиному геоінформаційному середовищі з формуванням узагальненої карти просторового розподілу потенційної геодинамічної небезпеки вздовж магістральних трубопроводів. Отримана карта є растровим індексом небезпеки, що відображає сумарний вплив природних і антропогенних чинників. Результати дослідження дають змогу виділити зони підвищеного ризику та найбільш уразливі ділянки трубопроводів і можуть бути використані для вдосконалення систем моніторингу, технічного обслуговування та планування превентивних заходів у гірських регіонах, зокрема в межах Українських Карпат.

Для оцінювання достовірності одержаної карти виконано порівняння отриманих рівнів небезпеки з просторовим розподілом зсувів у межах території дослідження. Виявлено чітку просторову відповідність між зонами високої небезпеки та зафіксованими проявами зсувів, що підтверджує адекватність і практичну доцільність запропонованого геопросторового підходу.

**Ключові слова:** геодинамічна небезпека, магістральні трубопроводи, геоінформаційний аналіз, оцінка ризику, геопросторове зонування.

Citation: Titarenko, O.V., Andreiev, A.A., Artiushyn, L.M., & Bondarenko, A.D. (2026). Integrated geospatial assessment of geodynamic hazard along the pipelines in the Ukrainian Carpathians. *Geofizychnyi Zhurnal*, 48(2), 3—20. <https://doi.org/10.24028/gj.v48i2.353442>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

**Вступ.** Газотранспортна система (ГТС) України — одна з найбільших у світі — виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу територією України в країни Західної та Центральної Європи. ГТС України складається з 38,55 тис. км газопроводів з компресорними станціями, 13 підземних сховищ газу, мережі газорозподільних і газовимірювальних станцій. Магістральні трубопроводи (МТ) є найбільш капіталомісткими елементами газового комплексу держави (рис. 1).

У зв'язку зі старінням газотранспортної мережі в останні роки спостерігається збільшення кількості аварій на газопроводах України (розрив труб через просідання ґрунту; утворення корозійних тріщин; деформація трубопроводів, спричинена зсувами і повеннями; електрохімічна корозія на ділянках підтоплення та ін.). За даними досліджень стану ГТС України [Мандрик, 2015], середній амортизаційний знос газотранспортної системи України

становить 61 %; майже 20 тис. км магістральних газопроводів (з 33,25 тис. км) експлуатується понад 33 роки. Внаслідок корозії металу труби (газопроводу) збільшується кількість аварій на магістральних газопроводах: з 27 у 2013 р. до 34 у 2016 р. Найбільше аварій за останні роки сталося на магістральному газопроводі «Уренгой—Помари—Ужгород»: 11.04.2003 р. на 3736 км ділянці КЗ Дніпро—КС Ставище—КС Іллінці, 07.05.2007 р. на 3737 км ділянці КЗ Дніпро—КС Ставище—КС Іллінці і 06.12.2007 р. на 3854,3 км ділянці КС Іллінці—КС Бар.

У цьому контексті атмосферні процеси і явища (перепади температур, інтенсивні опади, вітрові навантаження) можуть розглядатися як додаткові чинники виникнення небезпеки для ГТС. Особливої актуальності проблема набуває в межах гірських територій, де екзогенні та ендогенні геологічні процеси зумовлюють формування підвищеної геодинамічної небезпеки. До таких процесів належать зсуви, селеві потоки, ерозія, підтоплення,

### ГАЗОТРАНСПОРТНА СИСТЕМА УКРАЇНИ

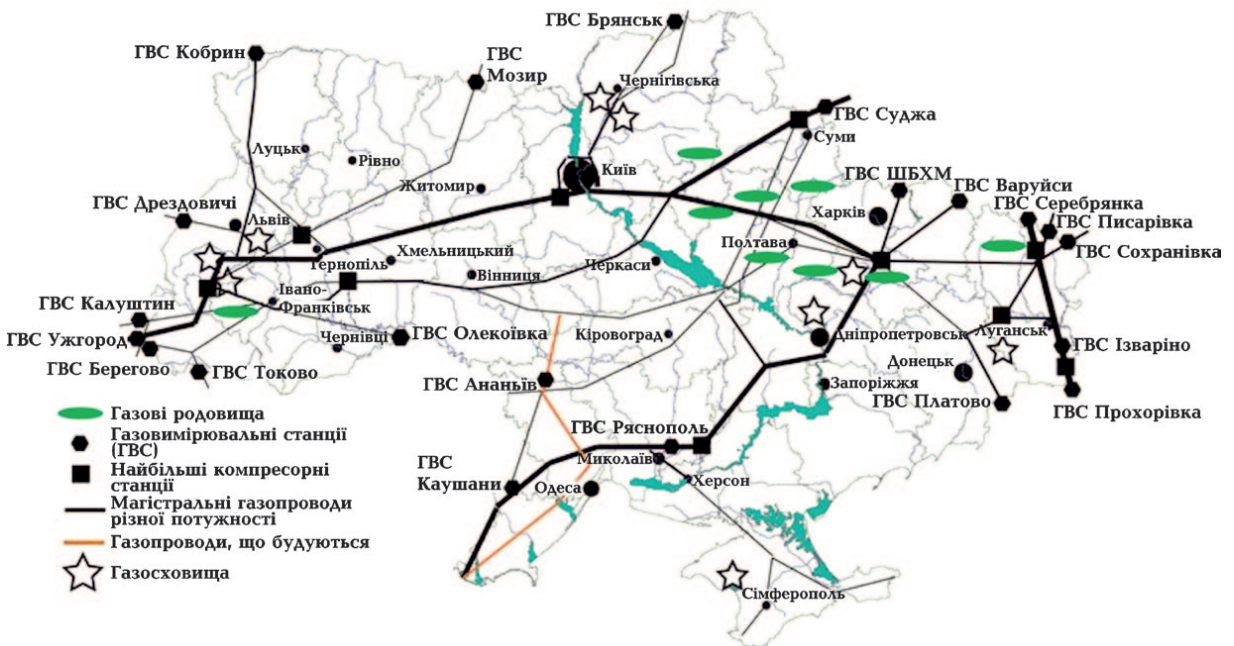


Рис. 1. Розташування магістральних трубопроводів на території України [Білецький, Фик, 2019].

Fig. 1. Location of the trunk pipelines within the territory of Ukraine [Biletskyi, Fyk, 2019].

тектонічні порушення, землетруси та інші прояви сучасної геодинаміки, які можуть призводити до деформацій трубопроводів та подальших аварійних ситуацій. Узагальнену схему впливу природних чинників на формування дефектів трубопроводів наведено на рис. 2.

Оскільки зсувні процеси поширені на території України, особливо в Карпатському регіоні, значна кількість наукових публікацій присвячена дослідженню їх утворення, поширення та факторів активізації [Шевчук та ін., 2012; Касіяничук, 2014; Shekhunova et al., 2020; Штогрин та ін., 2021; Titarenko et al., 2025]. У цих роботах детально розглянуто геологічні, геоморфологічні та тектонічні умови формування зсувів, а також вплив ерозійних процесів.

В інших дослідженнях особливу увагу приділено ролі річкової ерозії та тектонічних чинників у формуванні зсувів та інших небезпечних процесів в Українських Карпатах [Ivanik et al., 2019; Snitynskyi et al., 2020]. Подібні підходи застосовуються і в міжнародних дослідженнях, де аналізуються фактори інтенсифікації неглибоких зсувів з урахуванням регіональних геологічних, геоморфологічних та кліматичних умов, зокрема на прикладі Швейцарії [Zweifel et al., 2021].

Для проведення аналізу та отримання геопросторового оцінювання геодинамічної небезпеки широко використовуються цифрові моделі рельєфу та похідні від них — геоморфологічні показники, наприклад топографічні індекси. Основним джерелом таких даних є матеріали дистанційного зондування Землі, зокрема дані місії SRTM [Farr et al., 2007], які дають змогу формувати цифрові моделі рельєфу з достатньою просторовою розрізненістю (30 м) для регіональних і детальних досліджень. До похідних показників належать топографічний індекс вологості (Topographic Wetness Index, TWI), фактор довжини та крутизни схилу (Length—Slopefactor, LS), індекс потужності потоку (Stream Power Index, SPI) та інші параметри, які використовуються для оцінювання зволоження, ерозійної активності та потенційної нестійкості схилів [Tustanovska et al., 2025].

Крім перелічених природних чинників, важливо враховувати також вплив інфраструктурних чинників. Зокрема, мережі автомобільних доріг, ліній електропередач та залізничних колій можуть суттєво позначатися на стані трубопроводів. Ці види інфраструктури часто перетинаються, тому важливо враховувати взаємний вплив, щоб запобігти аваріям та забез-



Рис. 2. Узагальнена схема впливу природних чинників на формування дефектів трубопроводів.

Fig. 2. Generalized scheme of the influence of natural factors on the formation of pipeline defects.

печити надійність всіх систем. Основний вплив інфраструктурних чинників на трубопроводи пов'язаний з вібрацією та динамічними навантаженнями. Наприклад, коли потяг або вантажна машина рухається, він створює вібрацію, яка передається через ґрунт і може впливати на розташовані поруч або під коліями трубопроводи. Відомо, що характер поширення таких коливань залежить, зокрема, від швидкості руху потяга, його довжини та властивостей ґрунтів [Motazedian et al., 2012]. Ці вібрації можуть призвести до втомних руйнувань металу трубопроводу, появи мікротріщин, які з часом розширюються, спричинюючи витоки або повне руйнування труби. Також вони розхитують зварні шви або фланцеві з'єднання, порушуючи георметичність. Це може спричинити зміщення ґрунту навколо трубопроводу, порушення її цілісності та, як наслідок, аварію.

Проведений аналіз наукових робіт з цієї тематики показав, що більшість досліджень зосереджено на аналізі окремих чинників, які впливають на розвиток процесів, пов'язаних з геодинамічною небезпекою. Водночас у реальних умовах ці чинники діють одночасно та взаємопов'язані між собою. Тому оцінювання геодинамічної небезпеки потребує інтегрального підходу, який передбачає поєднання кількох показників у межах єдиної моделі. Таким чином, метою цієї роботи є виявлення ділянок підвищеної геодинамічної небезпеки вздовж МТ на території Українських Карпат шляхом інтегральної оцінки багатofакторних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

**Методичні засади комплексного аналізу геодинамічних загроз для магістральних трубопроводів.** Комплексний аналіз стану геологічного середовища та кількісної оцінки впливу небезпечних геологічних процесів і навколишнього середовища на функціонування трубопровідно-транспортних природно-техногенних систем (ПТС) різних ландшафтно-кліматичних і структурно-тектонічних зон базується на загальноприйнятих методичних прин-

ципах моделювання, викладених у статті [Шевчук та ін., 2012] (рис. 3).

Зазначений підхід передбачає створення та чисельний аналіз взаємопов'язаних геологічних, геомеханічних і математичних моделей складних ПТС. Головним етапом моделювання є дослідження об'єктів і побудова моделі геологічного середовища та процесів на основі аналізу закономірностей їх перебігу з використанням наявної геологічної, гідрометеорологічної та геоморфологічної інформації. Такий підхід забезпечує системне врахування природних і техногенних чинників, що впливають на стан трубопровідних систем. Використання системного підходу та методів геоінформаційного картографування дає змогу об'єднати розрізнену, різномасштабну та різночасову інформацію. Складність чисельного аналізу стану геологічного середовища та впливу навколишнього середовища пов'язана з різноманіттям геологічних процесів, специфікою їх взаємодії, складним характером параметрів, визначення яких потребує обов'язкового поглибленого геологічного аналізу та використання аналітичних досліджень [Шевчук та ін., 2012].

У рамках цієї роботи зазначені принципи реалізовано із застосуванням геоінформаційного аналізу та інтеграції багатofакторних даних ДЗЗ. Інтегральне оцінювання геодинамічної небезпеки виконується шляхом поєднання природних та інфраструктурних чинників у межах єдиної моделі. Введемо загальну формулу розрахунку інтегрального індексу небезпеки для трубопроводів:

$$H_{\text{pipe}} = w_m H_{\text{morphometric}} + w_i H_{\text{infrastructure}} + w_c H_{\text{climate}}, \quad (1)$$

де  $H_{\text{morphometric}}$  — морфометричний компонент;  $H_{\text{infrastructure}}$  — інфраструктурний компонент;  $H_{\text{climate}}$  — кліматичний компонент;  $w_m$ ,  $w_i$  та  $w_c$  — вагові коефіцієнти відповідних компонентів.

Таким чином, запропонований інтегральний індекс формується у вигляді зваженої суми вказаних трьох компонентів. Вагові коефіцієнти відображають

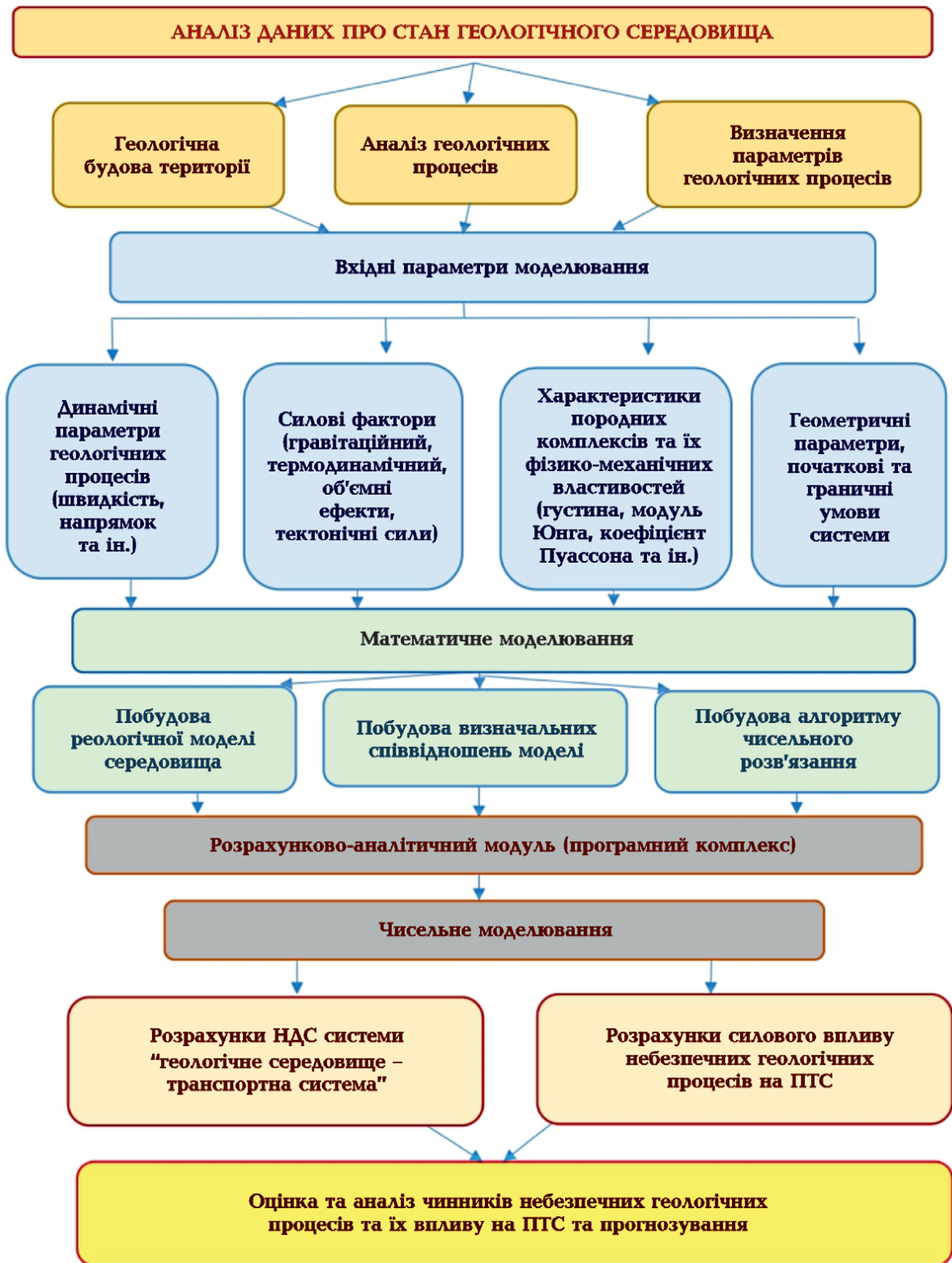


Рис. 3. Схема моделювання транспортних ПТС в умовах впливу небезпечних геологічних процесів.

Fig. 3. Conceptual scheme for modeling transport pipeline systems under the influence of hazardous geological processes.

ступінь впливу кожної групи чинників у формуванні геодинамічної небезпеки з урахуванням специфіки території дослідження. Варто зазначити, що значення вагових коефіцієнтів визначаються на основі експертної оцінки. Додамо, що сума вагових коефіцієнтів повинна дорівнювати 1, тобто справедливою є наступна рівність:  $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ .

Власне, вищеописаний інтегральний індекс є безрозмірним числовим показником, значення якого відображають рівень геодинамічної небезпеки для ділянок магістральних трубопроводів. За умови нормалізації вхідних компонентів у діапазоні від 0 до 1 інтегральний індекс також набуває значень у цьому ж діапазоні. Вищі значення індексу відповідають ділянкам з підвищеною небезпекою, тоді як нижчі значення — нижчому рівню небезпеки.

Кожен з компонентів розглянутого ін-

тегрального індексу також розраховується у вигляді зваженої суми всіх показників, що входять до складу відповідної групи. У загальному вигляді це може бути представлено наступною формулою:

$$H_k = \sum_{i=1}^n w_{ki} X_{kj}, \quad (2)$$

де  $H_k$  — значення  $k$ -го компонента (морфометричного, кліматичного або інфраструктурного),  $X_{kj}$  —  $j$ -й показник в межах  $k$ -ї групи,  $w_{kj}$  — ваговий коефіцієнт відповідного показника,  $n$  — кількість показників у групі.

Аналогічно до інтегрального індексу значення вагових коефіцієнтів для окремих показників визначаються на основі експертної оцінки. Також сума вагових коефіцієнтів для формули (2), як і для формули (1), має дорівнювати 1.

**Територія дослідження.** Ділянки магістральних газопроводів Долина—Воло-

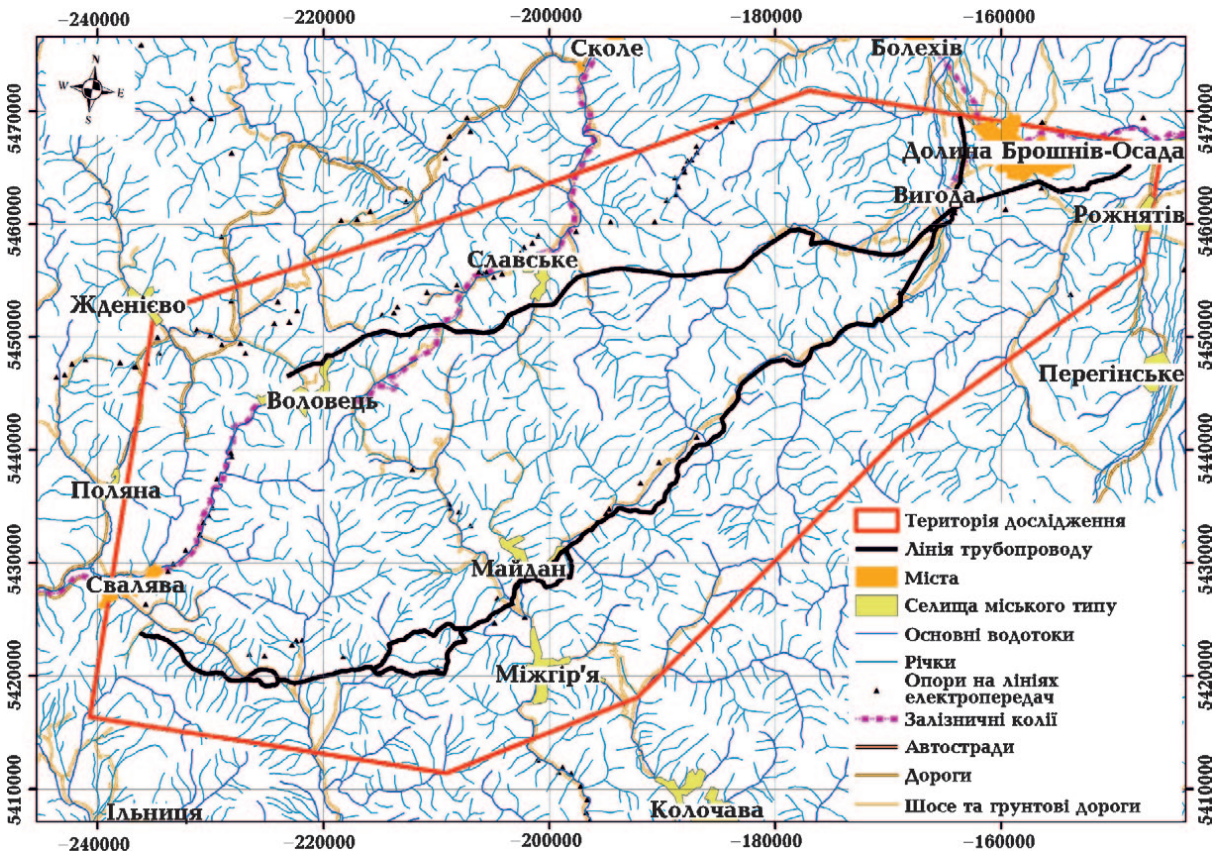


Рис. 4. Розташування ділянок Долина—Воловець та Долина—Росош магістрального трубопроводу.

Fig. 4. Location of the Dolyna—Volovets and Dolyna—Rososh sections of the trunk pipeline.

вець та Долина—Росош знаходяться на території Долинського району Івано-Франківської області, Воловецького, Міжгірського, Іршавського та Свалявського районів Закарпатської області, а також частково у Стрийському районі Львівської області (рис. 4).

Сьогодні найбільш небезпечними з погляду аварійності трубопроводів є ділянки Долина—Воловець та Долина—Росош, довжина яких становить відповідно 91,23 та 129,54 км (загальна — 220,77 км). Секція трубопроводу Долина—Росош є частиною магістрального газопроводу Долина—Західний кордон, а секція Долина—Воловець — частиною газопроводу «Прогрес».

Трубопровід має діаметр 1400 мм і три нитки. Тип прокладання МТ в основній частині траси є підземним. Глибина залягання становить приблизно 0,8—1,5 м до верху труби. Хоча основна частина газопроводу під землею, локально застосовуються інші варіанти:

- надземні ділянки (на переходах через яри, балки; у гірських районах (інколи на опорах));
- наземні/відкриті елементи (переходи через річки, іноді у футлярах або на естакадах).

Вони простягаються в межах Передкарпатського крайового прогину (Бориславсько-Покутського покриву), Складчастих Карпат, їх Скибового покриву (Берегової скиби, Орівської, Сколівської, Парашки, Зелем'янки), зони Кросно (підзона Сколівської, Турківської, Битлянської, Либхорівської), пересікають невеликі фрагменти тектонічних структур Дуклянсько-Ужоцької та Поркулецької зон.

Цей відрізок трубопроводу перетинає кілька структурно-тектонічних елементів, які беруть участь у будові Скибової зони Карпат, а також Передкарпатського прогину. Північну частину ділянки перетинає Бориславсько-Покутська зона — одна зі складових передового прогину.

Рельєф Карпатської частини регіону простягання МТ формувався у три етапи: міоценовий, пліоценовий і четвертинний.

Гідрогеологічні умови району дослі-

джень формувалися під впливом денудації й розмиву з витісненням з порід морської води. Тріщинуватість флішевих порід сприяла утворенню інфільтраційних слабомінералізованих вод. Областю живлення підземних вод була Кросненська синклінальна зона потужністю до 500 м.

Неотектонічні особливості досліджуваного регіону Складчастих Карпат характеризується інтенсивними тектонічними рухами у палеогені та неогені. Новітні тектонічні рухи визначили формування інженерно-геологічних умов Карпат, складених потужними континентальними глинисто-піщаними товщами, які перешаровуються конгломератами.

Неотектонічні ознаки відбиваються в рельєфі у вигляді стрімчастих берегів рік, виходів у руслі дочетвертинних порід і наявності ерозійних або цокольних терас. Для цього часу також характерне формування днищ сучасних долин з утворенням першої тераси, високої та низької заплави.

Клімат території характеризується як перехідний від помірно теплого західноєвропейського до континентального східноєвропейського. Територія трубопроводу згідно з агрокліматичним районуванням відноситься переважно до гірського агрокліматичного району і лише окремі ділянки північно-східної частини — до передгірського.

**Вхідні дані.** Для інтегрального оцінювання геодинамічної небезпеки вздовж МТ використано набір геопросторових даних, які можна умовно поділити на три групи:

- топографічні показники,
- кліматичні показники,
- інфраструктурні показники.

Джерелом топографічних показників є дані SRTM [Farr et al., 2007]. Вказані дані мають просторову розрізненність 30 м. Окрім стандартних геоморфологічних показників, таких як ухил поверхні, її розчленування тощо, також розраховано низку показників (індексів), які характеризують рельєф з погляду небезпечних геологічних процесів і дають змогу визначати зумовлені положенням у рельєфі характеристики. Використані топографічні показники на-

ведено в таблиці. Для розрахунку індексів використовувалось програмне забезпечення SAGA GIS 9.5.1 [Conrad et al., 2015] з відкритим вихідним програмним кодом.

Результати отриманих топографічних індексів рельєфу на території дослідження наведено на рис. 5.

До групи кліматичних показників було віднесено температуру поверхні (Land Surface Temperature, LST) і кількість атмосферних опадів. Значення температури поверхні розраховано на основі супутникових даних Landsat, а саме з використанням теплового інфрачервоного каналу, який має просторову розрізненість 100 м. Дані температури поверхні були осереднені за період з 2017 по 2021 р. Також у роботі використано дані середньої кількості атмосферних опадів на терито-

рії дослідження з 2017 по 2021 р. на основі набору даних SM2RAIN-ASCAT/CHELSA/WorldClim [Hengl, Parente, 2022], що забезпечує середньомісячні значення опадів із просторовою розрізненістю 1 км. Дані отримано через відкритий STAC-каталог Open Land Map ([https://stac.openlandmap.org/precipitation\\_sm2rain.ltm/collection.json](https://stac.openlandmap.org/precipitation_sm2rain.ltm/collection.json)). Геопросторові растрові шари температури поверхні та кількості атмосферних опадів вказано на рис. 6, а, б.

Група інфраструктурних показників охоплює мережі автомобільних доріг, залізничних колій та ліній електропередач. Ці дані отримано у вигляді векторних шарів (shapefile) для кожного із зазначених об'єктів. На основі одержаних векторних шарів сформовано растрові шари відстаней від МТ до відповідних інфраструк-

### Топографічні індекси

Індекс	Формула/Метод	Основне значення	Пов'язані небезпечні процеси	Посилання
Slope	$S = \arctan \sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}$ , де $z$ — висота у пікселі, $dz/dx$ — зміна висоти по осі $X$ , $dz/dy$ — зміна висоти по осі $Y$	Ухил схилів	Зсуви, ерозія, обвали	[Florinsky et al., 2009]
SCA (Specific Catchment Area)	$SCA = (\text{FlowAcc} + 1) \times \text{cellsize}$ FlowAcc (накопичення стоку) — показник, що визначає кількість пікселів (або площу водозбору), з яких вода стікає в дану комірку; cellsize — розмір пікселя	Площа водозбору	Зсуви, ерозія	[Gruber, Peckham, 2008]
TWI (Topographic Wetness Index)	$TWI = \ln \left( \frac{SCA}{\tan(\text{Slope})} \right)$	Показує схильність до накопичення вологи	Зсуви, заболочення, паводки	[Kopecký et al., 2020]
SPI (Stream Power Index)	$SPI = SCA \times \tan(\text{Slope})$	Індекс потужності потоку	Ерозія, селеві потоки	[Moore et al., 1991]
LS-фактор	$LS = \left( \frac{SCA}{22.13} \right)^m \left( \frac{\sin(\text{Slope})}{0.0896} \right)^n$ , емпіричні коефіцієнти $m=0,5$ , $n=1,4$	Оцінює, наскільки довжина і крутість схилу впливають на інтенсивність ерозії ґрунтів	Водна ерозія ґрунтів	[Desmet, Govers, 1996]
TRI (Terrain Ruggedness Index)	$TRI = \sqrt{\sum (z_{xy} - z_{\text{центр}})^2}$ , де $z_{xy}$ позначає кожну з восьми сусідніх пікселів відносно центрального пікселя $z_{\text{центр}}$	Розчленованість рельєфу	Обвали, зсуви, геодинамічні деформації	[Riley et al., 1999]

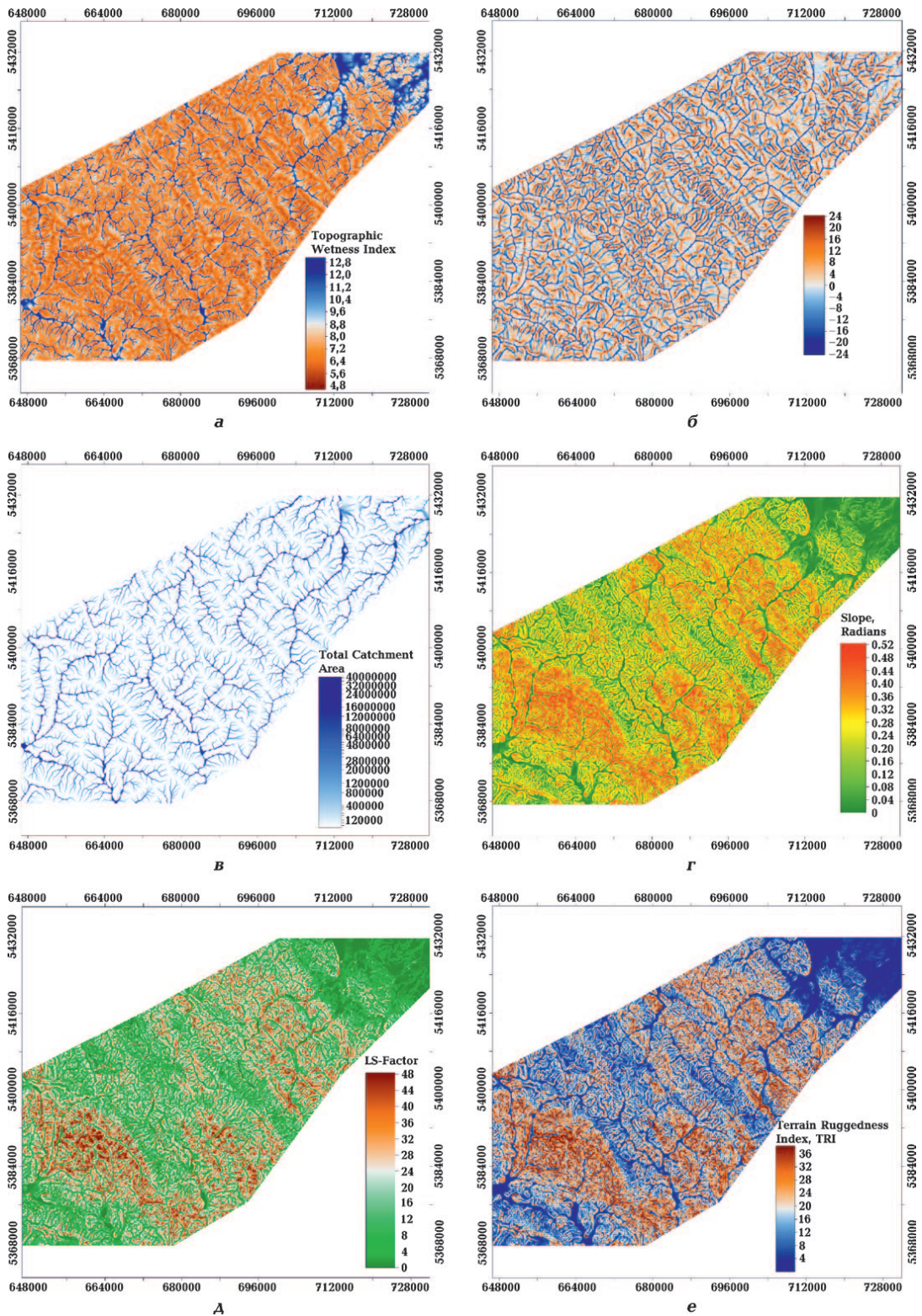


Рис. 5. Карти топографічних індексів рельєфу на території дослідження: *a* — TWI (топографічний індекс вологості); *б* — SPI (потужність потоків води); *в* — SCA (зону водозбору); *г* — Slope (ухил схилів); *А* — LS (ерозійна здатність схилу); *e* — TRI (Terrain Ruggedness Index).

Fig. 5. Maps of topographic terrain indices with in the study area: *a* — TWI (Topographic Wetness Index); *б* — SPI (Stream Power Index); *в* — SCA (Specific Catchment Area); *г* — Slope; *А* — LS (slope length and steepness factor); *e* — TRI (Terrain Ruggedness Index).

турних об'єктів шляхом використання функції Euclidean Distance модуля Spatial Analyst картографічного програмного продукту ArcGISPro. Вхідними параметрами є векторний шар лінійного об'єкта, розмір радіуса буфера — 50 м (половина розміру пікселя). Інструмент Euclidean Distance допомагає визначити мінімальну прямоліній-

ну відстань від лінійного об'єкта до пікселя вихідного растру. Результатом є растр, де кожен піксель показує відстань до відповідної інфраструктури.

Розрахунок виконано із застосуванням вбудованих інструментів у середовищі ArcGIS. Отримані геопросторові растрові шари використано для формування інф-

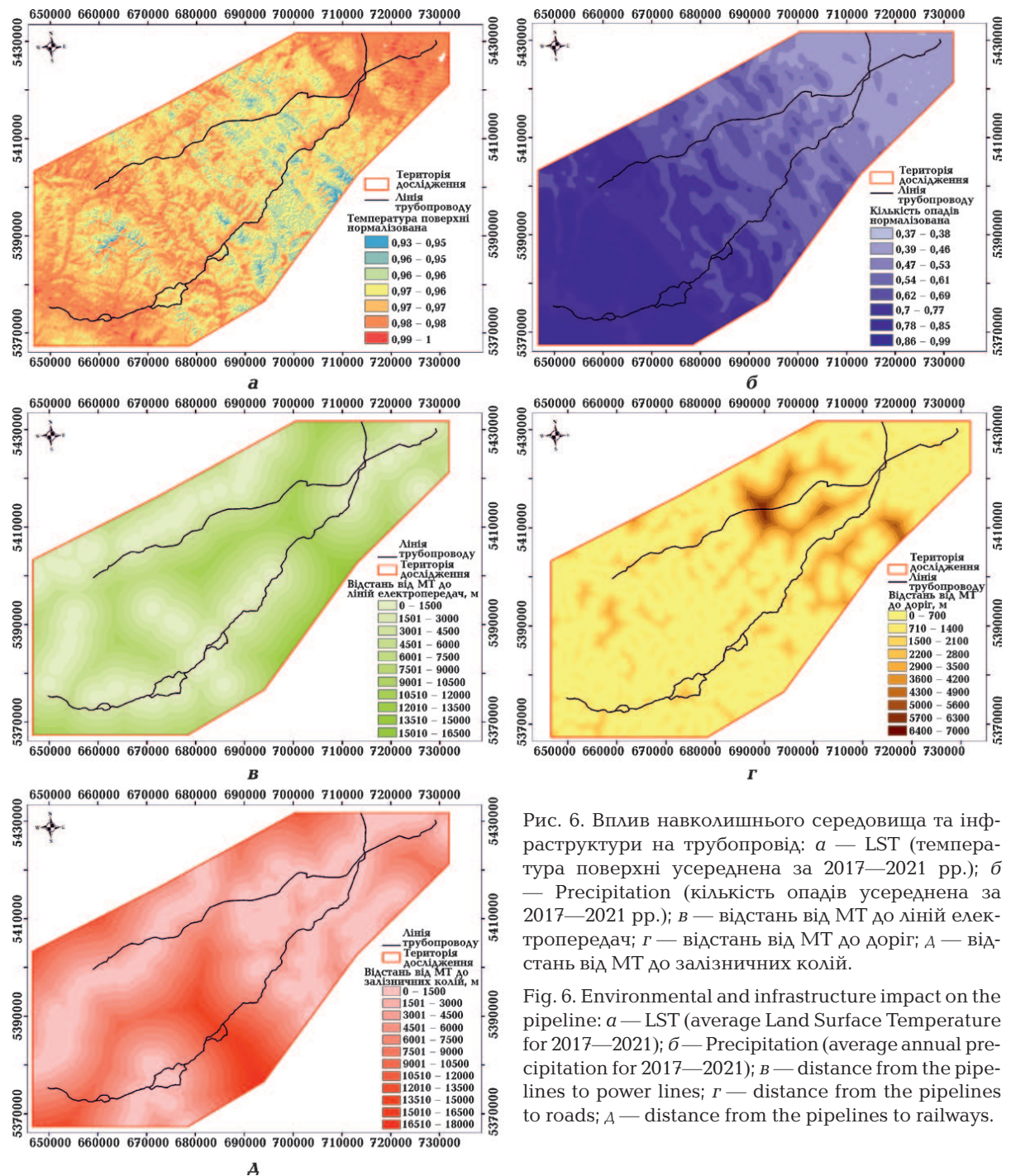


Рис. 6. Вплив навколишнього середовища та інфраструктури на трубопровід; а — LST (температура поверхні усереднена за 2017—2021 рр.); б — Precipitation (кількість опадів усереднена за 2017—2021 рр.); в — відстань від МТ до ліній електропередач; г — відстань від МТ до доріг; д — відстань від МТ до залізничних колій.

Fig. 6. Environmental and infrastructure impact on the pipeline: а — LST (average Land Surface Temperature for 2017—2021); б — Precipitation (average annual precipitation for 2017—2021); в — distance from the pipelines to power lines; г — distance from the pipelines to roads; д — distance from the pipelines to railways.

раструктурної складової інтегрального індексу небезпеки. Результати обробки наведено на рис. 6, в—д.

Усі сформовані геопросторові растрові шари (топографічні, кліматичні та інфраструктурні) було об'єднано в єдиний масив шляхом формування куба геопросторових даних [Andreiev et al., 2024]. Інтегруючи

різні типи даних в узгоджену та інтероперабельну структуру [Schramm et al., 2021], куби даних забезпечують можливість їх одночасного аналізу та інтерпретації, перетворюючи сукупність окремих шарів на цілісну інформаційну основу [Estupinan-Suarez et al., 2021]. Серед основних умов сумісності при формуванні такого куба

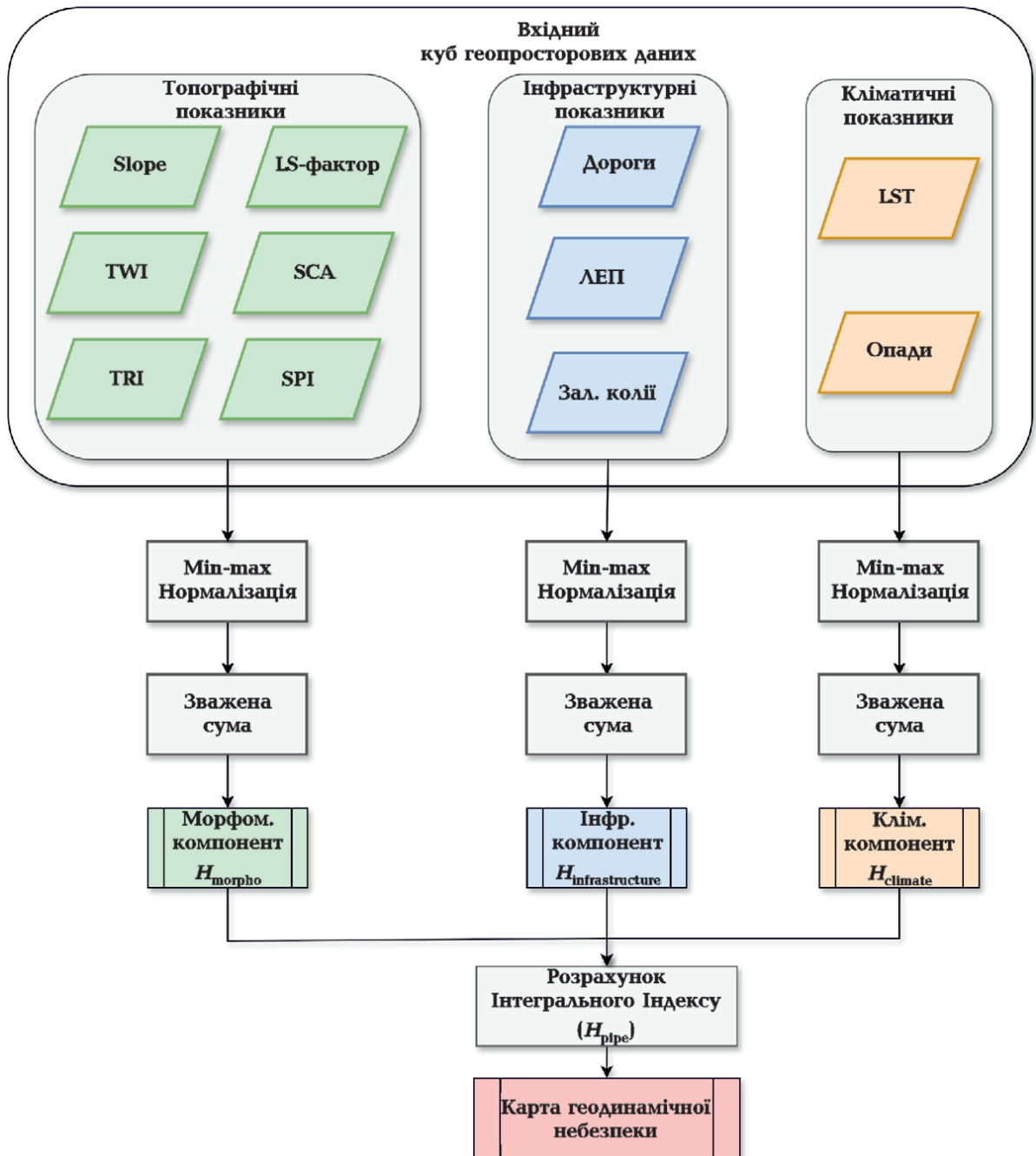


Рис. 7. Блок-схема алгоритму побудови карти геодинамічної небезпеки вздовж магістральних трубопроводів.  
 Fig. 7. Flowchart of the algorithm for constructing the geodynamic hazard map along the pipelines.

виділяють приведення растрових шарів до однакових розмірів та просторової розрізненості, а також застосування єдиної системи координат [Montero et al., 2023]. При виконанні вказаних умов растрові шари називаються просторово регуляризованими, а сама процедура приведення таких шарів до спільних властивостей називається просторовою регуляризацією. Таким чином, у межах цього дослідження всі одержані геопросторові шари під час просторової регуляризації було приведено до просторової розрізненості 100 м та єдиної системи координат WGS 1984 UTM Zone 34N.

**Експеримент.** Як вхідні дані для розрахунку карти геодинамічної небезпеки вздовж МТ було використано описаний вище геопросторовий куб даних. Побудова карти відбувалася в три етапи: 1) нормалізація кожного шару вхідного куба геопросторових даних; 2) обчислення зваженої суми показників у межах кожної групи; 3) розрахунок інтегрального індексу небезпеки. Алгоритм побудови карти геодинамічної небезпеки представлено на рис. 7.

Необхідність виконання цієї процедури зумовлена тим, що всі шари вхідного куба мають різну фізичну природу та кількісні значення. Отже, для приведення значень усіх вхідних шарів до діапазону [0; 1] попіксельно проводиться min-max нормалізація окремо кожного шару відповідно до наступної формули:

$$X_{\text{norm}} = \frac{x_i - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}$$

де  $X_i$  — початкове значення відповідного пікселя,  $X_{\text{min}}$  та  $X_{\text{max}}$  — мінімальне та максимальне значення в межах геопросторового шару, що нормалізується.

На другому етапі розраховується зважена сума кожного з нормалізованих показників окремо для кожної групи. Результатом є формування трьох компонентів: морфометричного ( $H_{\text{morphometric}}$ ), кліматичного ( $H_{\text{climate}}$ ) та інфраструктурного ( $H_{\text{infrastructure}}$ ). Розрахунок кожного компонента виконується відповідно до формули (2) із застосу-

ванням вагових коефіцієнтів, визначених експертом. Обчислення всіх компонентів здійснюється попіксельно в кожному із зазначених растрових шарів.

Отже, морфометричний компонент розраховується за наступною формулою з урахуванням вагових коефіцієнтів, визначених експертним шляхом:  $H_{\text{morphometric}} = 0,05X_{\text{TWI}} + 0,15X_{\text{SPI}} + 0,15X_{\text{SCA}} + 0,2X_{\text{Slope}} + 0,3X_{\text{LS}} + 0,15X_{\text{TRI}}$ , де  $X_i$  — нормалізоване значення відповідного показника.

Найбільший ваговий коефіцієнт призначено показникам LS-фактор та Slope, як сильним тригерам розвитку ерозійних процесів і надважливим показникам для оцінювання ризиків зсувів. Також зазначені показники корелюють з потенціалом ерозії, що особливо важливо в гірській місцевості. Топографічні індекси TWI, SPI, SCA, TRI мають менший вплив на розвиток ерозії, тому їхні вагові коефіцієнти були нижчими.

Аналогічно розраховується кліматичний компонент із ваговими коефіцієнтами:  $H_{\text{climate}} = 0,4X_{\text{LST}} + 0,6X_{\text{precipitation}}$ .

Значення вагових коефіцієнтів для цього блоку даних доволі близькі, оскільки вони тісно пов'язані один з одним. Precipitation (кількість опадів) надано більше значення, бо територія дослідження розташована в гірській місцевості, адже тому що кількість опадів суттєво впливає на активізацію ерозійних і зсувних процесів.

Інфраструктурний компонент розраховується за наступною формулою з урахуванням визначених вагових коефіцієнтів:  $H_{\text{infrastructure}} = 0,3(1 - X_{\text{powerlines}}) + 0,3(1 - X_{\text{roads}}) + 0,4(1 - X_{\text{railway}})$ .

Варто зазначити, що обчислення цього компонента виконано із застосуванням інверсного перетворення  $(1 - X_i)$ , оскільки зі збільшенням відстані до об'єктів інфраструктури рівень потенційного ризику зменшується. Експертні вагові коефіцієнти для показників впливу інфраструктури на МТ є близькими за своїми значеннями. Ці показники є важливим з погляду ризиків, пов'язаних із будівельними роботами, вібрацією, можливими аваріями чи необхідністю доступу для обслуговування.

Наприклад, перетин трубопроводу з дорогами є важливим аспектом інженерії трубопроводів.

На основі отриманих вище компонентів розраховано інтегральний індекс геодинамічної небезпеки для кожного пікселя території дослідження згідно з формулою (1):  $H_{\text{pipe}} = 0,675H_{\text{morphometric}} + 0,175H_{\text{infrastructure}} + 0,15H_{\text{climate}}$ .

При розрахунку інтегрального індексу морфометричному компоненту присвоєно найбільше значення вагового коефіцієнту, що зумовлено гірським характером території дослідження. Інфраструктурний і кліматичний компоненти є додатковими чинниками, їхній вплив приблизно на одному рівні.

Варто зазначити, що наведені вище розрахунки застосовуються до вхідного куба геопросторових даних попіксельно. Результатом є карта геодинамічної небезпеки

вздовж мережі трубопроводів на території Українських Карпат, представлена у вигляді растрового шару. Аналогічно до вхідного куба геопросторових даних одержана карта має систему координат WGS 1984 UTM Zone 34N і просторову розрізненність 100 м. Значення цієї карти лежать від 0 до 1, адже вхідні шари куба були нормалізовані саме до цих значень і після виконання зваженої суми вказаний діапазон значень зберігається. Для візуальної інтерпретації одержану карту геодинамічної небезпеки відповідно до значень кожного пікселя було класифіковано на шість класів рівнів небезпеки, які мають рівні інтервали значень: дуже низький, низький, середній, вище середнього, небезпечний та дуже небезпечний (рис. 8).

Для перевірки достовірності отриманих результатів використано дані про відомі зсуви на території Закарпатської області

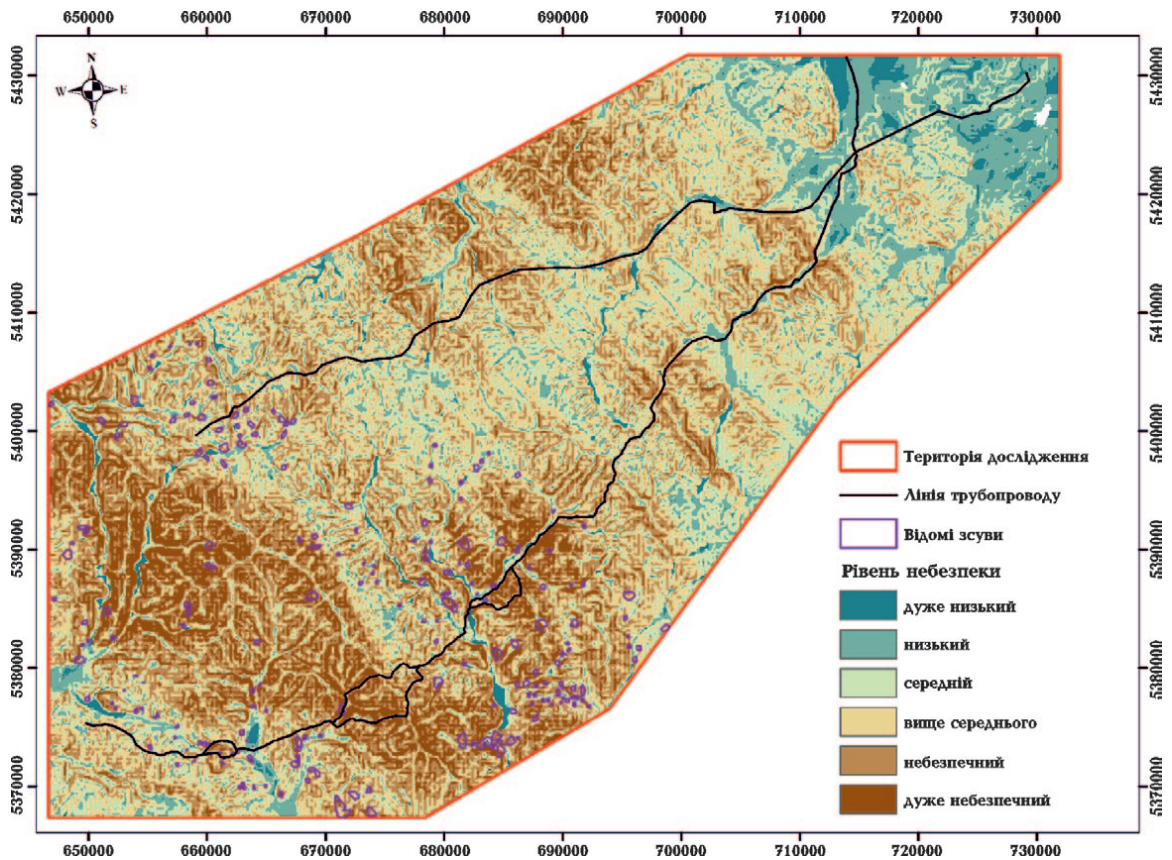


Рис. 8. Карта геодинамічної небезпеки вздовж мережі трубопроводів на території Українських Карпат.

Fig. 8. Geodynamic hazard map along the trunk pipeline network in the Ukrainian Carpathians.

[Штогрин та ін., 2021]. Таким чином, растровий шар, який містить дані про зсуви, було накладено на одержану нами карту геодинамічної небезпеки, а далі визначено, до якого класу небезпеки на карті геодинамічної небезпеки належить кожен зсув. Всього проаналізовано 198 зсувів. Під час перевірки виявлено, що до рівня низької небезпеки потрапило 2 зсуви (1,01 %), середньої — 12 (6,06 %), вище середнього — 27 (13,64 %), небезпечного — 83 (41,92 %), дуже небезпечного — 74 (37,37 %). Таким чином, одержана карта демонструє узгодженість з небезпечними геодинамічними процесами (зсувами), адже більшість зсувів зосереджена в межах небезпечного та дуже небезпечного рівнів, тоді як у зонах низької небезпеки їхня кількість є значно меншою.

**Висновки.** У статті запропоновано підхід до геопросторового інтегрального оцінювання геодинамічної небезпеки вздовж магістральних трубопроводів. Підхід передбачає розрахунок інтегрального індексу, який враховує морфометричний, інфраструктурний та кліматичний компоненти. Об'єднання зазначених компонентів відбувається з використанням зваженої суми, де вагові коефіцієнти задаються експертом залежно від впливу кожного з компонентів на загальний рівень небезпеки.

Експериментальне застосування запропонованого підходу проведено на території Українських Карпат з відповідними трубопроводами. Основним джерелом даних є матеріали ДЗЗ, а саме: морфометричний компонент складався з топографічних індексів, отриманих з даних SRTM; для кліматичного компонента використано супутникові знімки місії Landsat (температура поверхні) і SM2RAIN-ASCAT/CHERSA/WorldClim (кількість атмосферних опадів), усереднені за період 2017—2021 рр.; для інфраструктурного — векторні шари (шейпфайли) транспортної та енергетичної інфраструктури (автомобільні дороги, залізничні колії та лінії електропередач).

Отже, вхідні дані були інтегровані в єдиний куб геопросторових даних з просторовою розрізненністю 100 м. На основі цього куба розраховано карту геодинамічної небезпеки на території дослідження. Для перевірки достовірності отриманих результатів використано шар відомих зсувів на території Закарпатської області. Таким чином, отримана нами карта геодинамічної небезпеки показала просторову узгодженість із відомими зсувами, які розташовані на ділянках, що мають високий рівень геодинамічної небезпеки відповідно до отриманої карти. Вищевказане свідчить про адекватність запропонованого підходу.

Варто зазначити, що підхід має ряд обмежень. Зокрема, використання вагових коефіцієнтів, які визначаються експертним шляхом, призводить до певної суб'єктивності («людський фактор») при розрахунку запропонованого індексу. Крім цього, в проведеному експерименті показано усереднений за значний період часу (2017—2021) набір даних, що не враховує короткострокові зміни, а це обмежує використання запропонованого підходу для оперативного моніторингу стану трубопроводів.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення набору вхідних даних, зокрема можуть бути залучені більш детальні і динамічні показники, такі як шквові значення опадів і температури поверхні, а також характеристики навантаження на інфраструктуру (інтенсивність руху транспорту, завантаженість доріг та залізничних колій тощо). Це сприятиме підвищенню точності оцінювання, враховуючи не лише загальні, а й поточні умови формування небезпеки. Крім цього, надалі планується реалізувати запропонований підхід у вигляді вебзастосунку на основі хмарних обчислень (наприклад, з використанням платформи Google Earth Engine), що дасть змогу швидко виконувати розрахунки та застосовувати цей підхід для різних територій.

## Список літератури

- Білецький В.Ф., Фик М.І. *Основи транспорту природних вуглеводнів*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019, 274 с.
- Касіянчук Д.В. Статистичний аналіз факторів природної та техногенної складової розвитку зсувів. *Вісник Харків. нац. ун-ту*. 2014. № 1128. С. 139—148.
- Мандрик О.М. Аналіз причин аварійних ситуацій та руйнувань магістральних газопроводів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Вип. 25(1). С. 155—162.
- Шевчук В.В., Іванік О.М., Лавренюк М.В., Лавренюк В.І. Методичні засади моделювання впливу небезпечних геологічних процесів на функціонування трубопровідно-транспортних природно-техногенних систем. *Геол. журн.* 2012. № 2. С. 66—73. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2012.2.139059>.
- Штогрин Л.В., Анікеєв С.Г., Кузьменко Е.Д., Багрий С.М. Відображення активності зсувних процесів в регіональних гравітаційних та магнітних полях (на прикладі Закарпатської області). *Геодинаміка*. 2021. № 1(30), 65—77. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.065>.
- Andreiev, A., Kozlova, A., Artiushyn, L., & Sedlacek, P. (2024). Enhancement of land cover classification by geospatial data cube optimization. *CMIS-2024: Seventh International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, May 3, 2024, Zaporizhzhia, Ukraine* (pp. 292—304).
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991—2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- Desmet, P., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427—433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>.
- Estupinan-Suarez, L.M., Gans, F., Brenning, A., Gutierrez-Velez, V.H., Londono, M.C., Pabon-Moreno, D.E., Poveda, G., Reichstein, M., Reu, B., Sierra, C., Weber, U., & Mahecha, M.D. (2021). A regional Earth system data lab for understanding ecosystem dynamics: An example from tropical South America. *Frontiers in Earth Science*, 9, 613395. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.613395>.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duran, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1944—9208. <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183>.
- Florinsky, I.V. (2009). Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 23(2), 213—231. <https://doi.org/10.1080/13658810802527499>.
- Gruber, S., & Peckham, S. (2008). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In T. Hengl, H.I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (Vol. 33, pp. 171—194). Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)00007-x](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)00007-x).
- Hengl, T., & Parente, L. (2022). Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multi-source average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007—2021, CHELSA Climate and WorldClim [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580>.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Shpyrko, S., Yanchenko, V., & Gadiatska, K. (2019). Geological and geomorphological factors of natural hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177—186. <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.
- Kopecký, M., Macek, M., & Wild, J. (2020). Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *The Science of the Total Environment*, 757, 143785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143785>.
- Montero, D., Kraemer, G., Angheloa, A., Camacho, C.A., Brandt, G., Camps-Valls, G., Cremer, F., Flik, I., Gans, F., Habershon, S., Ji, C., Kattenborn, T., Martínez-Ferrer, L., Martinuzzi, F., Reinhardt, M., Söchting, M., Teber, K., & Mahecha, M.D. (2023). Data cubes for Earth

- system research: Challenges ahead. *EarthArXiv*. <https://doi.org/10.31223/X58M2V>.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3—30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Motazedian, D., Hunter, J.A., & Sivathayalan, S., Pugin, A., Pullan, S., Crow, H., & Banab, K.K. (2012). Railway train induced ground vibrations in a low VS soil layer overlying a high VS bedrock in eastern Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 1—11. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.008>.
- Riley, S.J., De Gloria, S.D. & Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 23—27.
- Schramm, M., Pebesma, E., Milenković, M., Foresta, L., Dries, J., Jacob, A., Wagner, W., Mohr, M., Neteler, M., Kadunc, M., Miksa, T., Kempeneers, P., Verbesselt, J., Gößwein, B., Navacchi, C., Lippens, S., & Reiche, J. (2021). The OpeNEO API — Harmonising the use of Earth observation cloud services using virtual data cube functionalities. *Remote Sensing*, 13(6), 1125. <https://doi.org/10.3390/rs13061125>.
- Shekhunova, S.B., Aleksieienkova, M.V., Kril, T.V., Stadnichenko, S.M., & Siumar, N.P. (2020). Natural and man-induced landslides formation factors within the Tysa-Apshytsia interfluvium (Transcarpathia, Ukraine). *Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (pp. 1—6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055018>.
- Snitynskyi, V., Khirivskyi, P., Hnativ, I., & Hnativ, R. (2020). Landslides and erosion phenomena in the foothills of the Carpathian region rivers. *Theory and Building Practice*, 2(1), 1—7. <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.01.009>.
- Titarenko, O., Sedlerova, O., & Liashenko, D. (2025). Geodynamic monitoring of the Lopushne-Rososh main gas pipeline using remote sensing data. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520007>.
- Tustanovska, L., Liashenko, D., Trofymenko, P., Tytarenko, O., & Marhes, S. (2025). Geocological monitoring of hazardous erosional-denudational zones in the urban environment of Kyiv. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552074>.
- Zweifel, L., Samarin, M., Meusburger, K., & Alewell, C. (2021). Investigating causal factors of shallow landslides in grassland regions of Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3421—3437. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3421-2021>.

## Integrated geospatial assessment of geodynamic hazard along the pipelines in the Ukrainian Carpathians

O.V. Titarenko<sup>1</sup>, A.A. Andreiev<sup>1</sup>, L.M. Artiushyn<sup>2</sup>, A.D. Bondarenko<sup>1</sup>, 2026

<sup>1</sup>State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

This study addresses the problem of assessing the impact of hazardous geological processes on the functioning of pipelines. The study area lies within the Ukrainian Carpathians, a region of high geodynamic activity and frequent landslides. The relevance of the research is determined by the increasing frequency and intensity of exogenous processes in mountainous areas, the ongoing effects of climate change, and the necessity to enhance the reliability and safety of critical infrastructure. The aim of the study is to identify areas of increased geodynamic hazard along the pipelines in the Ukrainian Carpathians through a comprehensive assessment of multi-factor remote sensing data.

The proposed methodology integrates morphometric, climatic, and infrastructure-related components using remote sensing data and GIS-based spatial analysis. A set of topographic indices derived from the SRTM digital elevation model was calculated to characterize the potential susceptibility of the territory to landslide development and erosion processes. These indices reflect slope steepness, flow accumulation, surface runoff energy, and terrain ruggedness, which are key factors controlling slope instability in mountainous environments. In addition, land surface temperature, derived from Landsat imagery, and average annual precipitation were incorporated to account for climatic influences on slope processes.

All factors were integrated within a unified geoinformation environment to map the distribution of potential geodynamic hazards along the pipeline. The resulting map represents a raster-based hazard index that reflects the combined influence of natural and anthropogenic factors. The results make it possible to delineate high-risk zones. They can be used to improve monitoring systems, maintenance planning, and preventive risk management strategies in mountainous regions, particularly within the Ukrainian Carpathians.

To assess the reliability of the proposed model, the obtained hazard levels were compared with the spatial distribution of documented landslides within the study area, based on regional geological records and open geospatial datasets. The analysis revealed a clear spatial correspondence between high-hazard zones and recorded landslide occurrences, indicating a statistically meaningful correlation and confirming the adequacy and practical applicability of the proposed geospatial assessment approach.

**Key words:** geodynamic hazard, pipelines, geoinformation analysis, risk assessment, geospatial zoning.

## References

- Biletskyi, V.F., & Fik, M.I. (2019). *Fundamentals of natural hydrocarbon transport*. Kharkiv: NTU «KhPI», 274 p. (in Ukrainian).
- Kasiianchuk, D.V. (2014). Statistical analysis of factors of natural and technogenic components of landslide development. *Visnyk of Kharkiv National University*, (1128), 139—148 (in Ukrainian)
- Mandryk, O.M. (2015). Analysis of the causes of emergencies and destruction of main gas pipelines. *Scientific Bulletin of the National Technical University of Ukraine*, (1), 155—162 (in Ukrainian).
- Shevchuk, V.V., Ivanik, O.M., Lavrenyuk, M.V., & Lavrenyuk, V.I. (2012). Modelling of the impact of hazardous geological processes on the functionality of pipe-transporting nature-technical systems. *Geological Journal*, (2), 66—73. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2012.2.139059> (in Ukrainian).
- Shtohryn, L.V., Anikeev, S.G., Kuzmenko, E.D., & Bagriy, S.M. (2021). Reflection of the activity of landslide processes in regional gravitational and magnetic fields (using the example of the Transcarpathian region). *Geodynamics*, (1), 65—77. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.065> (in Ukrainian).
- Andreiev, A., Kozlova, A., Artiushyn, L., & Sedlacek, P. (2024). Enhancement of land cover classification by geospatial data cube optimization. *CMIS-2024: Seventh International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, May 3, 2024, Zaporizhzhia, Ukraine* (pp. 292—304).
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991—2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- Desmet, P., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427—433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>.
- Estupinan-Suarez, L.M., Gans, F., Brenning, A., Gutierrez-Velez, V.H., Londono, M.C., Pabon-Moreno, D.E., Poveda, G., Reichstein, M., Reu, B., Sierra, C., Weber, U., & Mahecha, M.D. (2021). A regional Earth system data lab for understanding ecosystem dynamics: An example from tropical South America. *Frontiers in Earth Science*, 9, 613395. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.613395>.

- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duran, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), 1944—9208. <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183>.
- Florinsky, I.V. (2009). Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 23(2), 213—231. <https://doi.org/10.1080/13658810802527499>.
- Gruber, S., & Peckham, S. (2008). Chapter 7 Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. In T. Hengl, H.I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry* (Vol. 33, pp. 171—194). Amsterdam. [https://doi.org/10.1016/s0166-2481\(08\)00007-x](https://doi.org/10.1016/s0166-2481(08)00007-x).
- Hengl, T., & Parente, L. (2022). Monthly precipitation in mm at 1 km resolution (multisource average) based on SM2RAIN-ASCAT 2007—2021, CHELSA Climate and WorldClim [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6458580>.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Shpyrko, S., Yanchenko, V., & Gadiatska, K. (2019). Geological and geomorphological factors of natural hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177—186. <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.
- Kopecký, M., Macek, M., & Wild, J. (2020). Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *The Science of the Total Environment*, 757, 143785. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143785>.
- Montero, D., Kraemer, G., Angheloa, A., Camacho, C.A., Brandt, G., Camps-Valls, G., Cremer, F., Flik, I., Gans, F., Habershon, S., Ji, C., Kattenborn, T., Martínez-Ferrer, L., Martinuzzi, F., Reinhardt, M., Söchting, M., Teber, K., & Mahecha, M.D. (2023). Data cubes for Earth system research: Challenges ahead. *EarthArXiv*. <https://doi.org/10.31223/X58M2V>.
- Moore, I.D., Grayson, R.B., & Ladson, A.R. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3—30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>.
- Motazedian, D., Hunter, J.A., & Sivathayalan, S., Pugin, A., Pullan, S., Crow, H., & Banab, K.K. (2012). Railway train induced ground vibrations in a low VS soil layer overlying a high VS bedrock in eastern Canada. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 1—11. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.02.008>.
- Riley, S.J., De Gloria, S.D. & Elliot, R. (1999). A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences*, 5, 23—27.
- Schramm, M., Pebesma, E., Milenković, M., Foresta, L., Dries, J., Jacob, A., Wagner, W., Mohr, M., Neteler, M., Kadunc, M., Miksa, T., Kempeneers, P., Verbesselt, J., Gößwein, B., Navacchi, C., Lippens, S., & Reiche, J. (2021). The OpeNEO API — Harmonising the use of Earth observation cloud services using virtual data cube functionalities. *Remote Sensing*, 13(6), 1125. <https://doi.org/10.3390/rs13061125>.
- Shekhunova, S.B., Aleksieienkova, M.V., Kril, T.V., Stadnichenko, S.M., & Siumar, N.P. (2020). Natural and man-induced landslides formation factors within the Tysa-Apshytsia interfluvium (Transcarpathia, Ukraine). *Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (pp. 1—6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055018>.
- Snitynskyi, V., Khirivskyi, P., Hnativ, I., & Hnativ, R. (2020). Landslides and erosion phenomena in the foothills of the Carpathian region rivers. *Theory and Building Practice*, 2(1), 1—7. <https://doi.org/10.23939/jtbp2020.01.009>.
- Titarenko, O., Sedlerova, O., & Liashenko, D. (2025). Geodynamic monitoring of the Lopushne-Rososh main gas pipeline using remote sensing data. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520007>.
- Tustanovska, L., Liashenko, D., Trofymenko, P., Tytarenko, O., & Marhes, S. (2025). Geoecological monitoring of hazardous erosional-denudational zones in the urban environment of Kyiv. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552074>.
- Zweifel, L., Samarin, M., Meusburger, K., & Alewell, C. (2021). Investigating causal factors of shallow landslides in grassland regions of Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3421—3437. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3421-2021>.