



УДК 504.06:551.3

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.32>

ГЕОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ТЕРИТОРІЇ (НА ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ В БАСЕЙНІ Р. ТЕРЕБЛЯ, УКРАЇНСЬКІ КАРПАТИ)

В. О. Рушчак¹

У статті запропоновано та узагальнено геоecологічний підхід до оцінювання зсувного ризику для ділянки у верхів'ї басейну р. Теробля в межах Українських Карпат на основі комплексу факторів розвитку зсувів із урахуванням рослинного покриття території. Окрему увагу приділено врахуванню лісового покриття, як фактора просторового розвитку зсувних, зокрема, оцінено його просторову структуру, щільність, просторово-часову динаміку і положення відносно прояву зсуву та схилу. Актуальність дослідження зумовлена тим, що більшість регіональних моделей зсувної сприйнятливості спирається переважно на морфометричні, геологічні, техногенні чинники, а стан рослинного покриття зсувонебезпечних територій часто оцінюється лише у бінарному вигляді, враховуючи тільки факт його наявності. Для регіону Карпат таке спрощення є недостатнім, оскільки саме межа лісу, фрагментація, вирубки, порушення покриття та зміни рослинності істотно впливають на режим поверхневого і приповерхневого стоку вод, інфільтрацію, ерозійну підготовку схилів і, зрештою, на просторову локалізацію небезпечних зсувних ділянок. Метою роботи є побудова базової геоecологічної моделі зсувного ризику для ділянки в басейні р. Теробля на основі створеної моделі зсувної сприйнятливості (Landslide Susceptibility Assessment (LSA) яка крім ряду факторів враховує характер лісового покриття та його експозицію. У дослідженні використано кадастрові дані про зсуви ДНВП «Геоінформ України», цифрову модель поверхні ALOS AW3D30, набір MERIT Hydro, карти ESA WorldCover, продукти Hansen Global Forest Change, супутникові дані Landsat, Sentinel-2. Моделювання виконувалося у Google Earth Engine та геоінформаційній системі QGIS. Модель зсувної сприйнятливості території враховує морфометричний блок, гідрологічний блок і лісовий блок. Лісовий покрив параметризовано через відстань до межі лісу, щільність покриття, амплітуду NDVI, втрати лісу до 2001 р. і у 2001–2023 рр., а також частку лісу вище по схилу. Встановлено, що 73 % зсувів приурочено до смуги до 500 м від межі лісу. Побудована картограма LSA показала, що 35,3 % площі моделювання попадає в зони з дуже високою та високою сприйнятливістю території до розвитку зсувів. Наукова новизна полягає в адаптації алгоритму розрахунку зсувної сприйнятливості території та зсувних ризиків для досліджуваної території у межах Українських Карпат та врахуванні параметрів стану лісового покриття. Практичне значення полягає у можливості використання карти ризику для пріоритизації моніторингу територій, проведення лісогосподарських заходів, забезпеченні сталого розвитку території та визначенні ділянок першочергового інженерно-геологічного вивчення.

Ключові слова: зсувні процеси, геоecологічний ризик, лісовий покрив, просторовий аналіз, геоінформаційні системи, Google Earth Engine, дистанційне зондування Землі.

¹ аспірант кафедри екології

(Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ)

e-mail: rushchakvolodymyrr@gmail.com

ORCID: 0009-0000-6821-8637

GEOECOLOGICAL MODEL OF LANDSLIDE RISK WITH CONSIDERATION OF FOREST-COVER STRUCTURE AND SPATIAL EXPOSURE (A CASE STUDY OF A SITE IN THE TEREBLIA RIVER BASIN, UKRAINIAN CARPATHIANS)

V. O. Rushchak

The article proposes and generalizes a geocological approach to landslide risk assessment for a study area located in the upper Tereblia River basin within the Ukrainian Carpathians, based on a set of landslide development factors with consideration of the vegetation cover of the territory. Special attention is given to forest cover as a factor in the spatial development of landslides; in particular, its spatial structure, density, spatiotemporal dynamics, and position relative to landslide occurrence and slope location were assessed. The relevance of the study is determined by the fact that most regional landslide susceptibility models rely primarily on morphometric, geological, and anthropogenic factors, whereas the condition of vegetation cover in landslide-prone areas is often assessed only in a binary way, considering merely its presence. For the Carpathian region, such simplification is insufficient, since forest edge, fragmentation, logging, cover disturbance, and vegetation changes significantly affect surface and near-surface runoff, infiltration, the erosional preconditioning of slopes, and, ultimately, the spatial localization of hazardous landslide areas. The aim of the study is to construct a baseline geocological landslide risk model for a site in the Tereblia River basin on the basis of the developed Landslide Susceptibility Assessment (LSA) model, which, in addition to a range of factors, takes into account the characteristics of forest cover and its exposure. The study used cadastral landslide data from DNVP "Geoinform of Ukraine," the ALOS AW3D30 digital surface model, the MERIT Hydro dataset, ESA WorldCover maps, Hansen Global Forest Change products, and Landsat and Sentinel-2 satellite data. The modeling was carried out in Google Earth Engine and the QGIS geographic information system. The landslide susceptibility model of the territory includes a morphometric block, a hydrological block, and a forest block. Forest cover was parameterized through distance to forest edge, cover density, NDVI amplitude, forest loss before 2001 and during 2001–2023, as well as the proportion of forest located upslope. It was found that 73% of landslides are confined to a belt within 500 m of the forest edge. The constructed LSA map showed that 35.3% of the modeled area falls within zones of high and very high landslide susceptibility. The scientific novelty lies in the adaptation of an algorithm for calculating landslide susceptibility and landslide risks for the study area within the Ukrainian Carpathians, with explicit consideration of forest cover condition parameters. The practical significance lies in the possibility of using the risk map to prioritize territorial monitoring, plan forestry measures, support sustainable territorial development, and identify sites requiring priority engineering-geological investigation.

Key words: landslide processes, geocological risk, forest cover, spatial analysis, geographic information systems, Google Earth Engine, remote sensing

Вступ

Зсувні процеси належать до найнебезпечніших проявів екзогенних геологічних процесів у гірських і передгірських регіонах. Зокрема, вони масово поширені у Карпатському регіоні (Інформаційний щорічник..., 2021). У сучасних підходах до моделювання розвитку зсувів прийнято розрізняти принаймні три рівні оцінювання: зсувну сприйнятливість як відповідь на питання «де?», небезпеку як відповідь на питання «де і за яких умов?», та ризик як відповідь на питання «де, для кого і з якими наслідками?». Для Українських Карпат ця логіка має не лише інженерно-геологічне, а й виразне геоecологічне значення, оскільки активізація зсувів супроводжується деградацією ґрунтового покриву, трансформацією ландшафтної структури, підвищенням ерозійної активності та загрозами для

населених пунктів, доріг та інфраструктури (Kovalchuk et al., 2013; Кузьменко, 2016; Reichenbach et al., 2018; Kasiyanchuk & Shtohryn, 2021).

Класичні моделі зсувної сприйнятливості (Landslide Susceptibility Assessment (LSA)) на регіональному рівні здебільшого спираються на морфометричні, геологічні та гідрологічні фактори. Такий підхід є виправданим, оскільки саме вони найбільш вагомими при активізації розвитку зсувних процесів. Для Карпатського регіону важливим є врахування лісового покриву території при моделюванні розвитку зсувних процесів, враховуючи як значну залізеність схилів так і деградацію лісового покриву в Українських Карпатах. У гірських регіонах лісовий покрив є вагомими чинником розвитку зсувних процесів, оскільки він змінює інтерцепцію опадів, їх інфільтрацію,

поверхневий та підземний стік, механічну стійкість приповерхневого шару через вплив кореневих систем дерев, просторову структуру поверхні схилу, через фрагментацію лісового покриву унаслідок вирубок, прокладання лісових доріг тощо. (Schmaltz et al., 2017; Muñoz-Torrero et al., 2022).

Для Українських Карпат особливо важливо, що просторове поширення зсувних ділянок відповідає взаємодії кількох блоків чинників–морфологічних характеристик рельєфу, дренажної мережі водотоків, структури лісу й антропогенного впливу. Саме тому спрощене врахування лісового покриву як класу «ліс / не ліс» не дозволяє належно відобразити його просторовий вплив. Більш інформативними факторними характеристиками є відстань до межі лісу, щільність деревного покриву, динаміка порушень покриву, сезонна зміна рослинності та наявність лісу у верхній частині схилу по відношенню до зсувної ділянки. У наукових дослідженнях показано, що лісовий покрив доцільно включати як окремий просторовий блок моделі зсувної сприйнятливості, а не як допоміжний чинник (Cherpurnyi et al., 2024; Rushchak & Cherpurnyi, 2025). Модель сприйнятливості території до розвитку зсувів не дає відповіді на питання про просторову локалізацію найбільш критичних загроз для населення й інфраструктури. Подальшим розвитку цієї моделі є перехід до оцінки ризиків, врахування загроз від розвитку зсувів для населення та інфраструктури (Кузьменко, 2016; Kasiyanchuk & Shtohryn, 2021). Для території Українських Карпат, де поселення, дороги, рекреаційні об'єкти та інженерні мережі часто розташовані безпосередньо під зсувонебезпечними схилами, цей перехід є принциповим.

Метою статті є побудова геоекологічної моделі зсувного ризику для ділянки в басейні р. Теремля на основі інтеграції моделі зсувної сприйнятливості, просторових характеристик лісового покриву та блоку просторової експозиції населення та інфраструктурних об'єктів. Для досягнення цієї мети розв'язано такі завдання: охарактеризовано район дослідження та підготовлено узгоджений набір просторових даних; параметризовано морфометричні, гідрологічні та лісові предиктори моделі; побудовано індексну модель LSA на основі експертно зважених факторів; перевірено структуру набору предикторів за допомогою кореляційного, факторного та PCA-аналізу; сформовано базову карту ризику.

Матеріал і методи

Базовим полігоном детального моделювання обрано ділянку площею 25 × 25 км у східній частині Закарпатської області, у верхів'ї басейну р. Теремля, між хребтами Красна та Пішконя (рис. 1). У межах ділянки розташовані населені пункти Колочава, Руська Мокра, Німецька Мокра, Брустури та Усть-Чорна. Згідно з кадастровими даними ДНВП «Геоінформ України», у межах цього полігону зареєстровано 236 зсувів. Територія характеризується типовими для Карпат стрімкими схилами, переважно у діапазоні 20–40°, флішовою будовою, високим рівнем зволоження, середніми абсолютними висотами близько 650 м н.р.м. і максимальними відмітками до 1300 м.

У роботі використано такі просторові джерела: кадастрові точки зсувів ДНВП «Геоінформ України»; цифрову модель поверхні ALOS AW3D30; гідрографічний набір MERIT Hydro; карту земного покриву ESA WorldCover; продукти Hansen / Global Forest Change; часові ряди Landsat для ретроспективного аналізу змін лісового покриву; супутникові дані Sentinel-2 для оцінки амплітуди NDVI. Попередню обробку й інтеграцію даних виконано у середовищі Google Earth Engine. Про доцільність та переваги використання платформи Google Earth Engine йдеться у роботах Hansen et al., 2013; Gorelick et al., 2017; Zanaga et al., 2022; Yamazaki et al., 2019. Ці роботи демонструють застосування хмарної платформи Google Earth Engine для роботи з відкритими даними дистанційного зондування землі для оцінки стану лісового покриву територій та водних ресурсів. Крім цього такий підхід забезпечує можливість комплексування просторових даних, які стосуються різноманітних просторових чинників та виконувати геоінформаційний аналіз, моделювання та картографування природних і техногенних явищ і процесів у тому числі сприйнятливості територій до розвитку зсувних процесів (Давибида, 2021; Орещенко, 2022; Ivanyshyn & Kasiyanchuk, 2024; Гарбар та ін., 2024; Davybida, 2025).

Усі шари було приведено до спільної просторової основи й уніфікованої робочої сітки. До моделі LSA включено три групи предикторів. Морфометричний блок охоплював крутизну схилу, експозицію, абсолютну висоту та шорсткість рельєфу. Гідрологічний блок було представлено показником близькості до водотоків. Лісовий блок включав близькість до межі лісу, щільність

лісового покриву, амплітуду NDVI, втрати лісу до 2001 р., втрати лісу у 2001–2023 рр. і лісовий покрив вище по схилу. Такий набір змінних дозволив подати лісовий покрив не як фон, а як багатокомпонентний модифікатор зсувної небезпеки.

Типовою формулою, яка використовується для розрахунку зсувної сприйнятливості території LSA є:

$$LSA = \sum_{i=1}^n w_i \cdot F_i$$

де:

LSA – інтегральний індекс зсувної сприйнятливості території

Σ – сума всіх факторів, включених до моделі

i – порядковий номер фактора

n – загальна кількість факторів у моделі

w_i – ваговий коефіцієнт i-го фактора

F_i – нормалізоване значення i-го фактора

Результати

Щоб оцінити внутрішню узгодженість факторів, які увійшли до моделі, у межах вибірки n = 236 точок зсувів виконано кореляційний, факторний і PCA-аналіз. Кореляційний аналіз показав найсильніший позитивний зв'язок між шорсткістю рельєфу та крутизною схилу (r = 0,76; p < 0,01) і найсильніший негативний зв'язок між висотою та близькістю до водото-

ків (r = -0,57; p < 0,01). Кластерний аналіз встановив наявність кількох змістовних блоків предикторів, зокрема, найтісніший зв'язок встановлено у парі факторів “рельєфу – крутизна схилу”. Окремо групуються близькість до межі лісу з близькістю до водотоків, амплітуда NDVI з втратами лісу до 2001 р., висота з втратами лісу 2001–2023. За результатами факторного аналізу встановлено, що за першою головною компонентою згруповано чинники, які відносяться до морфометричних характеристик рельєфу та характеристик лісового покриву (шорсткість рельєфу, крутизна схилу, щільність лісового покриву), що узгоджено з результатами кластерного аналізу. Перший компоненті відповідає 30,7 % загальної мінливості.

Одним із найважливіших результатів є підтвердження того, що для території досліджень в басейні р. Теремля вирішальним є не лише сам факт заліснення, а просторове положення зсувів відносно межі лісу. За результатами просторового аналізу, 73 % зсувів приурочено до смуги 0–500 м від межі лісу. Це означає, що прикорайові зони лісу є критичними з погляду зсувної чутливості, оскільки саме тут можливе створення додаткового гідродинамічного тиску інфільтрованих у межах лісового масиву

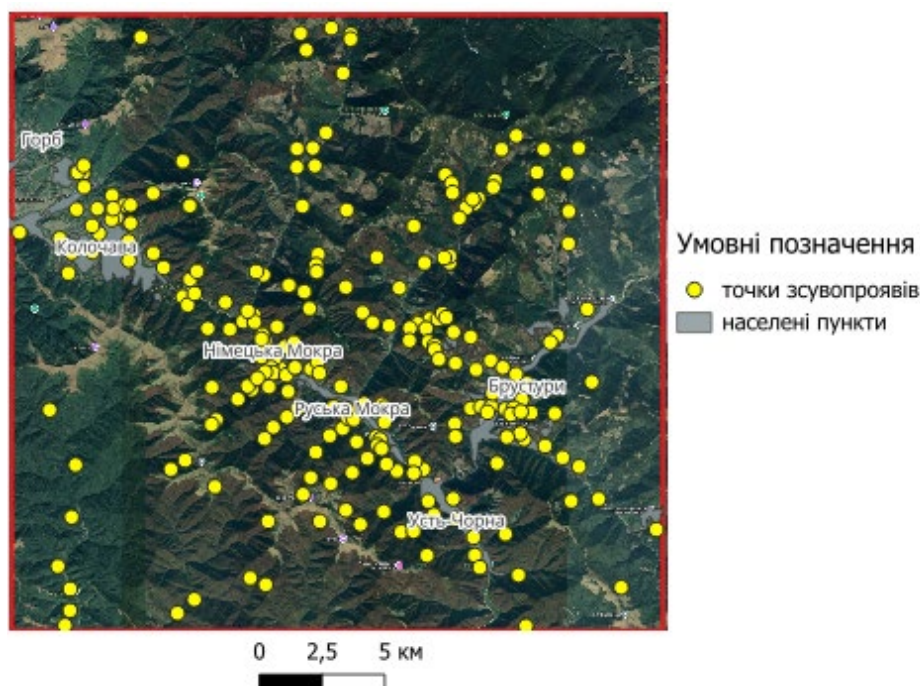


Рис. 1. Карта району дослідження та локалізація зсувних ділянок у межах басейну р. Теремля

вод, неоднорідність інфільтраційних умов, порушення безперервності кореневого армування та вища ймовірність антропогенних втручань (Руцак і Чепурний, 2024; Cherpurnyi et. al., 2024). Прояви зсувних процесів на межі лісового покриву можна обґрунтувати низкою фізичних чинників. Насамперед, це підвищена кількість опадів, яка призводить до інтенсивного зволоження та насичення ґрунтів. Крім того, у межах лісу добре дреновані породи сприяють переходу поверхневого стоку у підземний. Важливу роль відіграє також внутрішній стік води вздовж схилу. Зростання гідродинамічного тиску вздовж фільтраційного потоку вниз по схилу пов'язане зі зменшенням водопроникності порід за межами лісу. Додатковим фактором є вирубка лісу, яка найчастіше здійснюється саме на межі лісових масивів і суттєво впливає на активізацію зсувних процесів.

Важливим етапом дослідження була оцінка вагових коефіцієнтів для факторних характеристик, які враховано у моделі LSA. Для оцінки цих коефіцієнтів застосовано метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНР), який дозволяє оцінювати кількісні та якісні критерії за допомогою парних порівнянь, визначаючи ваги факторів та пріоритети альтернатив (Lima et al., 2022). Найвищі ваги отримали близькість до водотоків (0,21), крутизна схилу (0,16), близькість до межі лісу (0,16) та щільність лісового покриву (0,16). Середню вагу мав показник шорсткості рельєфу (0,10) і втрати лісу у 2001–2023 рр. (0,08), а менші ваги – експозиція, амплітуда NDVI, ліс вище по схилу, абсолютна висота та втрати лісу до 2001 р. Такий розподіл відповідає значущості факторів у формуванні схильності до зсувів; відповідні вагові коефіцієнти наведено в (табл. 1).

Таблиця 1
Вагові коефіцієнти факторів моделі LSA

Фактор	Вага
Близькість до водотоків	0,21
Крутизна схилу	0,16
Близькість до межі лісу	0,16
Щільність лісового покриву	0,16
Шорсткість рельєфу	0,10
Втрати лісу у 2001–2023 рр.	0,08
Експозиція схилу	0,03
Амплітуда NDVI	0,03
Ліс вище по схилу	0,03
Абсолютна висота	0,02
Втрати лісу до 2001 р.	0,02

Розрахований індекс LSA змінюється у межах 0–1. Його було пере класифіковано на п'ять класів за сприйнятливістю території до розвитку зсувів: 1–дуже низька, 2–низька, 3–середня, 4–висока, 5–дуже висока сприйнятливість. Валідацію моделі виконано за схемою 70 % / 30 %: 70 % точок використано як тренувальну вибірку, 30 % – як тестову.

Базову модель ризику побудовано як результат взаємодії компоненти небезпеки, експозиції та вразливості. Небезпека-блок апроксимовано індексом LSA. Просторова експозиція у робочій схемі була пов'язана з населенням, забудовою та дорогами. Відповідно до фінальної моделі, ризик для людей та інфраструктури розраховувався у шкалі 0–1 за формулою

$$R = H \times E \times (0,7 + 0,3 \times V_d)$$

де: R – ризик, H – небезпека, E – експозиція, V_d – демографічна вразливість населення.

У цій формулі отримані значення LSA відповідають небезпеці, просторове поширення населення, інфраструктурних об'єктів, будівель та споруд. Враховане в експозиції, коефіцієнт V_d дозволяє врахувати демографічну вразливість населення, а саме дітей до 14 років та людей похилого віку більше 65 років. Такий підхід описаний у роботі (Wang et al., 2021), де оцінено ризик розвитку зсувів на основі розрахованої моделі сприйнятливості території до розвитку зсувних процесів та з використанням ключових елементів експозиції вразливих економічних, матеріальних, суспільних елементів. Така постановка дозволяє перейти від природної сприйнятливості до геоecологічної інтерпретації потенційних наслідків.

Побудована картограма LSA, яка зображена на рисунку 2, продемонструвала виразну просторову диференціацію території за ступенем зсувної сприйнятливості. Найвищі значення індексу формуються на крутих схилах, морфометрично розчленованих ділянках, схилах, пов'язаних із дренажною мережею, крайових зонах лісових масивів і на ділянках із ознаками порушення або ослаблення лісового покриву. Зсувна сприйнятливість у межах території досліджень визначається не одним домінуючим фактором, а збігом кількох чинників, серед яких структурні характеристики лісу відіграють роль не меншу, ніж морфометрія. Просторовий розподіл розрахованих класів зсувної сприйнятливості для досліджуваної території наведено на (рис. 2).

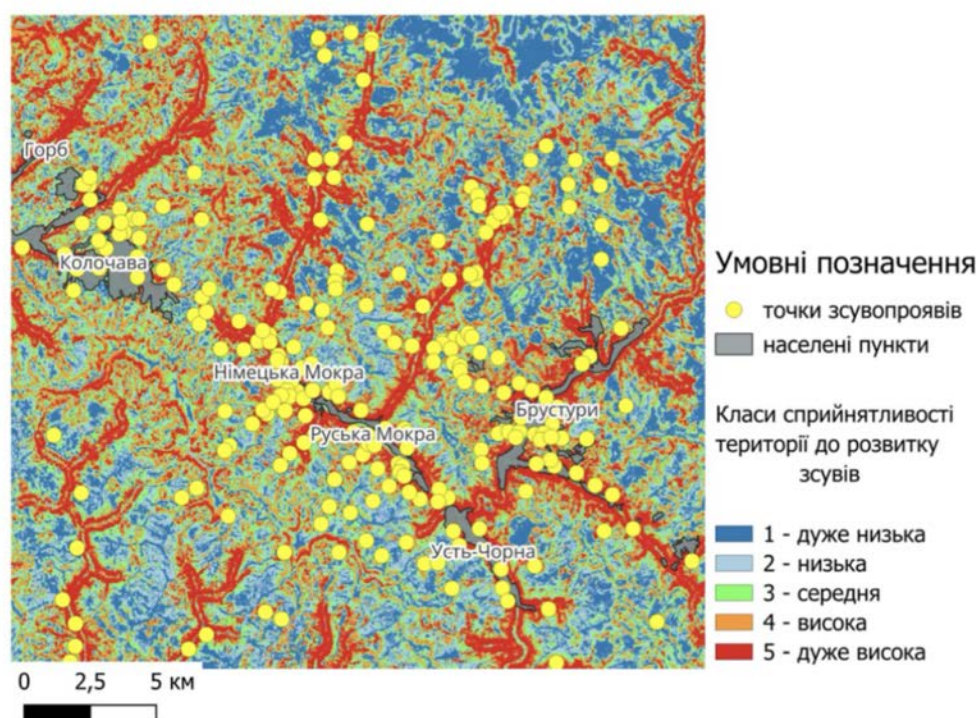


Рис. 2. Карта зсувної сприйнятливості території (LSA) для ділянки в басейні р. Теребля

Кількісний розподіл площі за класами LSA показав, що найбільшу частку займає середній клас сприйнятливості – 30,9 %. Низький клас охоплює 22,9 % території, дуже низький – 10,8 %, високий – 23,4 %, дуже високий – 11,9 %. Отже, сумарно високі та дуже високі класи охоплюють 35,3 % площі моделювання. Це свідчить про те, що більше третини території має виразні передумови до активізації зсувів, а зсувна небезпека в басейні р. Теребля має не локальний, а системний характер.

Розподіл тестової вибірки зсувів за класами LSA підтвердив практичну придатність моделі. До дуже низького класу потрапили 2 тестові зсуви, до низького – 15, до середнього – 21, до високого – 23, до дуже високого – 19. Таким чином, 78,8 % тестових зсувів зосереджено в класах 3–5. Для регіональної індексної моделі це є важливим аргументом на користь коректності ранжування території та доцільності включення лісових предикторів до фінального варіанту LSA. Узагальнений розподіл площі моделювання і тестових зсувів за класами LSA наведено в (табл. 2).

Гістограма розподілу значень LSA у вибірці зсувних точок ($n = 236$) (рис. 3) додатково показує зміщення розподілу у бік середніх і високих класів. Середнє значення

становить 3,57, що вказує на домінування несприятливих умов серед інвентаризованих об'єктів. Найбільша частота спостерігається у високих класах LSA, а це означає, що фактичний розподіл зсувних точок узгоджується з просторовою логікою побудованої моделі.

Таблиця 2
Розподіл площі моделювання та тестових зсувів за класами LSA

Клас LSA	Інтервал	Частка площі, %	Кількість тестових зсувів
1	0,0–0,2	10,8	2
2	0,2–0,4	22,9	15
3	0,4–0,6	30,9	21
4	0,6–0,8	23,4	23
5	0,8–1,0	11,9	19

Після інтеграції зсувної небезпеки з блоком просторової експозиції було сформовано фінальну карту ризику для людей та інфраструктури (рис. 4). На відміну від картограми LSA, яка відображає переважно природну складову формування зсувної небезпеки, карта ризиків локалізує ті ділянки, де ця передумова збігається з просторовим поширенням вразливих об'єктів та населення. Найвищі значення ризику

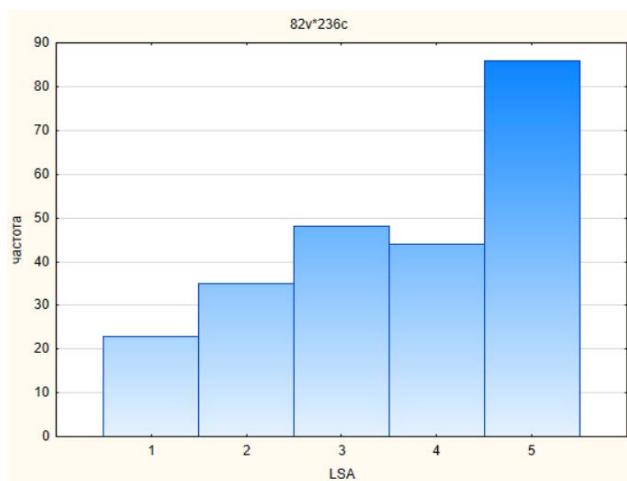


Рис. 3. Гістограма розподілу значень LSA у вибірці зсувних точок (n = 236)

формується вибірково – у зонах, де високі або дуже високі значення LSA збігаються з забудовою, транспортними коридорами, населеними пунктами та контактними смугами між освоєними територіями й зсувонебезпечними схилами.

Смуги високого ризику тяжіють до заселених частин долини, ділянок із щільнішою інфраструктурою та тих сегментів схилів, де висока сприйнятливість доповнюється просторовою експозицією. Це означає, що не кожен крутий схил автоматично належить до зон високого ризику; такими є насамперед ті ділянки, де зсувна небезпека накладається на високу щільність населення.

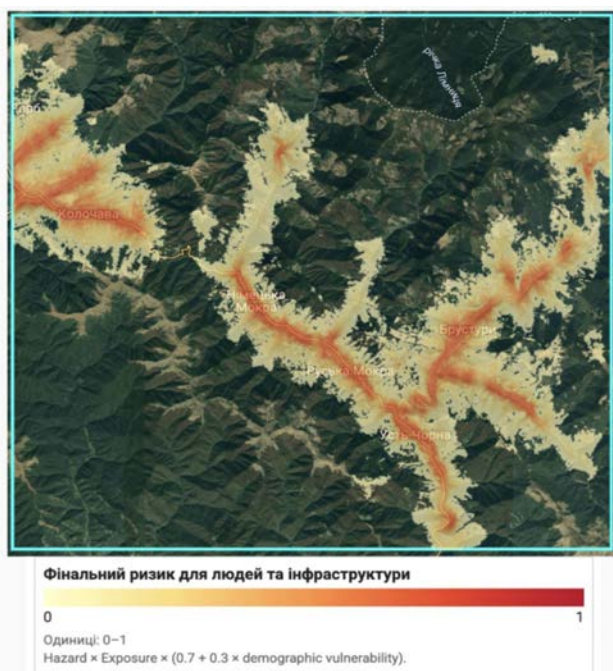


Рис. 4. Фінальна карта геоєкологічного ризику для людей та інфраструктури

Обговорення

Отримані результати підтверджують, що для басейну р. Тересля ключовим методичним кроком є перехід від спрощеного трактування лісу як фонового шару до розгляду його структури як функціонального елемента моделі. Це принципово важливо для Карпат, де ліс часто сприймається як автоматично стабілізуючий фактор. Зсуви можуть виникати і на добре заліснених схилах, якщо високий морфометричний потенціал, гідрологічний контроль і ерозійні процеси компенсують стабілізуючу роль рослинності. Водночас крайові зони лісу й ділянки порушеного покриву є особливо чутливими до схлизових процесів.

Кореляційний, факторний і PCA-аналіз показали, що набір предикторів формує не випадкову суму ознак, а змістовні блоки: морфометричний, висотно-гідрографічний і блок сучасних порушень покриву. Це означає, що включення лісового блоку до LSA-моделі є обґрунтованим рішенням. Важливою перевагою запропонованого підходу є використання відкритих геоданих і відтворюваного алгоритму. Це створює можливість масштабування моделі на інші зсувонебезпечні території Українських Карпат. У дослідженні зроблено акцент на просторовій інтерпретації ризику й на чіткому зв'язку між небезпекою та експозицією, а саме місцями поширенням вразливих об'єктів та високої щільності населення.

У підходах, які використано у дослідженні слід звернути увагу на представлення зсувних ділянок у вигляді точок, відсутність надійних дат активізації зсувних процесів, а також статичний характер базової моделі ризику. Через це карта ризику повинна розглядатися не як оперативний короткостроковий прогноз, а як просторове районування довгострокового фону небезпеки для людей та інфраструктури. Наступним кроком розвитку підходу має стати інтеграція часових тригерів, передусім опадів, вологості ґрунту та паводків, а також деталізація блоку експозиції через окремі шари забудови, доріг та демографічної вразливості.

З практичного погляду карта ризику є дозволяє ефективно використовувати ресурси для моніторингу і превентивних заходів не на всіх зсувонебезпечних схилах, а насамперед на тих, які безпосередньо впливають на населені пункти, дороги, рекреаційні об'єкти та інші елементи.

Висновки

На прикладі території у верхів'ї басейну р. Тереля розроблено геоecологічну модель зсувного ризику, у якій лісовий покрив розглянуто як повноцінний фактор зсувоутворення.

Показано, що найбільш інформативними факторними характеристиками лісового покриву є не лише наявність лісу, а передусім його структура – близькість до межі лісу, щільність покриву, амплітуда NDVI, історія втрат покриву та частка лісу у верхній частині схилу.

Встановлено, що 73 % зсувів приурочено до смуги 0–500 м від межі лісу, що підтверджує значну роль лісового покриву при активізації зсувних процесів.

Побудована карта LSA показала, що високі та дуже високі класи сприйнятливості охоплюють 35,3 % площі моделювання. 78,8 % тестових зсувів потрапляють до класів середньої, високої та дуже високої сприйнятливості.

Кореляційний, факторний і кластерний аналіз підтвердили, що набір використаних предикторів формує змістовно узгоджену багатовимірну структуру, у якій морфометричні, гідрографічні та лісові чинники не дублюють одне одного, а відображають різні механізми впливу на розвиток зсувних процесів.

Фінальна карта геоecологічного ризику локалізує насамперед ті ділянки, де висока небезпеки збігається з просторовою експозицією населення, забудови та транспортної мережі. Найбільш критичними є приузлісні схили поблизу поселень і доріг.

Практичне значення полягає у можливості використання карти ризику для пріоритизації моніторингу територій, проведення лісогосподарських заходів, забезпеченні сталого розвитку територій та визначенні ділянок першочергового інженерно-геологічного вивчення. Подальше вдосконалення підходу доцільно пов'язати з інтеграцією часових тригерів, актуалізацією інвентаризації зсувів і деталізацією блоку просторової експозиції та вразливості.

Список використаної літератури

- Гарбар О. В., Весельська Е. В., Хом'як І. В., Гарбар Д. А. Просторово-часові зміни структури земельного покриву Словечансько-Овруцького кряжу. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 197–209. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.22>.
- Давибида Л. І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2021. Т. 12, № 2. С. 75–86. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86).
- Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. Київ : Державна служба геології та надр України, ДНВП «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2021. 78 с.
- Кузьменко Е. Д. (ред.). *Прогнозування зсувів : монографія*. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. 601 с.
- Орещенко А. В. Аналіз геоморфологічних характеристик гірськолижних трас для оцінки туристичного потенціалу Українських Карпат. *Український журнал природничих наук*. 2022. № 1. С. 123–142. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.1.2023.123-142>.
- Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. Spatial Analysis of the Relationship between the Distribution of Landslide Areas and Forest Cover. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024»*, 2024. Vol. 2024, issue 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510017>.
- Davybida L. Remote sensing and Google Earth Engine for Regional Landslide Assessment in the Carpathians. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities*. 2025. Vol. 2025, issue 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520018>.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013. Vol. 342, issue 6160. P. 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>.
- Ivanyshyn V., Kasiyanchuk D. Analysis of the Impact of Climate Change on the Vegetation of the Perehinsk Territorial Community in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, issue 2. P. 199–215. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.070210>.

Kasiyanchuk D., Shtohryn L. Assessment of the Ecological Risks of Landslide Damages in the Carpathian Region. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2021. Vol. 4, issue 3. P. 52–61. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.040306>.

Kovalchuk I., Mykhnovych A., Pylypovych O., Rudko G. Extreme Exogenous Processes in the Ukrainian Carpathians. In: Łoczy D. (Ed.). *Geomorphological Impacts of Extreme Weather*. Dordrecht : Springer, 2013. P. 53–66. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_4.

Lima P., Steger S., Glade T., Murillo-García F. G. Literature review and bibliometric analysis on data-driven assessment of landslide susceptibility. *Journal of Mountain Science*. 2022. Vol. 19, issue 6. P. 1670–1698. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7254-9>.

Muñoz-Torrero Manchado T., Ballesteros-Cánovas J. A., Allen S., Stoffel M. Deforestation controls landslide susceptibility in Far-Western Nepal. *CATENA*. 2022. Vol. 219. Article 106627. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106627>.

Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., Mihir M., Guzzetti F. A review of statistically based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*. 2018. Vol. 180. P. 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>.

Rushchak V., Chepurnyi I. Assessment of Forest Cover Dynamics in Landslide-Prone Areas of the Ukrainian Carpathians using Remote Sensing Data. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2025. Vol. 2025, issue 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510172>.

Schmaltz E. M., Steger S., Glade T. The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. *Geomorphology*. 2017. Vol.290. P. 50–264. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.024>.

Wang Y., Wen H., Sun D., Li Y. Quantitative Assessment of Landslide Risk Based on Susceptibility Mapping Using Random Forest and GeoDetector. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, issue 13. Article 2625. <https://doi.org/10.3390/rs13132625>.

Yamazaki D., Ikeshima D., Sosa J., Bates P. D., Allen G. H., Pavelsky T. M. MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55, issue 6. P. 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>.

Zanaga D., Van De Kerchove R., De Keersmaecker W. et al. ESA WorldCover 10 m 2020 v100 [Data set]. Zenodo, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>.

References

Harbar, O. V., Veselska, E. V., Khomiak, I. V., & Harbar, D. A. (2024). Prostorovo-chasovi zminy struktury zemelnogo pokryvu Slovechansko-Ovrutskoho kriazhu [Spatio-temporal changes in the land cover structure of the Slovechansko-Ovruch Ridge]. *Український журнал природничих наук [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, (7), 197–209. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.22> [in Ukrainian].

Davybida, L. I. (2021). Analiz mozhlyvosti i dosvidu vykorystannia platformy Google Earth Engine dlia vyrishennia zadach monitorynhu dovkillia [Analysis of capabilities and experience of using Google Earth Engine platform for environmental monitoring challenges]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia [Ecological Safety and Balanced Use of Resources]*, 12(2), 75–86. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86) [in Ukrainian].

Informatsiyni shchorichnyk shchodo aktyvizatsii nebezpechnykh ekzohennykh heolohichnykh protsesiv za danymy monitorynhu EHP [Information yearbook on the activation of hazardous exogenous geological processes according to EGP monitoring data]. (2021). Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine; State Scientific and Production Enterprise “State Information Geological Fund of Ukraine” [in Ukrainian].

Kuzmenko, E. D. (ed.) (2016). *Prohnozuvannia zsuviv: monohrafiia* [Landslide forecasting: monograph]. Ivano-Frankivsk: Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas [in Ukrainian].

Oreshchenko, A. V. (2022). Analiz heomorfolohichnykh kharakterystyk hirskolyzhnykh tras dlia otsinky turystychnoho potentsialu Ukrainykh Karpat [Analysis of geomorphological characteristics of ski slopes for assessing the tourism potential of the Ukrainian Carpathians]. *Український журнал природничих наук [Ukrainian Journal of Natural Sciences]*, (1), 123–142. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.1.2023.123-142> [in Ukrainian].

Chepurnyi, I., Rushchak, V., & Chepurna, T. (2024). Spatial Analysis of the Relationship between the Distribution of Landslide Areas and Forest Cover. *International Conference of Young Professionals*

«GeoTerrace-2024» (Vol. 2024, Issue 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510017> [in English].

Davybida, L. (2025). Remote sensing and Google Earth Engine for Regional Landslide Assessment in the Carpathians. *5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities* (Vol. 2025, Issue 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520018> [in English].

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031> [in English].

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693> [in English].

Ivanyshyn, V., & Kasiyanchuk, D. (2024). Analysis of the Impact of Climate Change on the Vegetation of the Perehinsk Territorial Community in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7(2), 199–215. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.070210> [in English].

Kasiyanchuk, D., & Shtohryn, L. (2021). Assessment of the Ecological Risks of Landslide Damages in the Carpathian Region. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 4(3), 52–61. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.040306> [in English].

Kovalchuk, I., Mykhnovych, A., Pylypovych, O., & Rudko, G. (2013). Extreme Exogenous Processes in the Ukrainian Carpathians. In D. Łoczy (Ed.), *Geomorphological Impacts of Extreme Weather* (pp. 53–66). Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6301-2_4 [in English].

Lima, P., Steger, S., Glade, T., & Murillo-García, F. G. (2022). Literature review and bibliometric analysis on data-driven assessment of landslide susceptibility. *Journal of Mountain Science*, 19(6), 1670–1698. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7254-9> [in English].

Muñoz-Torrero Manchado, T., Ballesteros-Cánovas, J. A., Allen, S., & Stoffel, M. (2022). Deforestation controls landslide susceptibility in Far-Western Nepal. *CATENA*, 219, 106627. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106627> [in English].

Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, 180, 60–91. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001> [in English].

Rushchak, V., & Chepurnyi, I. (2025). Assessment of Forest Cover Dynamics in Landslide-Prone Areas of the Ukrainian Carpathians using Remote Sensing Data. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2025, Issue 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510172> [in English].

Schmaltz, E. M., Steger, S., & Glade, T. (2017). The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. *Geomorphology*, 290, 250–264. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.024> [in English].

Wang, Y., Wen, H., Sun, D., & Li, Y. (2021). Quantitative Assessment of Landslide Risk Based on Susceptibility Mapping Using Random Forest and GeoDetector. *Remote Sensing*, 13(13), 2625. <https://doi.org/10.3390/rs13132625> [in English].

Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A high-resolution global hydrography map based on latest topography dataset. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873> [in English].

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, L., Tsendbazar, N. E., ... Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100* [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936> [in English].

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)