

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Рушак Володимир Олегович

УДК 502.5:624.131.5:528.8:004.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**ГЕОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ
З ВРАХУВАННЯМ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ТЕРИТОРІЇ**

101 – «Екологія»

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 В. О. Рушак

Науковий керівник Чепурний Ігор Валерійович, кандидат геологічних наук, доцент

АНОТАЦІЯ

Рушак В. О. Геоекологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з врахуванням стану лісового покриву території.

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – «Екологія», галузь знань 10 – «Природничі науки». Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання геоекологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території шляхом теоретичного узагальнення, розроблення та практичної апробації комплексної методики моделювання зсувної сприйнятливості (Landslide Susceptibility Assessment, далі – LSA), у якій лісовий покрив уперше виокремлено як самостійний структурний блок із кількісною параметризацією на прикладі території досліджень у межах Українських Карпат.

Актуальність теми зумовлена потребою в науково обґрунтованому оцінюванні зсувної небезпеки гірських територій, де традиційні підходи до врахування лісового покриву не відображають його реального впливу на стійкість схилів. Зсувні процеси належать до провідних екзогенних геологічних процесів Українських Карпат: найбільш поширеними тут є мілкі зсуви-спливи у флішових товщах, що активізуються під час інтенсивних атмосферних опадів. Флішова геологічна будова з характерними літологічними неоднорідностями, середньогірський рельєф із крутизною схилів 20–40°, висока річна сума опадів (понад 1200 мм для базового полігону) та значна антропогенна трансформація лісів у період 2000–2010 рр. у сукупності формують комплекс передумов розвитку небезпечних схилових явищ. Водночас у чинних регіональних моделях зсувної сприйнятливості лісовий покрив здебільшого враховується у спрощеному бінарному вигляді «ліс / не ліс», що є недостатнім для Карпатського регіону з його високою лісистістю (50–70 %) та значними історичними змінами лісового

покриву. Це обґрунтовує необхідність розроблення комплексного кількісного підходу до параметризації лісу як самостійного блоку моделі та його інтеграції в геоінформаційну оцінку зсувної небезпеки й геоекологічного ризику, що має безпосереднє значення для організації моніторингу, лісогосподарського планування, адаптації до змін клімату та збереження біорізноманіття гірських екосистем.

Метою дисертаційної роботи є розроблення, теоретичне обґрунтування та практична апробація комплексної методики геоекологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву на основі інтегрованої геоінформаційної моделі зсувної сприйнятливості, реалізованої на хмарній платформі Google Earth Engine.

Для досягнення поставленої мети в роботі узагальнено сучасні вітчизняні та міжнародні наукові підходи до оцінювання зсувної сприйнятливості й ролі лісового покриву у формуванні стійкості схилів, виконано фізико-географічну та геоекологічну характеристику території дослідження, запропоновано систему кількісних показників лісового блоку моделі, досліджено просторово-часову динаміку лісового покриву зсувонебезпечних територій за різночасовими супутниковими даними, сформовано інтегровану інформаційну базу на основі кадастрових даних про зсувні прояви та продуктів дистанційного зондування Землі. Обґрунтовано систему факторних характеристик індексної моделі зсувної сприйнятливості, розроблено та реалізовано інтегровану модель зсувної сприйнятливості на платформі Google Earth Engine, виконано перевірку внутрішньої структури набору предикторів методами багатовимірного статистичного аналізу, здійснено валідацію моделі на незалежній тестовій вибірці, а також розроблено комплексну методику геоекологічної оцінки ризику та побудовано підсумкові карти сприйнятливості й ризику.

Об'єктом дослідження є процеси розвитку зсувів, як складової екологічної безпеки Українських Карпат.

Предметом дослідження є геоінформаційні методи моделювання для геоекологічної оцінки ризиків поширення зсувних процесів зумовлених

факторами їх розвитку з урахуванням кількісних характеристик стану лісового покриву території.

Методологічну основу дослідження становить поєднання геоінформаційного аналізу, методів дистанційного зондування Землі та багатовимірного статистичного аналізу. У роботі застосовано системний і порівняльний аналіз наукових джерел, аналіз растрових і векторних просторових даних, буферний аналіз просторового розподілу зсувних проявів, метод частотного співвідношення (Frequency Ratio, далі - FR) для калібрування факторних шарів, метод Random Forest Feature Importance для об'єктивного визначення вагових коефіцієнтів, логістичне калібрування підсумкового індексу з автоматичним визначенням параметрів, а також комплекс багатовимірних статистичних методів - кластерний аналіз K-means, експлораторний факторний аналіз із варімакс-обертанням і метод головних компонент. Усю інформаційну базу інтегровано й опрацьовано на хмарній платформі Google Earth Engine, що забезпечує відтворюваність і масштабованість запропонованого підходу. Дослідження виконано на трьох взаємодоповнювальних полігонах - базовому полігоні розміром 25×25 км у верхів'ях р. Теребля, який містить 236 зсувних проявів, додатковому полігоні у Верховинському районі Івано-Франківщини, де розташовано 190 зсувів та розширеному полігоні 75×75 км у межах Українських Карпат, який містить 1509 зсувних проявів.

У дисертації розроблено інтегровану геоінформаційну модель зсувної сприйнятливості, що ґрунтується на системі факторних характеристик, згрупованих у п'ять тематичних блоків - морфометричний, гідрологічний, лісовий, геологічний та кліматичний. Центральним елементом моделі є лісовий блок, для якого запропоновано систему з шести кількісних показників: близькість до межі лісу, щільність лісового покриву, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу за період 2001–2023 рр. та частка лісу вище по схилу відносно зсувного прояву. Кожен показник описує окремий аспект стану або динаміки лісу й ґрунтується на сучасних глобальних продуктах дистанційного зондування Землі - ESA WorldCover 2021, Hansen Global Forest Change, Copernicus Global

Land Cover CGLS-LC100 та Sentinel-2 Surface Reflectance. Інформаційну базу доповнено цифровою моделлю рельєфу ALOS AW3D30, гідрологічним продуктом MERIT Hydro, а також шарами експозиції населення та забудови (WorldPop, JRC GHSL). Модель реалізує повний цикл оброблення даних - формування навчальної та тестової вибірок за просторово-блоковим принципом, калібрування факторів методом частотного співвідношення, зважене підсумовування з вагами Random Forest, логістичне калібрування на п'ять класів сприйнятливості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному. Вперше науково обґрунтовано та кількісно підтверджено роль лісового покриву як екосистемного чинника регулювання зсувної сприйнятливості гірських територій Українських Карпат. Встановлено, що комплекс кількісних показників стану, структури та просторового положення лісового покриву, визначених за супутниковими даними з використанням хмарної платформи геопросторового моделювання, є статистично значущими факторами розвитку зсувних процесів. Підтверджено закономірність підвищеної приуроченості зсувів до прикрайових зон лісових масивів, що відображає підвищену вразливість перехідних зон між лісовими та безлісовими екосистемами.

Удосконалено підхід до геоінформаційного моделювання зсувної сприйнятливості, який базується на поєднанні методу частотного співвідношення Frequency Ratio для об'єктивного калібрування кожного фактора із алгоритмом машинного навчання Random Forest Feature Importance для визначення вагових коефіцієнтів факторів формування зсувів в Українських Карпатах.

Удосконалено спосіб врахування лісового покриву в моделях зсувної сприйнятливості за допомогою комплексного залучення факторних характеристик, які характеризують його стан та структуру, а саме щільність лісу, близькість до межі лісу, тип лісу .

Дістала подальшого розвитку методика оцінювання ризиків розвитку зсувів, яка передбачає розрахунок ризику для населення та інфраструктури, а також індексу природоохоронного пріоритету територій на основі показника

природоохоронного статусу (NPS), що враховує екологічну цінність та стійкість геосистем і забезпечує просторову пріоритизацію зон моніторингу зсувонебезпечних територій.

Практичну апробацію розробленої методики виконано на експериментальних полігонах в Українських Карпатах. На основі супутникових даних Landsat за 1990–2020 рр. досліджено просторово-часову зміну площ лісистості Закарпатського полігону, яка змінювалася в послідовності 71 % (1990 р.), 69 % (2000 р.), 63 % (2005 р.), 62 % (2010 р.), 67 % (2015 р.) та 70 % (2020 р.), з вираженою деградацією у 2000–2010 рр. і частковим відновленням після 2010 р. Установлено просторову приуроченість зсувних проявів до прикрайових зон лісових масивів, яка полягає у локалізації зсувних процесів до меж лісового покриву, що підтверджує підвищену зсувну сприйнятливість перехідних зон між зімкнутим деревостаном і відкритими територіями. Зокрема 73 % із 1509 задокументованих зсувних проявів приурочено до смуги 0–500 м від межі лісового масиву, переважно всередині лісу. Буферний аналіз підтвердив цю закономірність: 145 із 236 зсувів (61 %) на Закарпатському та 132 із 157 зсувів (84 %) на Івано-Франківському полігоні розташовані в радіусі 100 м від ділянок із порушеннями лісового покриву. Застосування інтегрованої моделі до базового полігону показало, що 40,2 % території належить до класів високої та дуже високої сприйнятливості, а 74,6 % задокументованих зсувів сконцентровано у класах 4–5. Перевірка внутрішньої структури набору предикторів методами багатовимірною статистичного аналізу дала змогу ідентифікувати три латентні фактори - схилово-морфометричний, висотно-гідрографічний та «порушення у лісовому покриві», а кластерний аналіз виокремив чотири типи зсувних ділянок із середніми значеннями LSA від 0,341 до 0,666. Валідація моделі на незалежній тестовій вибірці засвідчила, що 88,1 % тестових зсувів потрапили до класів середньої, високої та дуже високої сприйнятливості за коефіцієнтів просторового збагачення 2,57 для класу 5 і 1,32 для класу 4 та значень AUC ROC 0,72 (успішність) і 0,69 (прогноз, що відповідає добрій якості моделі. На завершальному етапі у середовищі Google Earth Engine побудовано підсумкові

карти геоекологічного ризику у двох паралельних варіантах - індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення й інфраструктури з квантильною класифікацією та класифікацією на п'ять класів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблена методика та одержані карти сприйнятливості й ризику можуть бути використані для пріоритизації моніторингу зсувонебезпечних територій у межах національної системи моніторингу екзогенних геологічних процесів, обґрунтування лісогосподарських заходів, підтримки рішень із територіального планування, адаптації до змін клімату та збереження біорізноманіття гірських екосистем. Реалізація методики на відкритій хмарній платформі Google Earth Engine з використанням глобально доступних продуктів дистанційного зондування Землі забезпечує її відтворюваність і потенціал масштабування на інші гірські території за умови регіональної адаптації факторних шарів. Одержані результати можуть бути використані органами державного управління та місцевого самоврядування, природоохоронними, лісогосподарськими й планувальними структурами, а також науково-дослідними організаціями у сфері геоекології та моніторингу довкілля.

Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на міжнародних і регіональних науково-практичних конференціях. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, у яких відображено теоретичні, методичні та прикладні результати проведеного дослідження.

Ключові слова: ризик, лісовий покрив, рослинний покрив, зсувні процеси, зсувна сприйнятливість, цифрова модель рельєфу, супутникові дані, геоінформаційні системи і технології, моделювання, дистанційне зондування Землі, дистанційні методи, алгоритм машинного навчання, моніторинг, екологічна безпека.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у фахових наукових виданнях України:

1. Рушак В. О., Чепурний І. В. Геоінформаційний підхід до оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриву та розвитку зсувних процесів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 1 (144). С. 99–109. DOI: 10.32782/1995-0519.2024.1.13. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»). *Здобувач сформував цифрові картографічні шари лісового покриву за даними топографічних карт і глобальних геопорталів (ЕС JRC, Global Forest Change), виконав картометричні операції з визначення відстані від зсувів до межі лісу та щільності лісового покриву, провів просторовий геоінформаційний аналіз і опрацював статистичні розподіли отриманих параметрів; І. В. Чепурний здійснив постановку задачі, сформував методику геоінформаційного аналізу чинників зсувоутворення та перевірів коректність отриманих результатів.*

2. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка динаміки лісового покриву зсувонебезпечних територій Українських Карпат із використанням платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2025. № 2 (59). С. 146–150. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.есо.2-59.22. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»). *Здобувач реалізував обробку часових серій супутникових знімків на платформі Google Earth Engine, розрахував показники динаміки лісового покриву (NDVI, площі втрат і відновлення лісу за 2001–2023 рр.) у межах зсувонебезпечних територій, виконав їх просторовий аналіз і картографування; І. В. Чепурний здійснив постановку задачі, обґрунтував методику оцінювання динаміки лісового покриву та перевірів достовірність одержаних результатів.*

3. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка схильності території у межах Українських Карпат до розвитку зсувних процесів за даними дистанційного зондування та платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2026. № 1 (64). С. 197–203. DOI: 10.32846/2306-9716/2026.есо.1-64.27. (Видання включено до

Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»). *Здобувач сформував набір факторних шарів за даними дистанційного зондування, виконав моделювання схильності території до зсувних процесів методом частотного відношення на платформі Google Earth Engine та провів валідацію одержаної моделі; І. В. Чепурний здійснив постановку задачі, сформував методiku оцінювання зсувної схильності та перевірів коректність результатів моделювання.*

4. Рушчак В. О. Геоєкологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території (на прикладі ділянки в басейні р. Тересля, Українські Карпати). Український журнал природничих наук. 2026. № 16. С. 356–365. DOI: 10.32782/naturaljournal.16.2026.32. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»). *Публікація одноосібна, усі результати геоєкологічного оцінювання ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву одержано здобувачем особисто.*

Тези наукових конференцій:

5. Chepurnyi I., Fedyk Ya., Chepurna T., Rushchak V. Geoinformatics Modeling of Hydrological Parameters on the Example of the Prut River Basin Within the Ivano-Frankivsk Region. 16th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November 2022. Vol. 2022. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580252 (Scopus).

6. Федик Я., Рушчак В. О., Чепурний І. В. Моделювання гідрологічних параметрів на прикладі басейну р. Прут в межах Івано-Франківської області за допомогою ГІС. Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання електроенергії на навколишнє середовище [Електронне видання] : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 24–25 листопада 2022 р.) / за заг. ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. С. 68–72.

7. Chepurna T., Haydeychuk A., Chepurnyi I., Fedyk Y., Rushchak V. Geoinformation analysis of mudflow danger and threat assessment for bridge structures within the territory of Transcarpathia. International Conference of Young

Professionals «GeoTerrace-2023», 2023. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2023510017 (Scopus).

8. Рушчак В. О., Чепурний І. В. Аналіз стану лісового покриву та оцінка його взаємозв'язку з розвитком зсувних процесів на прикладі території в межах Українських Карпат. Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи : зб. тез доповідей III Міжнар. інтернет-конф. (м. Харків, 26 квітня 2024 р.). Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 130–132.

9. 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, iss. 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2024510017.

10. 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, iss. 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510172.

11. Рушчак В. О. Геоінформаційна оцінка зсувної сприйнятливості та ризиків з урахуванням природоохоронного статусу територій. Світ наукових досліджень : матеріали Міжнар. мультидисциплінарної наук. інтернет-конф., м. Тернопіль (Україна) – м. Ополе (Польща), 2026. Вип. 54. URL: <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/6972/>

ABSTRACT

Rushchak V. O. Geoecological Risk Assessment of Landslide Development Taking into Account the State of the Forest Cover of the Territory.

Qualification scientific work presented as a manuscript.

Dissertation submitted for the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 – "Ecology", field of knowledge 10 – "Natural Sciences". Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2026.

The dissertation addresses the topical scientific and applied problem of the geoecological assessment of landslide-development risks with account for the state of forest cover, through theoretical generalization, development, and practical validation of an integrated methodology for modeling landslide susceptibility, in which forest cover is, for the first time, distinguished as a self-contained structural block with quantitative parameterization, using a study area within the Ukrainian Carpathians as a case study.

The relevance of the topic stems from the need for a scientifically grounded assessment of landslide hazard in mountainous areas, where traditional approaches to accounting for forest cover do not reflect its actual influence on slope stability. Landslide processes are among the leading exogenous geological processes of the Ukrainian Carpathians: the most widespread are shallow translational landslides (so-called "slide-flows") in flysch formations, which are activated during intense precipitation. The flysch geological structure with its characteristic lithological heterogeneities, mid-mountain relief with slope gradients of 20–40°, high annual precipitation (over 1200 mm at the base test site), and substantial anthropogenic transformation of forests during 2000–2010 together constitute a set of preconditions for the development of hazardous slope phenomena. At the same time, in current regional landslide-susceptibility models forest cover is mostly accounted for in a simplified binary "forest / non-forest" form, which is insufficient for the Carpathian region with its high forest cover (50–70%) and significant historical changes in forest cover. This justifies the need to develop an integrated quantitative approach to parameterizing forest as a self-contained model block and to integrate it into the

geoinformation assessment of landslide hazard and geoecological risk - a task of direct importance for organizing monitoring, forest-management planning, climate-change adaptation, and biodiversity conservation of mountain ecosystems.

The aim of the dissertation is to develop, theoretically substantiate, and practically validate an integrated methodology for the geoecological assessment of landslide-development risks with account for the state of forest cover, based on an integrated geoinformation model of landslide susceptibility implemented on the Google Earth Engine cloud platform.

To achieve this aim, the work generalizes current national and international scientific approaches to assessing landslide susceptibility and the role of forest cover in shaping slope stability; provides a physical-geographical and geoecological characterization of the study area; proposes a system of quantitative indicators for the forest block of the model; investigates the spatiotemporal dynamics of forest cover in landslide-prone areas using multitemporal satellite data; and compiles an integrated information base from cadastral data on landslide occurrences and Earth remote-sensing products. The system of factor characteristics of the index-based landslide-susceptibility model is substantiated; an integrated landslide-susceptibility model is developed and implemented on the Google Earth Engine platform; the internal structure of the predictor set is examined using multivariate statistical methods; the model is validated on an independent test sample; and a comprehensive methodology for geoecological risk assessment is developed, with final susceptibility and risk maps produced.

The object of research is the processes of landslide development as a component of the environmental safety of the Ukrainian Carpathians.

The subject of research is geoinformation modeling methods for the geoecological assessment of the risks of landslide spread driven by their development factors, with account for the quantitative characteristics of the state of the territory's forest cover.

The methodological basis of the research is a combination of geoinformation analysis, Earth remote-sensing methods, and multivariate statistical analysis. The work

applies systematic and comparative analysis of scientific sources; analysis of raster and vector spatial data; buffer analysis of the spatial distribution of landslide occurrences; the frequency ratio method for calibrating factor layers; the Random Forest Feature Importance method for the objective determination of weight coefficients; logistic calibration of the final index with automatic parameter determination; and a set of multivariate statistical methods - K-means cluster analysis, exploratory factor analysis with varimax rotation, and principal component analysis. The entire information base was integrated and processed on the Google Earth Engine cloud platform, ensuring the reproducibility and scalability of the proposed approach. The study was carried out at three complementary test sites: a base test site of 25×25 km in the upper reaches of the Tereblyia River, containing 236 landslide occurrences; an additional test site in the Verkhovyna district of Ivano-Frankivsk region, where 190 landslides are located; and an extended test site of 75×75 km within the Ukrainian Carpathians, containing 1509 landslide occurrences.

The dissertation develops an integrated geoinformation model of landslide susceptibility based on a system of factor characteristics grouped into five thematic blocks - morphometric, hydrological, forest, geological, and climatic. The central element of the model is the forest block, for which a system of six quantitative indicators is proposed: proximity to the forest edge, forest-cover density, forest type, NDVI amplitude, forest loss over 2001–2023, and the proportion of forest upslope relative to the landslide occurrence. Each indicator describes a particular aspect of the state or dynamics of the forest and is based on current global Earth remote-sensing products - ESA WorldCover 2021, Hansen Global Forest Change, Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100, and Sentinel-2 Surface Reflectance. The information base is supplemented by the ALOS AW3D30 digital elevation model, the MERIT Hydro hydrological product, and population and built-up exposure layers (WorldPop, JRC GHSL). The model implements a complete data-processing cycle: formation of training and test samples according to a spatial-block principle, calibration of factors using the frequency ratio method, weighted summation with Random Forest weights, and logistic calibration into five susceptibility classes.

The scientific novelty of the obtained results is as follows. For the first time, the role of forest cover as an ecosystem factor regulating landslide susceptibility in the mountainous areas of the Ukrainian Carpathians has been scientifically substantiated and quantitatively confirmed. It has been established that a set of quantitative indicators describing the condition, structure, and spatial configuration of forest cover, derived from satellite data using a cloud-based geospatial modelling platform, represents statistically significant predictors of landslide processes. A consistent pattern of increased landslide occurrence along forest edge zones has been confirmed, reflecting the heightened vulnerability of transition zones between forested and non-forested ecosystems.

The geoinformation-based modelling approach for landslide susceptibility assessment has been improved through the integration of the Frequency Ratio method for objective calibration of individual factors and the Random Forest Feature Importance machine learning algorithm for determining factor weights influencing landslide occurrence in the Ukrainian Carpathians.

The method of incorporating forest cover into landslide susceptibility models has been further refined through the integrated use of factor characteristics describing its condition and structure, namely forest density, proximity to forest edges, and forest type.

The methodology for assessing landslide risk has been further developed by introducing a framework for calculating risk to population and infrastructure, as well as a Nature Protection Status (NPS) index. This index accounts for ecological value and the resilience of geosystems and enables spatial prioritization of monitoring zones in landslide-prone areas.

Practical validation of the developed methodology was carried out at experimental test sites in the Ukrainian Carpathians. Using Landsat satellite data for 1990–2020, the spatiotemporal dynamics of forest cover at the Zakarpattia test site were studied; the forest-cover ratio changed in the sequence 71% (1990), 69% (2000), 63% (2005), 62% (2010), 67% (2015), and 70% (2020), with pronounced degradation in 2000–2010 and partial recovery after 2010. The spatial association of landslide

occurrences with the edge zones of forest massifs was established, consisting in the localization of landslide processes toward the boundaries of forest cover and confirming the increased landslide sensitivity of transitional zones between closed-canopy stands and open areas. In particular, 73% of the 1509 documented landslide occurrences are confined to the 0–500 m belt from the forest edge, predominantly inside the forest. Buffer analysis confirmed this regularity: 145 of 236 landslides (61%) at the Zakarpattia site and 132 of 157 landslides (84%) at the Ivano-Frankivsk site are located within a 100 m radius of areas with forest-cover disturbances. Application of the integrated model to the base test site showed that 40.2% of the territory belongs to the high and very high susceptibility classes, while 74.6% of the documented landslides are concentrated in classes 4–5. Examination of the internal structure of the predictor set using multivariate statistical methods made it possible to identify three latent factors - slope-morphometric, elevation-hydrographic, and "forest-cover disturbance" - while cluster analysis distinguished four types of landslide sites with mean LSA values ranging from 0.341 to 0.666. Validation of the model on an independent test sample showed that 88.1% of the test landslides fell into the medium, high, and very high susceptibility classes, with spatial enrichment ratios of 2.57 for class 5 and 1.32 for class 4 and AUC ROC values of 0.72 (success rate) and 0.69 (prediction rate), corresponding to good model quality. In the final stage, final geoecological risk maps were produced in the Google Earth Engine environment in two parallel variants - a nature-conservation priority index and risk to population and infrastructure - using quantile classification and classification into five classes.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the developed methodology and the resulting susceptibility and risk maps can be used to prioritize the monitoring of landslide-prone areas within the national monitoring system for exogenous geological processes, to substantiate forest-management measures, to support spatial-planning decisions, and to facilitate climate-change adaptation and biodiversity conservation of mountain ecosystems. Implementation of the methodology on the open Google Earth Engine cloud platform, using globally available Earth remote-sensing products, ensures its reproducibility and its potential

for scaling to other mountainous areas, subject to regional adaptation of the factor layers. The obtained results can be used by state-administration and local self-government bodies, by environmental, forest-management, and planning institutions, and by research organizations in the field of geoecology and environmental monitoring.

The main provisions and results of the dissertation have been presented at international and regional scientific and practical conferences. Ten scientific works have been published on the topic of the dissertation, reflecting the theoretical, methodological, and applied results of the conducted research.

Keywords: risk, forest cover, vegetation cover, landslide processes, landslide susceptibility, digital terrain model, satellite data¹²⁴, geographic information systems and technologies, modeling, remote sensing of the Earth, remote methods, machine learning algorithm, monitoring, environmental safety.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП	21
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ	30
1.1 Поширення та активізація зсувів в Україні та світі	30
1.2 Методи дослідження розвитку зсувних процесів	36
1.3 Врахування лісового фактору у методологіях моделювання розвитку зсувонебезпеки	40
1.4 Вплив кліматичних змін на активізацію зсувних процесів	45
1.5 Аналіз втрати біорізноманіття через зсуви	48
1.6 Існуючі підходи до моніторингу розвитку зсувів та оцінки ризиків їх розвитку	50
Висновки до розділу 1	55
РОЗДІЛ 2. ЗСУВНІ ТА ЕРОЗІЙНІ ЯВИЩА ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОЗВИТКУ В УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТАХ	58
2.1 Оцінка механізму розвитку зсувних та ерозійних явищ	58
2.2 Фізико-географічна характеристика території дослідження	62
2.3 Геолого-тектонічні умови	68
2.4 Гідрогеологічні умови та вплив гідрологічних змін на ерозію і зсуви	74
2.5 Моделювання зсувних процесів за допомогою геоінформаційних систем	79
2.6 Застосування дистанційного зондування для вивчення зсувів та ерозії	82
Висновки до розділу 2	85
РОЗДІЛ 3. ЛІСОВИЙ ПОКРИВ ЯК ЧИННИК РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ТА ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ	88
3.1 Фактор впливу рослинності на розвиток зсувних процесів	88
3.2 Вплив вирубки лісів на розвиток зсувних процесів. Оцінка впливу лісу на	

	17
поверхневий стік на схилах	91
3.3 Оцінка проблеми достовірності даних про лісові ресурси. Оцінка можливості використання даних ДЗЗ	96
3.4 Результати оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриття та розвитку зсувних процесів	108
3.5 Просторово-часові зміни лісових масивів у Карпатському регіоні	114
Висновки до розділу 3	116
РОЗДІЛ 4. ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СХИЛЬНОСТІ ТЕРИТОРІЇ ДО РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ЛІСОВОГО ФАКТОРА	119
4.1 Індексна модель зсувної сприйнятливості (LSA)	119
4.2 Обґрунтування факторних характеристик та створення наборів даних для розрахунку зсувної сприйнятливості	127
4.2.1 Система факторних характеристик моделі	128
4.2.2 Формування морфометричних факторів	131
4.2.3 Формування гідрологічного фактора	134
4.2.4 Формування лісових факторів	135
4.2.5 Формування геологічних факторів	143
4.2.6 Формування кліматичного фактор	144
4.2.7 Технічна реалізація факторних шарів на Google Earth Engine	144
4.2.8 Обґрунтування вибору факторів для моделювання з метою усунення мультиколінеарності та малоінформативних предикторів	147
4.3 Результати моделювання сприйнятливості території до розвитку зсувних процесів з урахуванням лісового фактора	152
4.3.1 Калібрування факторних шарів методом частотного співвідношення	154
4.3.2 Багатовимірний статистичний аналіз факторів	157
4.3.3 Random Forest Feature Importance для визначення вагових коефіцієнтів	164
4.3.4 Формування інтегральної карти LSA та її класифікація	169

	18
4.4 Прогнозна оцінка ймовірності зсувної сприйнятливості	172
4.4.1 Валідація моделі на незалежній тестовій вибірці	175
4.4.2 ROC-аналіз та площа під кривою (AUC)	176
4.4.3 Перевірка моделі на другому (контрольному) полігоні (Верховина)	179
4.4.4 Просторова інтерпретація карти LSA та практичне значення	184
4.4.5 Обмеження моделі та напрями її вдосконалення	185
Висновки до розділу 4	186
РОЗДІЛ 5. ГЕОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ	
ТЕРИТОРІЇ	189
5.1 Методологічні основи оцінки ризику для зсувонебезпечних територій	189
5.2 Підхід до формування блоку просторової експозиції	194
5.3 Формування блоку вразливості населення	196
5.4 Природоохоронний статус території (NPS) на основі WDPA	197
5.5 Розрахунок інтегральних показників індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення	205
5.5.1 Індекс природоохоронного пріоритету	205
5.5.2 Ризик для населення та інфраструктури	208
5.6 Практичні рекомендації з використання результатів моделювання для геоекологічного управління територіями Карпатського регіону	212
Висновки до розділу 5	215
ВИСНОВКИ	218
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	223
ДОДАТКИ	240

ПЕРЕЛІК ТЕРМІНІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

Скорочення та аббревіатури

Скорочення	Розшифрування
ГІС	геоінформаційні системи
ДЗЗ	дистанційне зондування Землі
ДНВП	Державне науково-виробниче підприємство
ЕГП	екзогенні геологічні процеси
НПП	національний природний парк
ПЗФ	природно-заповідний фонд
ПСВ	поверхневий стік води
РСА	радіолокація із синтезованою апертурою
ЦМР	цифрова модель рельєфу
ЮНЕСКО	Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури
AUC	Area Under the Curve
CGLS-LC100	Copernicus Global Land Service – Land Cover 100 m
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project (phase 6)
EFA	Exploratory Factor Analysis
ER	Enrichment Ratio
ESA	European Space Agency
FR	Frequency Ratio
GEE	Google Earth Engine
GFW	Global Forest Watch
GHSL	Global Human Settlement Layer
GLAD	Global Land Analysis and Discovery
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPM IMERG	Global Precipitation Measurement
Hansen GFC	Global Forest Change
InSAR	Interferometric SAR
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUCN	International Union for Conservation of Nature
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JRC	Joint Research Centre
K-means	k-means clustering
KMO	Kaiser–Meyer–Olkin
LSA	Landslide Susceptibility Assessment
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NPS	Nature Protection Status

Скорочення	Розшифрування
PCA	Principal Component Analysis
RF	Random Forest
ROC	Receiver Operating Characteristic
ROI	Region of Interest
SAR	Synthetic Aperture Radar
UNDRR	UN Office for Disaster Risk Reduction
UNEP-WCMC	UN Environment – World Conservation Monitoring Centre
USGS	United States Geological Survey
WDPA	World Database on Protected Areas

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Тема «Геоєкологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території» є актуальною у контексті сучасних викликів, що постають перед Карпатським регіоном у сфері захисту від природних небезпек, сталого природокористування та адаптації до кліматичних змін.

Українські Карпати являють собою унікальну природно-територіальну систему, де гірський рельєф, складна геологічна будова, підвищена зволоженість та інтенсивні антропогенні впливи формують комплекс передумов для активізації екзогенних геологічних процесів. Серед них зсуви посідають провідне місце за поширенням, частотою виявів і масштабом наслідків. За даними Державного науково-виробничого підприємства «Геоінформ України», у межах гірської та передгірської частин Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської та Чернівецької областей зареєстровано понад 20 тисяч зсувних проявів, причому їх кількість та активність мають тенденцію до зростання, особливо у періоди екстремальних атмосферних опадів.

Зсувні процеси призводять до значних матеріальних збитків, руйнують інженерну інфраструктуру – автомобільні та залізничні дороги, трубопроводи, лінії електропередач, житлові та господарські будівлі у високогірних населених пунктах. Водночас вони порушують природні ландшафти, знищують лісові насадження, змінюють гідрологічний режим водотоків, посилюють ерозійно-акумулятивні процеси у річкових басейнах, призводять до локальної втрати біорізноманіття. Катастрофічні наслідки паводків 1998, 2001 та 2008 років, значною мірою спричинених активізацією зсувних та селевих процесів, яскраво демонструють потребу в розвитку методів оцінювання та прогнозування зсувної небезпеки на регіональному рівні.

Одним із найменш досліджених аспектів регіонального моделювання зсувної сприйнятливості в Українських Карпатах залишається роль лісового покриву. З одного боку, ліс традиційно розглядається як стабілізуючий чинник: кореневі системи забезпечують механічне армування приповерхневої товщі,

деревостан регулює інфільтрацію та поверхневий стік, крони перехоплюють частину опадів. З іншого боку, численні факти свідчать, що зсуви активно розвиваються як на заліснених, так і на знелісених ділянках, причому особливо вразливими є прикрайові зони лісу – перехідна смуга між зімкнутим деревостаном та відкритими ділянками. Масштабна антропогенна трансформація лісового покриву Карпат, що охопила у першу чергу період 2000–2010 років, суттєво змінила просторову структуру лісу, що, у свою чергу, вплинуло на розподіл зсувної небезпеки.

У більшості чинних регіональних моделей зсувної сприйнятливості лісовий покрив враховується спрощено – як бінарний показник «ліс / не ліс» або як один із компонентів маски земного покриву. Такий підхід не відображає ані просторову структуру лісу, ані його динаміку, ані характер взаємного розташування лісових масивів і схилів, ані типологічний склад деревостану. Для Карпатського регіону це спрощення є особливо критичним, оскільки саме структурні характеристики лісу – фрагментація, близькість до межі, динаміка втрат, породний склад – суттєво впливають на формування зсувної небезпеки і на довгострокову стабільність гірських екосистем.

Зміни клімату XXI століття посилюють актуальність теми. Згідно з Шостим оціночним звітом Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (IPCC AR6), у Центральній та Східній Європі протягом останніх десятиліть спостерігається чітка тенденція до зростання частоти й інтенсивності екстремальних опадових подій. Для Карпатського регіону це означає збільшення кількості тригерних подій, що ініціюють активізацію мілких зсувів, та зростання навантаження на природоохоронні системи. Опосередкований вплив клімату проявляється також через стрес на деревостани (масові всихання смереки, ентомологічні пошкодження), що функціонально еквівалентно вирубкам і призводить до втрати стабілізуючої функції лісу на значних територіях.

Зсувні процеси спричиняють суттєві наслідки для біорізноманіття гірських екосистем. Активізація зсувів знищує деревостани, порушує ґрунтовий покрив, змінює мікрорельєф, ізолює популяції чутливих видів рослин і тварин.

Відновлення порушених зсувами екосистем у гірських умовах триває десятки й сотні років, а у низці випадків є незворотним. Це робить геоекологічний підхід до оцінки зсувного ризику принципово важливим для природоохоронної політики Карпатського регіону, що містить унікальну мережу природно-заповідних територій, зокрема, Карпатський біосферний заповідник, Карпатський національний природний парк, національний природний парк «Синевир» та інші.

Поряд із цим, сучасний розвиток дистанційного зондування Землі та хмарних геоінформаційних платформ, насамперед Google Earth Engine, відкриває нові можливості для кількісної оцінки лісового покриття на великих територіях із використанням довгих часових рядів супутникових даних. Поєднання цих можливостей із класичними підходами до моделювання зсувної сприйнятливості та з методами багатовимірної статистичної аналізу створює передумови для розробки нового покоління моделей, у яких лісовий фактор розглядається не як допоміжний шар, а як самостійний структурний блок із кількісною параметризацією.

Отже, актуальність дисертаційного дослідження визначається:

- вагомою роллю зсувних процесів у формуванні геоекологічних ризиків Карпатського регіону;
- недостатнім рівнем врахування лісового покриття у чинних методиках регіонального моделювання зсувної небезпеки;
- потребою в адаптації сучасних геоінформаційних підходів до вітчизняної практики оцінки природних небезпек;
- посиленням кліматичного тиску на природні системи Карпат;
- необхідністю збереження біорізноманіття гірських екосистем в умовах зростаючих антропогенних і природних впливів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу у 2022-2026 рр. відповідно до наукової теми “Геоекологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з врахуванням стану лісового покриття території”.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є обґрунтування, розробка та апробація методичного підходу до геоecологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів у гірських районах Українських Карпат з урахуванням кількісних характеристик стану лісового покриву.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан наукових досліджень у галузі оцінювання зсувної сприйнятливості, небезпеки та ризику, визначити місце й спосіб врахування лісового покриву у чинних регіональних моделях, узагальнити методи моніторингу та раннього попередження зсувних процесів.

2. Дослідити механізми розвитку зсувних і ерозійних явищ у Карпатському регіоні з урахуванням фізико-географічних, геолого-тектонічних і гідрогеологічних умов, проаналізувати соціоекономічні наслідки цих процесів та стратегії адаптації.

3. Обґрунтувати роль лісового покриву як чинника розвитку зсувних і ерозійних процесів, оцінити вплив вирубки лісів на поверхневий стік, розглянути проблему достовірності даних про лісові ресурси та можливості дистанційного зондування Землі для її вирішення.

4. Дослідити просторово-часову динаміку лісового покриву у межах зсувонебезпечних територій за довгими часовими рядами супутникових даних Landsat (1990–2020 рр.) та встановити кількісні залежності між просторовим розподілом зсувних проявів і характеристиками лісового покриву.

5. Сформувати інформаційну базу дослідження на основі кадастрових даних ДНВП «Геоінформ України» про зсувні прояви та комплексу просторових даних дистанційного зондування Землі для території Українських Карпат.

6. Обґрунтувати систему факторних характеристик індексної моделі зсувної сприйнятливості (LSA) з виокремленням лісового блоку як самостійного структурного компонента.

7. Розробити та реалізувати індексну модель зсувної сприйнятливості території з застосуванням методів Frequency Ratio (для калібрування факторів) та

Random Forest Feature Importance (для визначення вагових коефіцієнтів) на платформі Google Earth Engine.

8. Виконати багатовимірний статистичний аналіз (K-means, кореляційний, факторний, PCA) для перевірки внутрішньої структури набору предикторів моделі.

9. Виконати валідацію моделі на незалежній тестовій вибірці з використанням просторово-блокового принципу поділу вихідних даних.

10. Побудувати карти індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення на основі інтеграції моделі сприйнятливості з блоками просторової експозиції та вразливості, сформулювати практичні рекомендації щодо використання одержаних результатів.

Об'єктом дослідження є процеси розвитку зсувів, як складової екологічної безпеки Українських Карпат.

Предметом дослідження є геоінформаційні методи моделювання для геоекологічної оцінки ризиків поширення зсувних процесів зумовлених факторами їх розвитку з урахуванням кількісних характеристик стану лісового покриву території.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Із загальнонаукових методів використано методи аналізу та синтезу при опрацюванні літературних джерел та обґрунтуванні методичного підходу, порівняння та узагальнення при зіставленні вітчизняних і зарубіжних підходів.

Спеціальні методи включають: картометричний аналіз (для вимірювання відстаней від зсувних проявів до меж лісу та водотоків); описовий статистичний аналіз з побудовою гістограм (для дослідження розподілів зсувів за значеннями факторів), багатовимірний статистичний аналіз – кластерний аналіз K-means, кореляційний аналіз, експлораторний факторний аналіз з варімакс-обертанням, метод головних компонент PCA (для перевірки внутрішньої структури набору факторів), геоінформаційне моделювання (для побудови факторних шарів та інтегрального показника сприйнятливості), дистанційне зондування Землі (для

характеристики лісового покриття), метод частотного співвідношення Frequency Ratio (для калібрування факторів), метод Random Forest Feature Importance (для визначення вагових коефіцієнтів), просторово-блокова крос-валідація (для оцінки якості моделі).

Усі розрахунки виконано на хмарній геоінформаційній платформі Google Earth Engine з використанням розробленого програмного коду, що забезпечує повну відтворюваність результатів.

Інформаційною базою дослідження слугували: кадастрові дані ДНВП «Геоінформ України» про зсувні прояви у Закарпатській та Івано-Франківській областях; цифрова модель рельєфу ALOS AW3D30 (JAXA); гідрографічний набір MERIT Hydro; карти земного покриття ESA WorldCover 2021; глобальний продукт Copernicus Global Land Cover (CGLS-LC100) 2019 з класифікацією типу лісу; продукти Hansen Global Forest Change (GLAD/UMD); часові ряди Landsat 4–9 за 1990–2020 роки; дані Sentinel-2 за 2022 рік; дані WorldPop щодо щільності населення та віково-статевої структури; Global Human Settlement Layer (JRC GHSL) щодо забудови; векторні шари літологічних формацій та тектонічних розломів.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації вирішено актуальне науково-прикладне завдання геоекологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів у гірських районах Українських Карпат з урахуванням стану лісового покриття. Основні результати, що характеризуються науковою новизною:

Вперше науково обґрунтовано та кількісно підтверджено роль лісового покриття як екосистемного чинника регулювання зсувної сприйнятливості гірських територій Українських Карпат. Встановлено, що комплекс кількісних показників стану, структури та просторового положення лісового покриття, визначених за супутниковими даними з використанням хмарної платформи геопросторового моделювання, є статистично значущими факторами розвитку зсувних процесів. Підтверджено закономірність підвищеної приуроченості зсувів до прикорайових зон лісових масивів, що відображає підвищену вразливість перехідних зон між лісовими та безлісовими екосистемами.

Удосконалено підхід до геоінформаційного моделювання зсувної сприйнятливості, який базується на поєднанні методу частотного співвідношення Frequency Ratio для об'єктивного калібрування кожного фактора із алгоритмом машинного навчання Random Forest Feature Importance для визначення вагових коефіцієнтів факторів формування зсувів в Українських Карпатах.

Удосконалено спосіб врахування лісового покриття в моделях зсувної сприйнятливості за допомогою комплексного залучення факторних характеристик, які характеризують його стан та структуру, а саме щільність лісу, близькість до межі лісу, тип лісу .

Дістала подальшого розвитку методика оцінювання ризиків розвитку зсувів, яка передбачає розрахунок ризику для населення та інфраструктури, а також індексу природоохоронного пріоритету територій на основі показника природоохоронного статусу (NPS), що враховує екологічну цінність та стійкість геосистем і забезпечує просторову пріоритизацію зон моніторингу зсувонебезпечних територій.

Практичне значення одержаних результатів. Побудовані карти зсувної сприйнятливості та індексу природоохоронного пріоритету для ділянки у басейні р. Тересва є основою для пріоритизації моніторингу зсувонебезпечних територій Українських Карпат, обґрунтування лісогосподарських заходів на схилах із високою зсувною сприйнятливістю, підтримки рішень із територіального планування, визначення зон першочергового інженерно-геологічного вивчення, збереження біорізноманіття у природно-заповідних територіях регіону, адаптації до кліматичних змін.

Розроблений методичний підхід та створений програмний код на платформі Google Earth Engine є відтворюваними та масштабованими, що дозволяє застосовувати їх для інших зсувонебезпечних територій Українських Карпат за наявності кадастрових даних про зсуви та базових просторових шарів.

Матеріали дисертаційних досліджень впроваджені в освітній процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисциплін: «Експериментальні дослідження в екології» та «Екологічна

безпека паливно-енергетичної галузі України». (Акт впровадження від 20.02.2026 р.).

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є завершеним самостійним дослідженням автора. Здобувачем особисто сформульовано мету та завдання дослідження, обґрунтовано методичний підхід, сформовано інформаційну базу, виконано усі геоінформаційні розрахунки, просторовий та багатовимірний статистичний аналіз, моделювання на платформі Google Earth Engine, проведено валідацію моделі, побудовано карти зсувної сприйнятливості та індексу природоохоронного пріоритету, сформульовано висновки й практичні рекомендації.

У спільних публікаціях внесок здобувача полягав у формуванні просторової бази даних, виконанні геоінформаційного аналізу, побудові картограм та інтерпретації одержаних результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на:

- International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024» (Львів, 2024).
- 18th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» (Київ, 2025).
- регіональній науково-практичній конференції «Молодіжний екогеофорум-2024» (Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2024).
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні проблеми екологічної безпеки» (Івано-Франківськ, 2025).
- наукових семінарах кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (2023–2026).

Публікації. Основні результати і висновки дисертаційного дослідження опубліковано у 4 наукових працях - у фахових наукових виданнях України, 7 – у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний

обсяг дисертації становить 246 сторінок, із них основного тексту 202 сторінки. Робота ілюстрована 58 рисунками та 13 таблицями. Список використаних джерел містить 154 найменування, із них 102 – латиницею.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Поширення та активізація зсувів в Україні та світі

Зсувні процеси є одними із найактивніших і наймасовіших типів екзогенних геологічних процесів (ЕГП), що суттєво впливають на геоекологічний стан гірських, передгірських і прибережних територій. За визначенням, прийнятим у сучасній міжнародній та вітчизняній літературі, зсув – це переміщення гірських порід по схилу під дією сили тяжіння, що відбувається по одній або декількох площинах ковзання внаслідок втрати стійкості схилу [1, 2, 3]. З геоекологічного погляду зсув розглядається не лише як суто геологічне явище, але і як чинник трансформації ландшафтних комплексів, порушення ґрунтового та рослинного покриву, зміни гідрологічного режиму схилів і водотоків.

Поширення зсувних процесів у глобальному масштабі має виражену географічну нерівномірність. За даними Глобального каталогу зсувів NASA (Global Landslide Catalog, GLC), ведення якого розпочато у 2007 році [4], протягом періоду 2007–2017 рр. у світі зареєстровано близько 10,8 тис. зсувних подій, з яких ~2,4 тис. (22 %) мали зафіксовані людські жертви. На рис. 1.1 зображена карта глобального поширення зсувної небезпеки з виділенням гірських систем Європи.

Найбільша частота катастрофічних зсувних подій характерна для тропічних та субтропічних гірських регіонів Південно-Східної Азії (Індонезія, Філіппіни, Непал, Індія), Центральної та Південної Америки, а також для середньовисотних гірських систем Європи – Альп, Апеннін, Піренеїв, Балкан і Карпат [5, 6]. Узагальнений огляд регіонів глобальної зсувної небезпеки наведено у роботах [7] та [5].

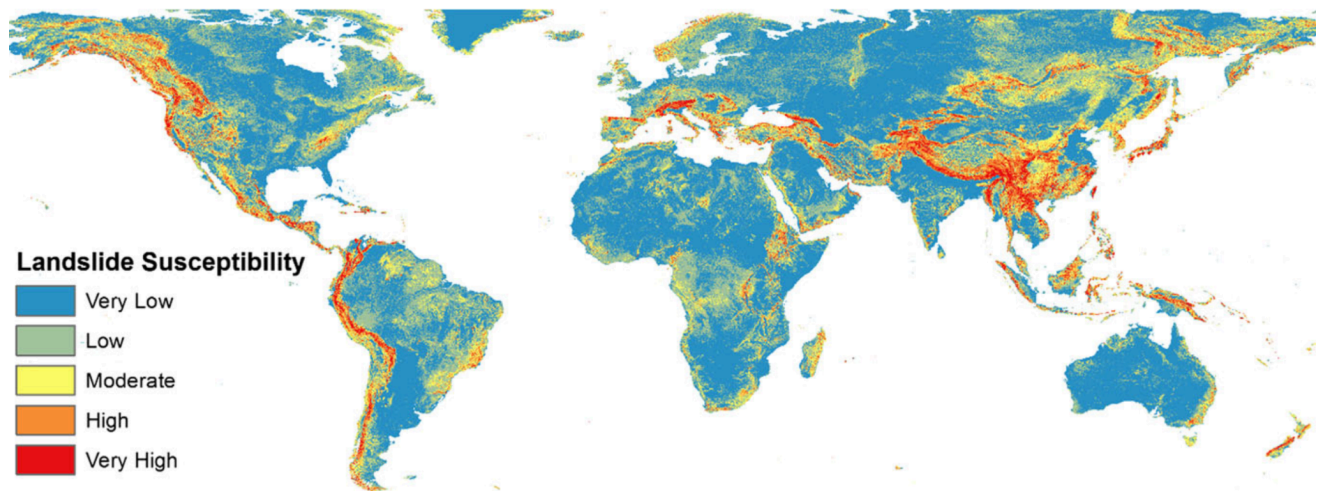


Рисунок 1.1 - Карта глобального поширення зсувної небезпеки (адаптовано за Stanley and Kirschbaum, 2017 [29])

У межах Європи найвища зсувна активність спостерігається в Італії, Швейцарії, Австрії, Франції, а також у країнах Балканського півострова (Сербія, Боснія і Герцеговина, Хорватія) та Карпатського регіону (Україна, Румунія, Словаччина, Польща) [8]. Європейська кадастрова база зсувів ELSUS (European Landslide Susceptibility Map), побудована Об'єднаним дослідницьким центром Європейської комісії (JRC), містить інформацію про десятки тисяч активних зсувних ділянок у межах континенту і є базовим джерелом для регіональних порівняльних досліджень [9]. Просторовий розподіл зсувної сприйнятливості у межах континенту наведено на рис. 1.2. Рівень задокументованості зсувних проявів істотно коливається між країнами: якщо в Італії, Швейцарії та Австрії створено ґрунтовні національні бази даних (IFFI Italy, StorMe Swiss, GEORIOS Austria), то у багатьох країнах Східної Європи, включно з Україною, інвентаризація зсувів є неповною і має регіональний характер [9, 10].

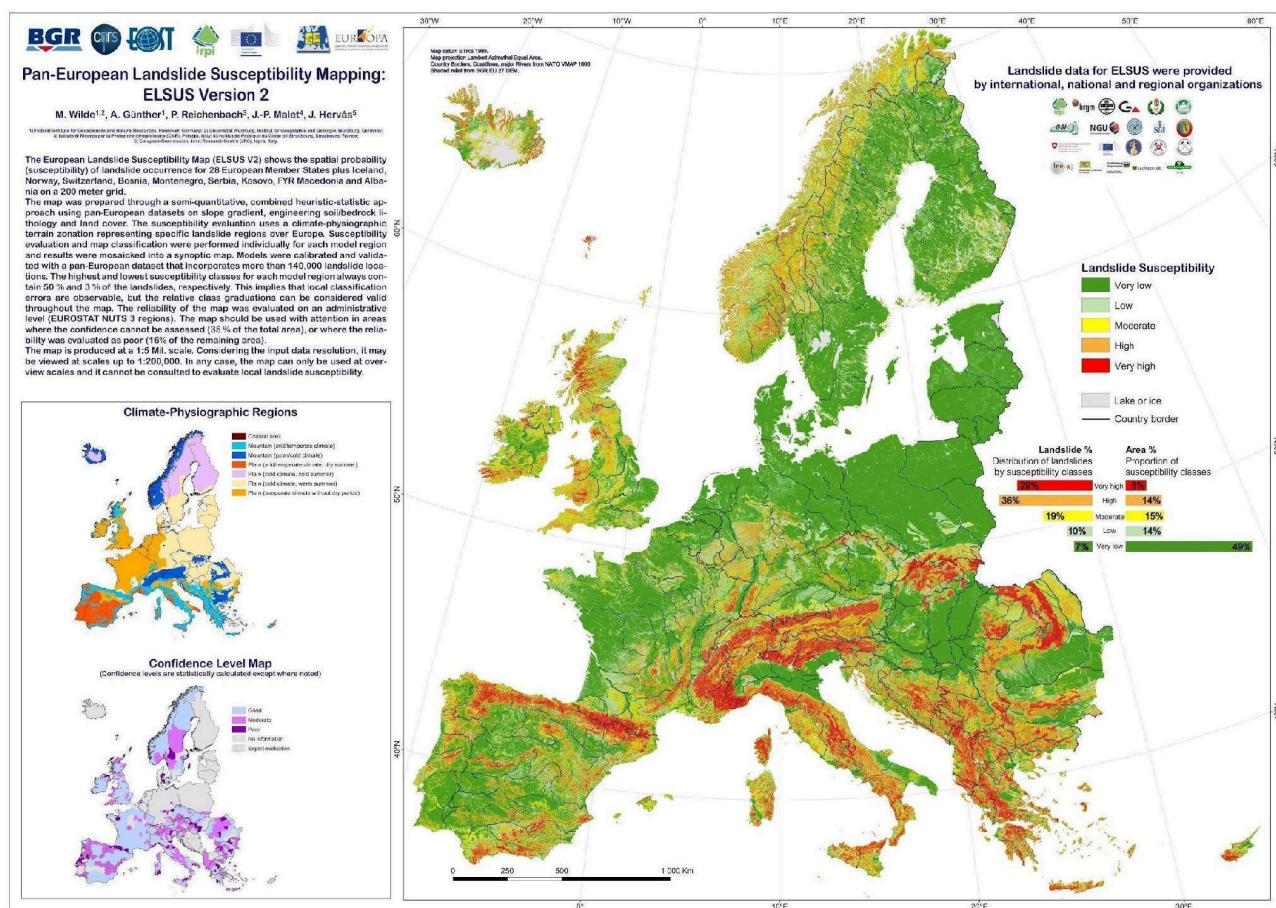


Рисунок 1.2 - Карта зсувної сприйнятливості для території Європи ELSUS Version 2 (за Wilde, Günther, Reichenbach, Malet, Hervás, 2017; Joint Research Centre, European Commission) [9]

Наведена на рис. 1.2 модель ELSUS V2 відображає просторову ймовірність активізації зсувних процесів, отриману за результатами комбінованого евристично-статистичного моделювання на основі європейських наборів даних рельєфу, літології та земного покриву. Доповненням до модельованих оцінок сприйнятливості є каталоги фактично зареєстрованих зсувних подій. Глобальний каталог NASA Global Landslide Catalog (GLC), доступний у хмарному середовищі Google Earth Engine у вигляді просторової колекції за період 1970–2019 рр., містить понад 11 тис. задокументованих подій по всьому світу [4].

Територія Українських Карпат за ступенем ураженості зсувними процесами посідає одне з провідних місць в Україні. За даними Державної служби геології та надр України та ДНВП «Геоінформ України», на території України зафіксовано

понад 22 тисячі активних і потенційно активних зсувних ділянок (рис. 1.3) [10]. Провідна частина їх локалізована у гірській та передгірській зонах Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської і Чернівецької областей. За кількісними характеристиками зсувних проявів Закарпатська область є однією з найбільш уражених територій нашої держави: щільність задокументованих зсувів на одиницю площі сягає 1–3 проявів на квадратний кілометр у найбільш зсувонебезпечних районах (Міжгірський, Тячівський, Хустський, Воловецький) [10, 11].

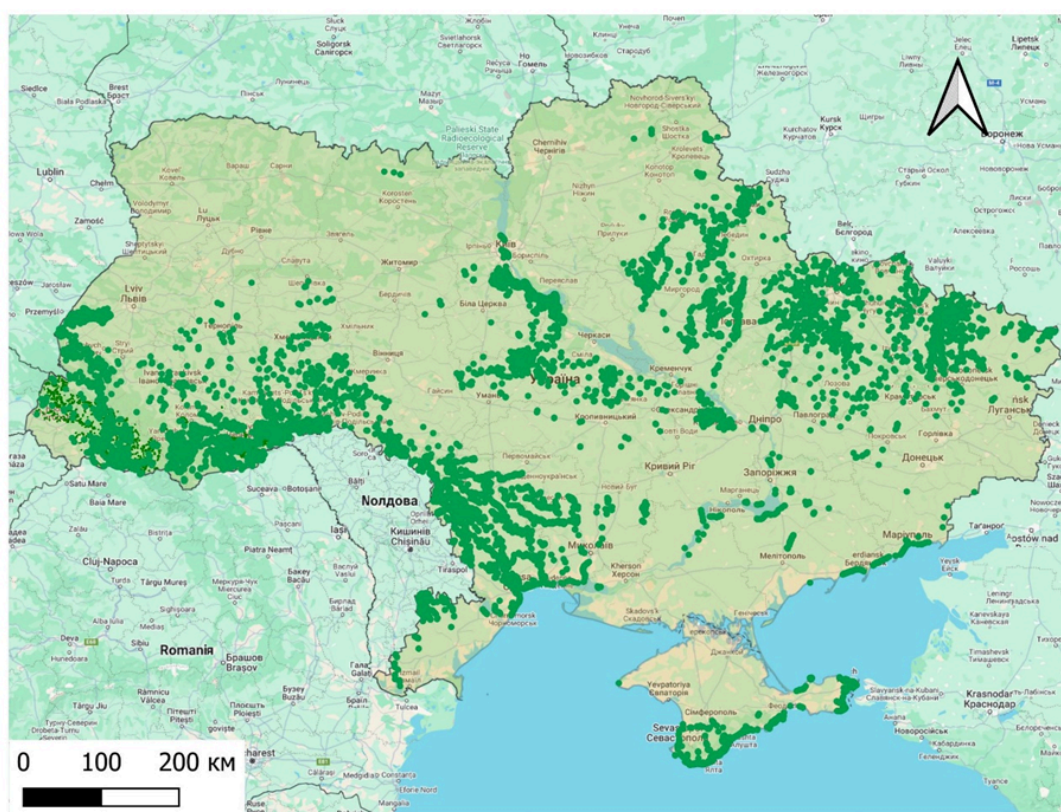


Рисунок 1.3 - Поширення зсувних процесів на території України

Поряд із Карпатським регіоном, значна зсувна активність задокументована у межах Подільської височини, північного Причорномор'я, Криму, а також у долинах Дніпра, Дністра, Південного Бугу [10]. Специфічною особливістю цих територій є переважання зсувів, пов'язаних з ерозійними та абразійними процесами на лесових ґрунтах та на схилах, складених глинистими відкладами. У гірській частині Українських Карпат домінують мілкі зсуви-потоки у флішових

товщах, активізація яких тісно пов'язана з інтенсивними атмосферними опадами [11, 13].

Значний внесок у розвиток вітчизняної школи дослідження зсувних процесів в Україні зроблено у працях Г. І. Рудька [14, 15], Е. Д. Кузьменка зі співавторами [11, 16], О. М. Іванік [17], І. П. Ковальчука [12, 18], О. М. Адаменка [19], М. Д. Круцика [20], Д. В. Касіянчука [21], О. М. Журавля [22]. У монографії за редакцією Е. Д. Кузьменка «Прогнозування зсувів» [11] детально викладено основні закономірності розвитку зсувних процесів на території України, розроблено методики прогнозування та ГІС-моделювання зсувної небезпеки для різних регіонів, у тому числі для Українських Карпат.

Активізація зсувних процесів у часі характеризується значною нерівномірністю з кількома вираженими піками, що припадають на роки з підвищеною опадовою активністю. Для Українських Карпат такими роками були 1947, 1955, 1968, 1970, 1979, 1998, 2001, 2008, 2020. У Карпатському регіоні вагомий вплив на активізацію зсувних процесів мають повені та паводки. Під час паводків 1998 та 2001 років на Закарпатті, одночасно з різким підняттям рівнів води у річках Тиса, Уж, Латориця, Тересля, Ріка відбулася масштабна активізація зсувних процесів на схилах гірських долин. У монографії за ред. Рудька [23] вказано, що під час паводку 1998 року було зафіксовано активізацію понад 350 зсувних проявів у Закарпатській області, ще близько 200 зсувних ділянок перебували у стані критичної рівноваги. Паводок 2008 року в басейні Дністра (Івано-Франківська область) супроводжувався активізацією нових зсувних ділянок.

Сучасні тенденції розвитку зсувних процесів характеризуються не лише кількісним зростанням активізацій, але й розширенням географії їх проявів. За даними щорічних інформаційних звітів ДНВП «Геоінформ України» про стан небезпечних екзогенних геологічних процесів [10], у Карпатському регіоні протягом останніх років реєструється по декілька десятків нових зсувних проявів на рік. Значна їх частина приурочена до антропогенно трансформованих ландшафтів – зон лісгосподарської діяльності, транспортних коридорів, зон

рекреаційного освоєння. Окремою категорією є зсуви, пов'язані з потужними зливами у період травень–липень та серпень–жовтень, тобто у період найвищої атмосферної зволоженості.

Важливим чинником посилення зсувної активності у сучасних умовах є зміни клімату. Згідно з Шостим оціночним звітом Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату IPCC AR6 [24], у Центральній та Східній Європі зафіксовано чітку тенденцію до зростання частоти екстремальних опадових подій. Узагальнюючий огляд зв'язку між змінами клімату та зсувною активністю у глобальному масштабі виконано у праці С. Л. Гаріано і Ф. Гуцетті [25]. У працях Л. М. Архипової [26, 27] показано, що для гідрологічних систем Українських Карпат вплив кліматичних змін є вже помітним і потребує врахування при оцінюванні паводкових та зсувних ризиків.

З погляду геоекологічних наслідків зсувні процеси призводять до руйнування інженерної інфраструктури (дороги, трубопроводи, ЛЕП, житлові та господарські будівлі), знищення лісових насаджень і ґрунтового покриву, порушення гідрологічного режиму водотоків через формування природних гребель та блокування русел, локальної деградації біорізноманіття і порушення міграційних коридорів фауни; погіршення якості поверхневих і підземних вод внаслідок збільшення твердого стоку, соціально-економічних втрат у межах населених пунктів та господарських угідь [15, 19, 23, 28].

Наведені характеристики свідчать, що зсувні процеси в Україні, і зокрема в Українських Карпатах, є однією з найбільш серйозних природних небезпек, яка вимагає системного геоекологічного підходу до її оцінювання, моніторингу та прогнозування. Оптимізація методів регіонального моделювання зсувної сприйнятливості з урахуванням комплексу природних та антропогенних чинників, у тому числі стану лісового покриву, є актуальним науково-практичним завданням.

1.2 Методи дослідження розвитку зсувних процесів

Історія систематичного вивчення зсувних процесів у світовій науці налічує понад півтора століття. Початковий етап, що охопив другу половину XIX – першу половину XX століть, характеризувався переважно описово-класифікаційним підходом: досліджувалися окремі великі зсувні події, формувалися перші класифікації, встановлювалися типи механізмів руху. Основи сучасної механіки ґрунтів закладено у класичних працях К. Терцагі [30], що дозволило формалізувати умови рівноваги схилу через співвідношення сил зсуву і тертя у потенційних площинах ковзання.

У сучасній міжнародній літературі для класифікації зсувних процесів найбільш широко застосовується підхід, який наведений у [2] та [31]. Згідно з цією класифікацією, зсуви поділяються на класи залежно від характеру руху матеріалу: падіння, перекидання, ковзання, поширення, потоки та складні рухи. У рамках кожного типу виокремлюють підкласи за матеріалом (скельні породи, уламковий матеріал, земля, глина) і за швидкістю руху (від повільних – менше 1,6 м/рік – до надзвичайно швидких, понад 5 м/с). Класифікація Хунгра 2014 р. на сьогодні є стандартом для наукових публікацій у галузі зсувних досліджень.

У вітчизняній класифікаційній традиції зсуви поділяють за декількома ознаками: за масштабом, віком, швидкістю руху, характером механізму, генетичним типом [11, 14, 15]. Для території Українських Карпат особливе значення має генетична класифікація за Г. І. Рудьком [14], що виокремлює деляпсивні (зсуви ковзання), детрузивні (зсуви потоки) та складні (комбіновані) типи. Переважною більшістю активних зсувних проявів у гірських районах Карпат є мілкі зсуви-потоки.

Сучасні методи дослідження зсувних процесів можна умовно поділити на декілька груп залежно від мети, масштабу та характеру отримуваної інформації.

Польові (інженерно-геологічне картування, буріння, геодезичні спостереження за переміщеннями схилу), геофізичні (електричне та сейсмічне зондування, георадар) і лабораторні методи (визначення фізико-механічних властивостей ґрунтів для розрахунку фактора стійкості схилу методом граничної

рівноваги) забезпечують детальну та надійну інформацію про конкретні зсувні ділянки, проте є ресурсоємними і мають обмежене застосування на регіональному рівні, оскільки потребують детальних геолого-геотехнічних даних для кожного елемента великої території [14, 32, 33, 34].

Методи регіонального статистичного моделювання зсувної сприйнятливості є на сьогодні найбільш поширеним інструментом для картування зсувонебезпечних територій у масштабі регіонів і країн. Ці методи базуються на використанні уявлення про комплексну природу активізації розвитку зсувних процесів. Зсувний процес відбувається під впливом комплексу факторів активізації, які є просторовими та часовими. У таблиці 1.1 [11] наведено перелік просторово-часових факторів утворення зсувів та їхньої можливої активізації. При просторовому регіональному прогнозі зсувних процесів, тобто при рішенні задач просторового розподілу зсувів головним завданням є визначення області можливого їхнього виникнення та розвитку, а також спрямованості процесу й інтенсивності його прояву на досліджуваній території. Такі оцінки ґрунтуються на урахуванні впливу на стійкість території різних природно-техногенних факторів [11].

Комплексне врахування впливу факторів стало особливо ефективне при використанні геоінформаційних технологій та статистичних методів, при цьому основною проблемою є оцінка ступеня впливу конкретного фактора у вигляді вагових коефіцієнтів. У сучасній міжнародній літературі виокремлено кілька основних напрямів встановлення ступеня впливу факторів розвитку зсувних процесів (рис. 1.4):

1. Евристичні (експертні) методи – експертне присвоєння ваг факторам на основі досвіду дослідників, або методом аналізу ієрархій АНР Т. Сааті [35, 36]. До переваг належить простота застосування, до недоліків – суб'єктивність і обмежена відтворюваність.

2. Статистичні (емпіричні) методи – біваріантний частотний аналіз Frequency Ratio [37], метод інформаційної цінності Information Value, логістична

регресія [36, 38]. Ці методи забезпечують об'єктивне калібрування факторних шарів на основі кадастрових даних про зсуви.

Таблиця 1.1 – Оцінка просторово-часових факторів утворення зсувів та їхньої можливої активізації [11]

№п/п	Групи факторів	Напрямок впливу при утворенні зсувів
Постійні		
1	1. Структурно-геологічні. 2. Наявність тектонічних форм. 3. Тип порід верхньої зони геологічного середовища. 4. Рельєф (величина кута нахилу схилу).	Розвиток різних типів зсувів. Активізація прояву при впливі техногенних факторів.
Повільнозмінні		
2	1. Сейсмічні (3-4 бали).	Можливість зрушення окремих зсувів, зміни морфології, перерозподіл напруг у зсувному масиві.
	2. Багаторічні зміни клімату та кількості опадів (3 – 5 – 10 – 17 років).	Регіональна та зональна диференціація розміщення зсувів зі збільшенням їхньої кількості на окремих ділянках.
	3. Підвищення рівня ґрунтових вод (до критичних глибин (2-5 метрів)).	Додаткові зволоження та перезволоження схилу та зсуву, селевих об'єктів, зменшення міцності та зчеплення ґрунтів тектонічних зон.
	4. Періодичне повторення високих паводків.	Локальна активізація абразії, зниження стійкості берегових схилів, порушення профілю річкових русел і балансу ґрунтових мас.
	5. Стійке зменшення площі рослинного покриву.	Загальне зниження стійкості схилів, збільшення їх еродованості.
Швидкозмінні		
3	1. Метеорологічні (аномальні опади від 2-3 доби до 1 місяця).	Зниження міцності ґрунтів на схилах, їхньої стійкості.
	2. Кількаразові високі паводки в межах року.	Ерозія берегів, збільшення кута нахилу, зниження стійкості схилу.
	3. Сейсмічні поштовхи більше 5 балів.	Активізація тектонічних структур, зрушення та рух порід, можливість появи сейсмодислокацій.



Рисунок 1.4 - Методи прогнозування зсувних процесів моделювання зсувної сприйнятливості

3. Методи машинного навчання – Random Forest [39], Gradient Boosting, нейронні мережі у останні роки набувають все більшого поширення у моделюванні сприйнятливості територій до розвитку зсувів [40, 41]. У роботах [40] та [41] показано, що Random Forest забезпечує одну з найвищих точностей серед регіональних статистичних моделей зсувної сприйнятливості.

4. Фізичні (детерміністичні) методи – моделі TRIGRS, SHALSTAB, SINMAP, що ґрунтуються на розрахунку показників стійкості схилу з урахуванням гідрологічних умов [42, 99]. Ці моделі забезпечують високу точність локального рівня, однак потребують детальних вхідних даних.

5. Гібридні методи – поєднання декількох підходів, наприклад, FR і Random Forest, АНР і методи нечіткої логіки, фізичні моделі + машинне навчання, дозволяють використати переваги окремих методів у комплексі [41, 43].

Сучасним трендом у галузі регіонального моделювання є широке впровадження даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та хмарних геоінформаційних платформ. Довгі часові ряди Landsat (з 1972 року) і новітні дані Sentinel-2 відкривають нові можливості для характеристики земного покриву, рослинності, гідрологічних параметрів на регіональному рівні [44, 45]. Хмарні платформи, насамперед Google Earth Engine [46], забезпечують безкоштовний доступ до архівів супутникових даних та обчислювальних потужностей, що значно полегшує доступ до сучасних методів регіонального моделювання.

Методичні аспекти використання Google Earth Engine для задач моніторингу довкілля та моделювання зсувної небезпеки в Україні розглянуто у працях [47, 48].

Важливим інструментом багатовимірного аналізу просторових факторів (предикторів) моделі зсувної сприйнятливості є статистичні методи дослідження структури даних, а саме, факторний аналіз з варімакс-обертанням для виокремлення факторних блоків, метод головних компонент (РСА) для оцінки внеску головних градієнтів у структуру даних, кластерний аналіз K-means для типізації зсувних проявів за комбінацією факторних умов. Ці методи активно використовуються у сучасних дослідженнях [49, 50] і застосовуються також у межах цього дисертаційного дослідження для перевірки внутрішньої структури набору предикторів.

Таким чином, сучасний арсенал методів дослідження зсувних процесів є широким і різноманітним - від польових обстежень конкретних ділянок до комплексного регіонального моделювання з використанням даних ДЗЗ і хмарних обчислень. У сучасних регіональних дослідженнях зсувної небезпеки одним з найбільш перспективних підходів є поєднання статистичних методів (Frequency Ratio) з алгоритмами машинного навчання (RF) та багатовимірним статистичним аналізом на хмарній платформі Google Earth Engine, що і реалізовано у рамках даної роботи.

1.3 Врахування лісового фактору у методологіях моделювання розвитку зсувонебезпеки

Рослинний покрив та лісовий покрив зокрема традиційно визнається одним із важливих чинників формування просторового розподілу зсувної небезпеки [51, 52]. Однак спосіб врахування лісу в регіональних моделях зсувної сприйнятливості суттєво варіює залежно від методичного підходу, доступності даних, масштабу дослідження та постановки задачі. Аналіз міжнародних і вітчизняних публікацій останніх двох десятиліть дозволяє виокремити декілька основних підходів до врахування лісового фактора у методологіях моделювання .

У значній частині ранніх регіональних моделей зсувної сприйнятливості (1990-ті – початок 2000-х років) лісовий покрив не включався у набір предикторів взагалі. Модель обмежувалася морфометричними (крутизна, експозиція, висота), гідрологічними (близькість до водотоків, густина ерозійної мережі) та геологічними (літологія, тектоніка) факторами. Іншим підходом є бінарне врахування лісу («ліс /не ліс»). На цьому рівні лісовий покрив враховується у вигляді растрового покриття або векторного шару ГІС з простим виокремленням лісових масивів. Джерелом інформації часто виступають глобальні карти земного покриття з класифікацією «ліс» як окремим класом (наприклад, ESA WorldCover, ESA CCI Land Cover). Такий підхід простий у реалізації та поширений у багатьох регіональних моделях [52, 53]. Його обмеженням є відсутність врахування внутрішньої структури лісових масивів, динаміки змін, щільності деревного покриття, породного складу.

Ще одним підходом є врахування щільності лісового покриття, що передбачає використання неперервного показника залісненості у відсотках (0–100 %) та відображає частку пікселя (комірки растра), покриту деревостаном. Прикладом джерела таких даних про лісові масиви є продукт Hansen Global Forest Change (GFC) [54], який надає інформацію про щільність деревного покриття на 2000 рік та щорічні втрати з 2001 року. Щільність лісу вважається помірно корисним фактором зсувної сприйнятливості, особливо з точки зору врахування стабілізуючої функції лісу на зсувонебезпечних схилах [55].

Врахування динаміки лісового покриття є новим підходом щодо оцінки його впливу на розвиток зсувних процесів. Оцінка динаміки лісового покриття на достовірному рівні стала можливою у останні десятиліття у зв'язку з розвитком сучасних методів дистанційного зондування Землі з використанням супутникових даних. Площі лісових масивів та їх видовий склад змінюється у результаті вирубок, насаджень, пожеж, деградації деревостанів і це безумовно впливає на стійкість схилів, особливо у гірських та передгірських регіонах. Ці процеси є вагомим складовою екологічної безпеки територій. Дуже часто масову активізацію зсувних процесів пов'язують саме з вирубкою лісів. Оцінка динаміки

лісового покриву на основі оброблення даних дистанційного зондування Землі включає параметри втрат лісу за певний часовий період, приросту лісу, частоти пожеж, інтенсивності санітарних рубок. Цей підхід є методично продуктивним, оскільки саме динамічні характеристики лісу (порушення, вирубки) мають прямий зв'язок зі зсувною активізацією через ефект «вікна підвищеної нестійкості» після вирубок [56, 57]. Праці [58] та [59] продемонстрували, що врахування історії вирубок суттєво підвищує прогностну здатність регіональних моделей.

Комплексна кількісна параметризація лісу через набір показників передбачає одночасне використання декількох характеристик лісового покриву – щільності, близькості до межі лісу, фрагментації, динаміки, структурних параметрів. Цей підхід є найбільш сучасним і дозволяє перейти від одновимірної до багатовимірної характеристики лісу як структурного блоку моделі. Праці [60, 61], а також дослідження авторів [62, 63, 147-150] демонструють його ефективність для різних типів гірських регіонів. Описані підходи систематизовано у вигляді таблиці 1.2.

Окремим важливим аспектом є врахування типу лісового покриву (породного складу деревостану). У міжнародній літературі показано, що механічна та гідрологічна роль лісу у стабілізації схилів істотно залежить від породного складу: листяні деревостани з глибокою кореневою системою (бук, дуб) забезпечують ефективніше армування приповерхневої товщі, ніж хвойні породи з неглибокою кореневою системою (смерека, ялина); вічнозелені хвойні деревостани підтримують стабільнішу транспірацію протягом року, тоді як листяні демонструють сезонну мінливість з піком у вегетаційний період [58, 64]. Однак у регіональних моделях для території України врахування типу лісу здійснювалося рідко, що пов'язано з обмеженою доступністю відповідних глобальних продуктів ДЗЗ.

Таблиця 1.2 - Підходи до врахування лісового фактора у регіональних моделях зсувної сприйнятливості

Підхід	Параметризація лісу	Джерело даних	Приклади робіт
1. Повне ігнорування	Лісовий покрив не включається у модель	—	Ранні роботи 1990-х рр.
2. Бінарне врахування	Маска "ліс / не ліс"	ESA CCI LC, MODIS LC	Van Westen et al. (2008)
3. Щільність лісу	Відсоткова щільність деревного покриву	Hansen GFC	Stokes et al. (2014)
4. Динаміка лісу	Втрати лісу за період, приріст	Hansen GFC	Moos et al. (2016); Schmaltz et al. (2017)
5. Комплексна параметризація (підхід дисертації)	6 показників: щільність, межа, тип, NDVI-амплітуда, втрати, ліс вище схилом	ESA WorldCover, Hansen GFC, Copernicus CGLS, Sentinel-2	Muñoz-Torrero et al. (2021); Rushchak, Chepurnyi (2025)

Поява глобального продукту Copernicus Global Land Cover (CGLS-LC100) [65], що містить атрибут тип лісу з п'ятьма класами, який стосується (вічнозелених хвойних, вічнозелених листяних, хвойний, широколистяний, змішаний ліс) та інтегральним класом «невідомий/нелісовий», відкрила можливість кількісного врахування типу лісу у регіональних моделях. У даному дисертаційному дослідженні цей продукт вперше застосовано для території Українських Карпат як окремий предиктор зсувної сприйнятливості, що калібрується категоріальним методом Frequency Ratio.

Показник близькості до межі лісу – це перехідна зона між зімкнутим деревостаном і відкритою територією, де одночасно змінюються гідрологічний режим (припиняється інтерцепція та транспірація), структура коренів (розрідження кореневої мережі на 1–5 м від межі), антропогенні впливи (концентрація лісових доріг, волоків, сільськогосподарських угідь). Праці Е. Шмальца [59] для Австрійських Альп та статті авторів Рушак В., Чепурний І. [62,

63] для Українських Карпат показали значну просторову приуроченість зсувних проявів до прикорайових зон лісу.

Параметр частки лісу вище по схилу, який запропонований у даному дисертаційному дослідженні, обчислюється як середня залісненість у межах кругового вікна радіусом 500 м з обмеженням за умовою більшої абсолютної висоти відносно центрального пікселя. Його методична ідея полягає у тому, що стан лісового покриву у верхній частині водозбору істотно впливає на гідрологічний режим нижніх частин схилу через регулювання поверхневого і підповерхневого стоку. Поєднання цього показника з традиційними параметрами лісового блоку підвищує інформативність моделі у гірських районах із складною топографічною структурою.

У вітчизняній геоекологічній школі оцінка ролі лісового покриву як стабілізуючого фактору у гірських екосистемах розглянута у працях В. І. Парпана, Ю. С. Шпарика [66, 67], С. М. Стойка [68], М. А. Голубця [69]. Однак врахування ролі лісового покриву власне як фактора розвитку зсувних процесів - у вигляді окремих кількісних факторних характеристик у структурі моделей зсувонебезпеки - до недавнього часу в українській практиці не здійснювалося. Дана дисертаційна робота є однією з перших спроб такого підходу для території Українських Карпат з використанням кількісних показників стану лісового покриву.

На основі виконаного огляду можна сформулювати такі висновки щодо врахування лісового фактора у методологіях моделювання зсувної небезпеки:

- сучасний світовий тренд полягає у переході від бінарного або одновимірного врахування лісу до комплексної багатовимірної параметризації;
- ключовими показниками лісового блоку виступають: щільність деревного покриву, близькість до межі лісу, втрати лісового покриву, тип лісу, частка лісу вище по схилу, амплітуда сезонних вегетаційних індексів;
- для Українських Карпат задача комплексного врахування лісового фактора у регіональних моделях зсувної сприйнятливості є методично новою і розглядається в рамках даної дисертаційної роботи;

– методичною основою для такого розв'язання є поєднання методу Frequency Ratio (для об'єктивного калібрування кожного лісового предиктора) та Random Forest Feature Importance (для визначення вагових коефіцієнтів) на платформі Google Earth Engine.

1.4 Вплив кліматичних змін на активізацію зсувних процесів

Зміни клімату у XXI столітті є одним із провідних чинників, що безпосередньо та опосередковано впливають на розподіл, частоту та інтенсивність зсувних процесів у гірських регіонах світу. Науковий консенсус щодо кліматичних трендів сформульовано у Шостому оціночному звіті Міжурядової групи експертів з питань зміни клімату (IPCC AR6) [24]: у Центральній та Східній Європі за останні десятиліття спостерігається статистично значуще зростання середньорічних температур повітря, збільшення частоти екстремальних опадових подій, зміна режиму сніготанення у гірських районах та загальна перебудова атмосферної циркуляції [75, 76]. Для території Українських Карпат ці тренди мають прямий прояв: середня температура повітря зросла на 0,8–1,2 °C за період 1961–2020 років, кількість днів з опадами понад 20 мм збільшилася в 1,3–1,5 раза, зафіксовано зростання частоти багатоденних опадових епізодів з кумулятивними сумами понад 100 мм [24, 25, 26, 27].

Узагальнюючий огляд впливу змін клімату на зсувні процеси у глобальному масштабі виконано у фундаментальній праці С. Л. Гаріано та Ф. Гуцетті «Landslides in a changing climate» [25]. У цій роботі систематизовано декілька основних механізмів кліматичного впливу на зсувну активність.

Більшість зсувних процесів у Карпатському регіоні активізується під час інтенсивних або тривалих атмосферних опадів, коли приповерхнева товща ґрунту насичується вологою, зростає поровий тиск і знижуються ефективні напруження у потенційних площинах ковзання. Перевищення порогових значень «інтенсивність-тривалість» опадів, емпірично встановлених у класичних працях Н. Кейна [70] і деталізованих у роботі Ф. Гуцетті зі співавторами [71], призводить до активізації мілких зсувів. Зі зростанням частоти екстремальних опадових подій

внаслідок змін клімату порогові умови активізації досягаються частіше, що веде до загального зростання зсувної активності. У роботі [72] на матеріалах Італії показано, що порогові умови активізації зсувів за останні 30 років змістилися у бік менших значень, тобто зсуви активізуються навіть при менш інтенсивних опадах, ніж раніше.

Зміна сезонного розподілу опадів. Для Центральної та Східної Європи характерним є поступовий перехід від тривалих помірних опадів до коротких інтенсивних злив, що відбиває зростання нестабільності атмосферної циркуляції. Короткі інтенсивні опади (добова сума понад 50 мм за декілька годин) створюють умови для швидкого водонасичення приповерхневої товщі і сприяють активізації мілких зсувів-сплавів, що є домінантним типом зсувних проявів у Карпатах. У працях Л. М. Архипової [26, 27] задокументовано, що для басейну р. Прут за період 2000–2015 років зафіксовано збільшення кількості випадків, коли добова сума опадів перевищувала 40 мм, з одночасним зменшенням тривалості опадових епізодів.

Підвищення температур у зимовий та ранньовесняний періоди призводить до раннього початку сніготанення, його високої інтенсивності та збільшення тривалості періодів, коли приповерхнева товща знаходиться у водонасиченому стані. Ці ефекти особливо виражені у гірських районах Карпат, де традиційно сніговий покрив зберігався протягом 5–7 місяців у високогір'ї. За даними спостережень, тривалість стійкого снігового покриву в Українських Карпатах за останні десятиліття скоротилася на 10–20 діб, з одночасним почастищенням випадків передчасного танення [26, 73].

Кліматичні зміни впливають на стан і життєздатність лісових екосистем Карпат через декілька взаємопов'язаних механізмів, таких як посилення водного стресу деревостанів у посушливі літні періоди, активізацію ентомологічних і фітопатологічних шкідників, почастищення буревіїв та вітровалів, зсув меж висотних поясів рослинності. Масштабні всихання смерекових деревостанів у Карпатах, задокументовані у працях Ю. С. Шпарика [66], є значною мірою кліматично зумовленим процесом, що функціонально еквівалентний масовим

вирубкам лісу з погляду втрати стабілізуючої функції деревостану на схилах. Опосередкований вплив клімату на зсуви через деградацію лісів у Карпатах є кумулятивним і накопичується протягом десятиліть [58, 66].

Кліматичні зміни впливають на гідрологічний режим малих водозборів Карпатського регіону через зміну співвідношення «опад-стік-інфільтрація». Високі пікові витрати під час злив призводять до активізації ерозійних процесів у руслах малих водотоків, підмивання підоснов схилів, формування локальних концентраторів стоку, що у комплексі створюють передумови для активізації зсувів [25, 28, 74].

Для моделювання просторово-часової динаміки активізації зсувних процесів у контексті кліматичних змін доцільно використовувати такі інформаційні ресурси:

CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) – глобальні дані щодо опадів з просторовою розрізненністю $0,05^\circ$ та часовим кроком 1 день, що охоплює період з 1981 року [77]. CHIRPS поєднує супутникову інформацію з даними наземних метеостанцій і є одним з найбільш точних глобальних продуктів для моніторингу режиму опадів у гірських районах.

GPM IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) – супутникові дані щодо опадів від NASA з просторовою розрізненністю $0,1^\circ$ і часовим кроком 30 хв, доступний з 2000 року [78]. Особливо цінний для ретроспективного аналізу екстремальних опадових подій. У межах цього дослідження, де оцінюється статична просторова сприйнятливість території, а не динаміка окремих тригерних подій, кліматичний вплив враховано через багаторічну норму річної суми опадів WorldClim bio12 (просторова розрізненність близько 1 км) як показник орографічного режиму зволоження.

Таким чином, зміни клімату у Центральній та Східній Європі є значним чинником посилення зсувної активності у гірських регіонах, і зокрема в Українських Карпатах. Вплив кліматичних змін реалізується як через прямі механізми (екстремальні опади, зміна сніготанення), так і через опосередковані (трансформація лісового покриву, зміна режиму стоку). Для ефективного

управління зсувними ризиками у довгостроковій перспективі необхідно враховувати кліматичні тренди при плануванні моніторингу, лісогосподарських заходів та територіального розвитку гірських районів Карпатського регіону.

1.5 Аналіз втрати біорізноманіття через зсуви

Зсувні процеси у гірських регіонах світу є важливим чинником трансформації природних екосистем і мають значний, часто недооцінений вплив на біорізноманіття. У роботах з екології гірських ландшафтів Дж. Елмквіста, М. Фольке [79] та Л. Уокера і А. Шилз [80, 82] показано, що зсуви виконують подвійну роль у біорізноманітті: з одного боку, вони є природним механізмом порушення екосистем, а з іншого – при певних масштабах та частоті вони можуть призводити до локальної втрати видів, деградації функціональної структури угруповань, ізоляції популяцій.

При активізації зсуву верхня деформована частина схилу зазвичай повністю руйнується: деревостан знищується, ґрунтовий покрив відривається і транспортується вниз по схилу. У Карпатах мілкі зсуви-сплави можуть одномоментно знищити деревостан на площі від десятків квадратних метрів до декількох гектарів. Великі зсувні комплекси після катастрофічних подій (1998, 2001, 2008 рр.) охоплювали десятки гектарів [23].

На зсувному тілі формуються нові мікрокліматичні умови – інша інсоляція, вітровий режим, вологозабезпеченість – що відрізняються від навколишніх незміщених ділянок. Це призводить до формування специфічних рослинних угруповань, які можуть істотно відрізнятися від сукцесійно зрілих деревостанів регіону [81, 82]. Зміна гідрологічного режиму (формування локальних западин, перекриття водотоків, утворення тимчасових заболочених ділянок) створює нові екосистеми, що заселяються специфічними водно-болотними видами.

Фрагментація та ізоляція популяцій. Великі зсувні комплекси формують лінійні або площинні бар'єри у цілісній структурі лісового масиву, що може призводити до фрагментації популяцій чутливих видів (великих хижих ссавців, лісових птахів, хребетних, пов'язаних із великорозмірною мертвою деревиною). У

Карпатах особливо вразливими у цьому відношенні є популяції бурого ведмедя, рисі, вовка, глухаря, тетерука, рябчика, а також ендемічних видів карпатської фауни [68, 69, 83].

Зсув знищує не лише видиму рослинність, але й приповерхневий горизонт ґрунту з усім насіннєвим банком і ґрунтовою біотою (мікориза, дощові черви, ентомологічна фауна). Відновлення повноцінної ґрунтової біоти у гірських умовах може тривати від 30 до 100 років, причому цей процес значною мірою залежить від наявності джерел реколонізації у прилеглих непорушених ділянках [84].

Тривалість відновлення рослинного покриву. Сукцесійні процеси на зсувних тілах у гірських районах Карпат досліджувалися у роботах [68] та [85]. Показано, що первинна стадія відновлення рослинного покриву триває 2–5 років (піонерні трав'янисті рослини), чагарникова стадія – 10–20 років (верба козяча, береза пухнаста, ліщина), формування деревостану близького до зонального – 50–100 років і більше. Повне відновлення до стану, характерного для зональних типів лісу, може тривати декілька поколінь деревостанів, тобто 150–300 років.

У контексті оцінки впливу зсувів на біорізноманіття особливе значення має концепція функціонального біорізноманіття. У працях М. А. Голубця [69, 86] обґрунтовано принципи дослідження біотичної різноманітності гірських екосистем Карпат, підкреслено багаторівневий характер біорізноманіття (генетичне, видове, екосистемне, функціональне) і необхідність комплексного його вивчення. Зсувні процеси впливають одночасно на всі ці рівні: знищують генетичне різноманіття у межах знищених популяцій, видовий склад змінюється, формуються нові екосистемні конфігурації, а функціональні процеси (регулювання стоку, утримання ґрунту, продукування органічної речовини) порушуються на десятки-сотні років.

Важливим аспектом є вплив зсувних процесів на природно-заповідні території Карпатського регіону. У межах Карпатського біосферного заповідника, Карпатського національного природного парку, національного природного парку «Синевир», «Сколівські Бескиди», Ужанського національного природного парку та інших об'єктів природно-заповідного фонду зафіксовано численні зсувні

прояви, що безпосередньо впливають на охоронювані природні комплекси. Моніторинг цих впливів є частиною загальної роботи природоохоронних установ з контролю стану охоронних об'єктів [87].

З позицій геоекологічного підходу до збереження біорізноманіття, для Карпатського регіону принципово важливим є поєднання трьох стратегій управління:

1. Мінімізація антропогенних чинників, що посилюють зсувну активність (обмеження суцільних рубок, раціональне планування дорожньої мережі, контроль над рекреаційним навантаженням).

2. Моніторинг зсувних процесів у межах природно-заповідних територій з урахуванням їх впливу на ключові охоронювані види та екосистеми.

3. Планування ділянок захисту та відновлення з урахуванням зсувної небезпеки, включно з визначенням пріоритетних зон для природного поновлення деревостанів.

Геоекологічна оцінка ризиків зсувних процесів у рамках дисертаційного дослідження безпосередньо пов'язана з задачами збереження біорізноманіття гірських екосистем - карти зсувної сприйнятливості та індексу природоохоронного пріоритету дозволяють об'єктивно пріоритизувати території захисту, визначати зони особливої вразливості природних екосистем, обґрунтовувати природоохоронну політику у межах природно-заповідних територій Карпатського регіону.

1.6 Існуючі підходи до моніторингу розвитку зсувів та оцінки ризиків їх розвитку

Сучасні технології моніторингу та раннього попередження зсувних процесів є ключовим елементом управління зсувними ризиками на всіх рівнях – від окремих активних зсувних ділянок до регіональних систем попередження. Розвиток цих технологій у XXI столітті зробив можливим кількісне відстеження стану зсувонебезпечних територій з високою просторовою і часовою

розрізненістю, а також формування автоматизованих систем попередження, здатних виявляти активізацію зсувних процесів у реальному часі.

Класифікація сучасних технологій моніторингу зсувних процесів може бути здійснена за кількома критеріями – за просторовим масштабом (локальні, регіональні, глобальні), за часовою розрізненістю (періодичні, постійні, реального часу), за принципом вимірювання (наземні, дистанційні, комбіновані), за типом вимірюваної змінної (зсувні переміщення, вологість ґрунту, опади) [88, 89]. Схема комплексної системи моніторингу та раннього попередження зсувних процесів з інтеграцією наземних, дистанційних та модельних компонентів наведена на рис. 1.5.

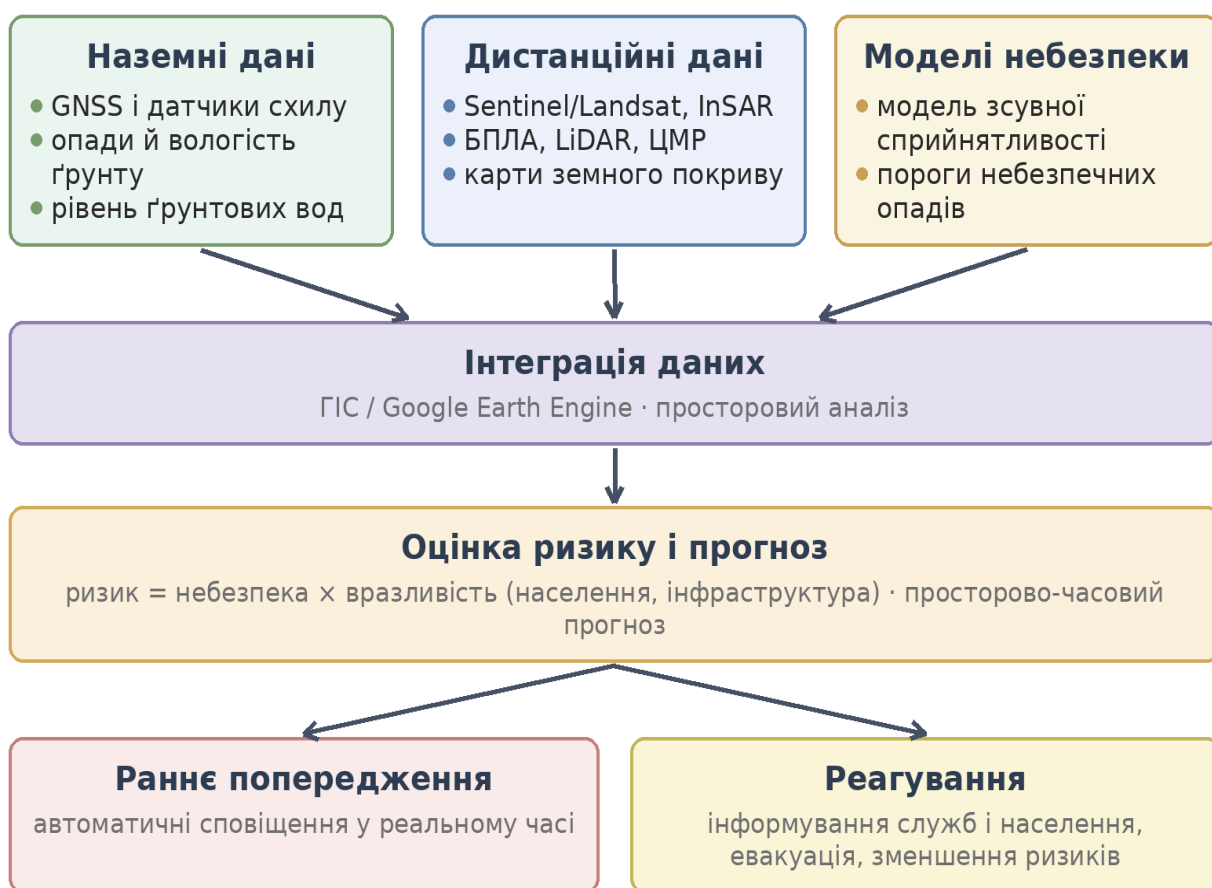


Рисунок 1.5 - Схема комплексної системи моніторингу та раннього попередження зсувних процесів з інтеграцією наземних, дистанційних та модельних компонентів

Наземні геодезичні методи моніторингу включають тахеометричні спостереження за реперами, встановленими у межах зсувної ділянки,

нівелювання, GNSS-спостереження (GPS, ГЛОНАСС, Galileo). Сучасні GNSS-реператори з RTK-корекцією забезпечують точність вимірювання горизонтальних переміщень до 5–10 мм і вертикальних – до 10–20 мм у реальному часі. Для активних зсувних ділянок у межах населених пунктів Карпат такий рівень точності є достатнім для раннього виявлення активізації [88].

Інклінометричні та екстензометричні спостереження у свердловинах, пробурених у межах зсувного тіла, дозволяють фіксувати деформації на різних глибинах і виявляти положення потенційної площини ковзання. Додатково встановлюються тензometri для вимірювання тиску ґрунтових вод, термодатчики для контролю температурного режиму, давачі акустичної емісії для виявлення мікротріщин. Такі комплексні системи моніторингу встановлюються на найбільш небезпечних активних зсувних ділянках у межах великих населених пунктів та поблизу стратегічних інженерних об'єктів [89, 90].

Дистанційні методи моніторингу можна розділити на декілька основних груп:

Інтерферометричний синтетичний апертурний радар (InSAR) – одна з найпотужніших сучасних технологій для моніторингу повільних зсувних рухів у масштабі регіонів. Використовує фазову різницю між повторюваними радарними знімками однієї території для обчислення переміщень поверхні з міліметровою точністю. Глобально доступні дані Sentinel-1A/B (ЄКА, з 2014 р.) забезпечують регулярне радарне покриття з частотою 6–12 діб [91, 92]. У праці Дж. Колесніков та співавторів [93], Ф. Казанчіан та ін. [92] продемонстровано можливості застосування InSAR для інвентаризації і моніторингу зсувних рухів у гірських районах Європи.

Ортофотозйомка та LiDAR з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Дають детальні моделі рельєфу зсувних ділянок з просторовою розрізненністю до декількох сантиметрів. Повторні зйомки у різні моменти часу дозволяють обчислити балансові карти переміщень ґрунту, що є основою для кількісної оцінки обсягу зсувного матеріалу [94].

Супутникове оптичне зондування (Sentinel-2, Landsat 8/9). Забезпечує регулярний моніторинг змін земного покриття, пов'язаних з активізацією зсувів – знищення рослинності, поява свіжих зсувних тіл, зміна геометрії водотоків. Методики автоматизованої ідентифікації нових зсувних проявів за мультиспектральними даними розроблені у роботі [95].

Оперативні системи раннього попередження про зсуви (EWS) [140] у сучасній міжнародній практиці мають комплексний характер і зазвичай поєднують моніторинг тригерних факторів, моніторинг деформацій поверхні схилів, алгоритми попередження на основі моделей машинного навчання, комунікаційні системи для оповіщення уповноважених служб та населення.

Для території України національна мережа моніторингу екзогенних геологічних процесів функціонує у рамках Державної служби геології та надр України. Інформаційні звіти ДНВП «Геоінформ України» про стан ЕГП [10] містять інформацію про активізацію зсувних проявів за рік, виявлені нові ділянки, стан природних факторів. Однак рівень автоматизації цієї мережі та її інтеграція з сучасними технологіями ДЗЗ є обмеженими порівняно з деякими європейськими країнами, що створює потребу в подальшій модернізації системи моніторингу зсувної небезпеки в Україні.

Якщо моніторинг забезпечує реєстрацію поточного стану зсувонебезпечних територій, то оцінка ризику є інструментом просторово-часової кількісної інтерпретації цього стану з огляду на потенційні негативні наслідки для природних екосистем, населення та інфраструктури. У сучасній міжнародній практиці загальновизнаною є компонентна модель ризику природних небезпек де оперують поняттями небезпеки, яка відображає просторово-часову ймовірність активізації процесу, експозиції, що характеризує концентрацію об'єктів захисту у зоні впливу, вразливості, як оцінки ступеня можливих втрат при заданій інтенсивності впливу [53, 126, 139, 143]. Для зсувних процесів цей підхід деталізовано у фундаментальній праці К. Ван Вестена зі співавторами [53] та у роботі Е. Кастелланос Абелли і К. Ван Вестена на матеріалах Куби [126], де

запропоновано просторовий індекс зсувного ризику з декомпозицією на природний і соціально-економічний компоненти.

Концептуальною основою сучасних оцінок ризику природних небезпек на міжнародному рівні є Сендайська рамкова програма зі зниження ризику стихійних лих 2015–2030 рр. [122] та звіт UNDRR Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction [143]. Ці документи закріпили перехід від реактивного управління наслідками катастроф до проактивного зниження ризиків через комплексне планування, моніторинг та просторове картографування зон потенційного впливу. У межах Європейського Союзу імплементацію цих принципів забезпечують Директива про повені 2007/60/ЄС та Механізм цивільного захисту ЄС, що передбачають обов'язкове картографування ризиків природних небезпек на національному рівні з періодичним переглядом не рідше шести років.

Залежно від рівня кількісної точності та практичного застосування у міжнародній практиці виокремлюють три основних типи оцінок зсувного ризику [6, 53]. Якісна оцінка передбачає експертну категоризацію території у класи відносного ризику без явного обчислення ймовірностей і потенційних втрат і застосовується переважно для рекогносцирувальних регіональних досліджень. Напівкількісна оцінка ґрунтується на індексних моделях з нормованими показниками сприйнятливості, експозиції та вразливості, що формують інтегральний відносний ризик у діапазоні $[0; 1]$ або у дискретних класах за квантильним поділом; цей підхід забезпечує просторову порівнюваність територій без потреби у детальних економічних даних. Кількісна оцінка передбачає явне обчислення очікуваних втрат у грошовому виразі або у кількості постраждалих з використанням ймовірнісних моделей активізації, кривих вразливості та даних щодо матеріальних активів і застосовується переважно на локальному рівні для конкретних інженерних об'єктів. Для регіонального масштабу і за умов фрагментарних кадастрових даних, що характерно для багатьох територій Українських Карпат, найбільш практичним і відтворюваним підходом є напівкількісний індексний, який і реалізовано у даному дисертаційному дослідженні.

В Україні методичні підходи до оцінки зсувного ризику розроблялися переважно у межах робіт Г. І. Рудька [14, 15], Е. Д. Кузьменка зі співавторами [11], О. М. Журавля [22], Д. В. Касіянчука і Л. Б. Штогрин [21]. У праці [21] виконано просторовий аналіз ризику матеріальних збитків від зсувних процесів з урахуванням забудови та земельних угідь. Водночас системного впровадження повного циклу обчислень ризику на основі сучасних відкритих геоінформаційних продуктів (WorldPop, ESA WorldCover, JRC GHSL, Copernicus CGLS-LC100) та хмарних обчислень для території Українських Карпат до даного дисертаційного дослідження не виконувалося. Окремою методичною прогалиною залишається інтеграція геоекологічної компоненти ризику, тобто оцінки потенційних втрат природних екосистем, у регіональні моделі зсувної небезпеки. Усунення цих прогалин визначило необхідність розробки інтегрованої моделі з двома паралельними показниками - індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення - на основі показника природоохоронного статусу території (NPS), що детально розглянуто у розділі 5.

Висновки до розділу 1

За результатами аналізу сучасного стану наукових досліджень у галузі зсувних процесів зроблено такі висновки.

1. Зсувні процеси є одним із провідних типів екзогенних геологічних процесів у світі, що спричиняють значні матеріальні збитки і людські втрати. За даними глобальної бази даних зсувів (Froude, Petley, 2018), упродовж 2004–2016 рр. у світі зафіксовано 4 862 зсуви (несейсмічні) із смертельними наслідками, що спричинили 55 997 загиблих. Для території Українських Карпат зафіксовано понад 20 тисяч зсувних проявів, причому переважна більшість локалізована у гірській та передгірській зонах Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської та Чернівецької областей. Інформаційна база ДНВП «Геоінформ України» є базовим джерелом даних для вивчення просторово-часової динаміки зсувних процесів в Україні.

2. Сучасний арсенал методів дослідження зсувних процесів включає польові, геофізичні, лабораторні, аналітичні, чисельні та регіональні статистичні

методи. Для задач регіонального моделювання зсувної сприйнятливості найбільш перспективним визнано поєднання статистичних методів (Frequency Ratio для калібрування факторних шарів) з ансамблевими методами машинного навчання (Random Forest Feature Importance) для визначення вагових коефіцієнтів. Додатковим методичним інструментом є багатовимірний статистичний аналіз (кластерний K-means, кореляційний, експлораторний факторний, метод головних компонент) для перевірки внутрішньої структури набору предикторів моделі.

3. Сучасний світовий тренд у врахуванні лісового фактора у регіональних моделях зсувної сприйнятливості полягає у переході від бінарного або одновимірного врахування (тільки щільність лісу) до комплексної багатовимірної параметризації через набір кількісних показників: близькість до межі лісу, щільність деревного покриву, тип лісу (породний склад), динаміка втрат, амплітуда сезонних вегетаційних індексів, просторово-контекстні характеристики (частка лісу вище по схилу). Для території Українських Карпат задача комплексної параметризації лісового блоку до даного дисертаційного дослідження не розв'язувалася і є методично новою.

4. Зміни клімату у Центральній та Східній Європі (зростання частоти екстремальних опадів, зміна режиму сніготанення) посилюють зсувну активність у гірських регіонах як прямим шляхом (збільшення частоти тригерних опадових подій), так і опосередковано (через деградацію лісових екосистем внаслідок кліматичного стресу, почастищення ентомологічних і фітопатологічних епіфітотій, буревіїв). Для Українських Карпат ці процеси мають помітний прояв, що потребує врахування при розробці стратегій управління зсувними ризиками у довгостроковій перспективі.

5. Зсувні процеси мають значний, часто недооцінений вплив на біорізноманіття гірських екосистем через безпосереднє знищення деревостанів, зміну мікроклімату, фрагментацію популяцій, втрату ґрунтового насінневого банку. Тривалість повного відновлення порушених зсувами екосистем у Карпатах може сягати 150–300 років і більше. Геоекологічний підхід до оцінки зсувного ризику дозволяє об'єктивно пріоритизувати території захисту та планувати

природоохоронні заходи, особливо у межах природно-заповідних територій Карпатського регіону.

6. Сучасні технології моніторингу та раннього попередження зсувних процесів включають наземні геодезичні методи (GNSS, інклінометрія, екстензометрія), дистанційні методи (БПЛА-LiDAR, супутникове оптичне зондування), комплексні системи моніторингу тригерних факторів (опадів, вологість ґрунту).

7. Огляд сучасного стану дослідження зсувних процесів у світі та в Україні дозволив сформулювати ключові методичні прогалини, які вирішуються у рамках даного дисертаційного дослідження, а саме, недостатнє врахування лісового покриву як самостійного структурного блоку, обмежене використання хмарних платформ геопросторового аналізу (наприклад Google Earth Engine) у вітчизняній практиці регіонального моделювання; фрагментарність застосування сучасних статистичних методів (FR, RF, просторово-блокова валідація, багатовимірна статистика), відсутність систематичної інтеграції ризик-орієнтованого підходу у регіональні дослідження, недостатнє врахування аспектів біорізноманіття та кліматичних змін у традиційних регіональних моделях зсувної небезпеки.

РОЗДІЛ 2

ЗСУВНІ ТА ЕРОЗІЙНІ ЯВИЩА ТА ОСОБЛИВОСТІ ЇХ РОЗВИТКУ В УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТАХ

2.1 Оцінка механізму розвитку зсувних та ерозійних явищ

Зсувні та ерозійні процеси являють собою дві взаємопов'язані групи екзогенних геологічних процесів, що визначають сучасну морфодинаміку схилових систем у гірських регіонах. Незважаючи на відмінності у механізмах реалізації, обидві групи процесів мають спільні фізичні передумови – гравітаційне поле, надлишок води в приповерхневій товщі, втрата стійкості гірських порід. Вони часто відбуваються у тісному взаємозв'язку в межах одного схилового елементу [96, 97].

Механізм зсувного процесу у його класичному розумінні передбачає переміщення приповерхневої товщі схилу по одній або декільком поверхнях ковзання внаслідок перевищення зсувних напружень над зсувним опором у цих поверхнях. Кількісне вираження цієї умови подається через фактор стійкості (FoS), що визначається як відношення сил, які утримують схил у стані рівноваги (зчеплення, тертя), до сил, що намагаються перемістити його вниз (гравітаційна складова) [34, 98]. При $FoS > 1$ схил перебуває у стійкому стані, при $FoS < 1$ – втрачає стійкість, активізуючи зсувний процес. Значення $FoS = 1$ відповідає критичному стану межі рівноваги.

Фактичне значення FoS залежить від низки фізичних, геологічних і гідрологічних параметрів: глибини потенційної площини ковзання, крутизни схилу, фізико-механічних властивостей ґрунтів (кута внутрішнього тертя ϕ , зчеплення c), щільності та вологості ґрунту, рівня ґрунтових вод, порового тиску води, бокових навантажень. У найпростішій моделі нескінченного сухого схилу без зчеплення стійкість виражається через співвідношення кутів тертя і нахилу схилу:

$$FoS = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad (2.1)$$

де φ – кут внутрішнього тертя ґрунту; β – кут нахилу схилу [11, 23].

Формула наочно демонструє основну геомеханічну передумову активізації зсуву - перевищення кута нахилу схилу β над кутом внутрішнього тертя ґрунту φ . У реальних умовах схилів Карпатського регіону фактичне значення FoS додатково знижується через зростання порового тиску води u у площині ковзання під час інтенсивних опадів (насичення приповерхневої товщі); зменшення зчеплення c між частинками ґрунту (втрата механічного армування, зокрема внаслідок гниття коренів після вирубок); локальне збільшення крутизни β (ерозійний підмив схилу, підрізання при господарських роботах). Ці умови можуть виступати як поодинокі, так і комплексно, причому саме комплексний випадок є найбільш типовим для гірських районів Українських Карпат [11].

Для мілких зсувів-потоків, що переважають у флішових товщах Карпат, типовим є такий сценарій активізації. Після тривалого періоду помірних опадів приповерхнева кора вивітрювання накопичує значний рівень вологи, що призводить до зростання порового тиску у зоні контакту з корінними гірськими породами. Екстремальні опади (понад 50 мм/добу або понад 100 мм за 48 годин) доводять ґрунт до стану повного водонасичення, поровий тиск досягає критичних значень, зчеплення у глинистих шарах кори вивітрювання різко знижується, і приповерхнева товща сповзає по літологічному контакту, утворюючи зсув-потік [11, 13, 100]. Глибина площини ковзання у таких зсувах переважно становить 0,5–2,5 м, що відповідає типовій потужності кори вивітрювання у Карпатському регіоні.

На відміну від зсувних процесів, що реалізуються як дискретні події по визначених поверхнях ковзання, ерозійні процеси являють собою просторово-розподілену площинну діяльність рухомої води або вітру, що поступово знімає верхній шар ґрунту. У гірських районах Карпат домінують такі типи ерозії:

- поверхнева ерозія – результат дії дощових крапель і поверхневого стоку, що переносять частинки ґрунту вздовж схилу. Інтенсивність поверхневої ерозії тісно пов'язана з крутизною схилу, інтенсивністю опадів, щільністю рослинного покриву. У лісах з добре розвиненим підліском і підстилкою інтенсивність поверхневої ерозії може зменшуватися в десятки разів порівняно з відкритими ділянками [67, 101, 118];

- яружно-балкова ерозія – формування лінійних ерозійних врізів (промоїн, ярів, балок) у ґрунтовому покриві внаслідок концентрації поверхневого стоку. У Карпатах яружно-балкова ерозія часто розвивається на ділянках суцільних рубок, поблизу лісових доріг і трелювальних волоків, які виступають концентраторами стоку;

- руслова ерозія – діяльність постійних і тимчасових водотоків, що розмивають ложе русла та підмивають підосви схилів. Руслова ерозія в Українських Карпатах особливо активна під час паводків, коли пікові витрати можуть перевищувати середні значення в десятки разів і створювати умови для лавинного розмиву берегів;

- водно-схилова ерозія загалом включає усі три названі типи і є провідним чинником формування ерозійно-денудаційного рельєфу Карпатського регіону. У багатьох випадках ерозія і зсуви розвиваються комплексно: ерозійний підмив підосви схилу створює умови для активізації зсуву у вищій частині схилу, а зсувне тіло, що сходить у русло, живить твердий стік водотоку, підсилюючи руслову ерозію [96, 100].

Взаємозв'язок зсувних та ерозійних процесів у Карпатському регіоні можна описати як самопідсилюваний цикл: інтенсифікація ерозії на відкритих (знеліснених) ділянках → підмивання підосв схилів → активізація мілких зсувів → вихід зсувного матеріалу у русла → живлення твердого стоку → активізація руслової ерозії → нові підмиви нижче за течією. Цей цикл найбільш виражено проявляється під час катастрофічних паводкових подій, коли у межах одного басейну одночасно активізуються сотні окремих зсувних проявів, формуючи кумулятивний ефект трансформації ландшафтної структури [23, 28, 102].

З позицій геоecологічного підходу механізм зсувно-ерозійних процесів у Карпатах має розглядатися не як набір ізольованих деформацій, а як цілісна реакція гірської геосистеми на зовнішні та внутрішні впливи. Рослинний покрив (насамперед ліс) у такій системі виконує інтегральну функцію стабілізатора - через механічне армування ґрунту коренями, регулювання водного режиму приповерхневої товщі, захист поверхні від ударної ерозії дощовими краплями. Зміна стану лісового покриву безпосередньо змінює реакцію геосистеми (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 - Концептуальна схема механізму розвитку зсувних та ерозійних процесів у Карпатському регіоні: чинники активізації, взаємозв'язок з лісовим покривом та гідрологічним режимом

2.2 Фізико-географічна характеристика території дослідження

Карпатський регіон є типовим прикладом середньогірської системи помірного поясу, де поєднуються природні передумови (гірський рельєф, висока зволоженість, складна геологічна будова, розвиненість лісового покриву) з інтенсивними антропогенними впливами (лісогосподарська діяльність, транспортне освоєння, рекреаційне використання). Ця сукупність чинників визначає специфіку формування і розвитку зсувно-ерозійних процесів у регіоні.

Українські Карпати розташовані на заході України у межах чотирьох адміністративних областей: Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської та Чернівецької. Загальна площа регіону становить близько 37 тис. км², що відповідає приблизно 6 % площі України [103, 104]. Протяжність Українських Карпат з північного заходу на південний схід сягає близько 280 км, ширина - від 100 до 120 км. У структурі гірської системи чітко виокремлюються декілька геоморфологічних областей: Зовнішні Карпати (хребти Бескиди, Горгани, Покутсько-Буковинські Карпати), Вододільно-Верховинська смуга, Полонинсько-Чорногірська область (з найвищою точкою України – горою Говерла, 2061 м н. р. м.), Вулканічна гряда, Закарпатська низовина.

Абсолютні висоти варіюють від 200–400 м у передгірській зоні до 2000–2061 м у найвищих точках Чорногори. Гірська система має середньогірський характер з переважанням висот 800–1500 м, окремими масивами, що перевищують 1800 м (Чорногора, Свидовець, Мармароський масив, Горгани). Для Карпатського рельєфу характерне чергування хребтів і міжгірних долин, орієнтованих переважно з південного сходу на північний захід, що відповідає загальному простяганню тектонічних структур.

Ухили схилів у межах території Українських Карпат істотно впливають на просторовий розподіл зсувних процесів. За даними О. М. Журавля [22], у Карпатському регіоні більше 60 % зсувних проявів приурочено до схилів крутизною 15–35°, що відповідає типовим значенням для активізації мілких зсувів-сплавів. Надто пологі схили (< 10°) практично не зсувонебезпечні; надто

круті ($> 45^\circ$) – зазвичай скелясті, з мінімальним ґрунтовим шаром, де зсуви трансформуються у каменепади та обвали.

Експозиція схилів опосередковано впливає на зсувну небезпеку через відмінності у зволоженні, інсоляції та мікрокліматичних умовах. У межах Українських Карпат схили південної та південно-західної експозицій більш прогріваються, характеризуються швидшим сніготаненням та вищою евапотранспірацією. Схили північної та північно-східної експозицій – зволоженіші, з триваліше зберігаючим сніговим покривом і повільнішим таненням. За матеріалами досліджень І. П. Ковальчука зі співавторами [18], активізація зсувів частіше спостерігається на схилах північно-східної та північно-західної експозицій, що пов'язано з вищим рівнем зволоженості приповерхневої товщі.

Клімат Українських Карпат формується під впливом помірного поясу з переважанням західного переносу повітряних мас. Територія зазнає впливу морського повітря Атлантичного океану, континентального з Європейської рівнини та частково середземноморського з південного заходу. Цей складний генезис формує характерні кліматичні особливості регіону – високу річну та сезонну мінливість опадів, істотні просторові контрасти, виражену вертикальну поясність кліматичних характеристик [105, 106, 121].

Середньорічна температура повітря у межах Українських Карпат варіює від $+8...+10^\circ\text{C}$ у передгір'ї до $-2...0^\circ\text{C}$ у високогір'ї. Кількість атмосферних опадів значно перевищує середньоукраїнські значення і становить від 700–800 мм/рік у передгір'ї до 1600–1800 мм/рік у високогір'ї. Для базового полігону дослідження (басейн верхньої Тереблї) середньорічна кількість опадів перевищує 1200 мм, з максимумом у червні–серпні [105]. Саме висока зволоженість території є одним із ключових чинників, які сприяють активізації зсувних процесів у Карпатах. Інфільтрація атмосферних вод у приповерхневу товщу в періоди інтенсивних опадів швидко призводить до водонасичення, зростання порового тиску та, як наслідок, до втрати стійкості схилів [11].

Особливістю Карпатського клімату є висока частота екстремальних опадових подій – зливи з добовою кількістю опадів понад 50 мм, тривалі дощі понад 100 мм за 48 годин, складні багатоденні опадові епізоди. Саме такі події є безпосередніми тригерами активізації зсувів у Карпатах. За період 1990–2020 років частота екстремальних опадових подій на території Українських Карпат зростала, що узгоджується із загальноєвропейськими тенденціями змін клімату [24, 25].

Ґрунтовий покрив Карпатського регіону відзначається значною різноманітністю, зумовленою поєднанням гірського рельєфу, вологого клімату, строкатого геологічного субстрату та багатовікової господарської діяльності. Характерна виражена вертикальна поясність ґрунтів: у передгірській зоні (до 450–500 м) переважають буроземи опідзолені та темно-сірі лісові ґрунти; у середньогір'ї (500–1100 м) – гірсько-лісові буроземи та гірсько-лісові опідзолені ґрунти; у високогір'ї (понад 1100 м) – гірсько-підзолисті, гірсько-лучні та гірсько-торф'яні ґрунти, приурочені до полонин і криволісся [107]. З погляду зсувної небезпеки найбільше значення мають такі властивості ґрунтів: підвищена вологоємність буроземів (до 40–60 % від об'єму), наявність ущільнених горизонтів, що виконують роль потенційних поверхонь ковзання, чутливість до антропогенного ущільнення під час лісогосподарських операцій [67, 107].

Особливу роль у зсувних процесах Карпат відіграє потужність і стан кори вивітрювання – верхньої зони гірських порід, у якій механічні властивості суттєво відрізняються від незмінних корінних відкладів. У межах флішової товщі кора вивітрювання зазвичай становить 0,5–5 м, рідше – до 10 м. Саме в межах кори вивітрювання формується переважна більшість мілких зсувів-потоків, що є найпоширенішим типом зсувних процесів у регіоні [11, 14]. У працях Г. І. Рудька [14] і Е. Д. Кузьменка [11] детально проаналізовано взаємозв'язок між потужністю та ступенем звітрілості порід і ймовірністю активізації мілких зсувів під час тригерних опадових подій.

Лісистість Карпатського регіону є однією з найвищих в Україні і становить близько 50–55 % у середньому для всього регіону. При цьому у гірських частинах

Закарпатської та Івано-Франківської областей лісистість сягає 60–70 % і більше. Дослідження спрямоване на оцінку можливості врахування динаміки та стану лісового покриву як фактора для моделювання оцінки ризиків розвитку зсувних процесів. Для оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриву та розвитку зсувних процесів обрано територію розміром орієнтовно 75 на 75 км, що розташована в Карпатах, в адміністративному плані займає східну частину Закарпатської області та південно-західну частину Івано-Франківської. Розташування ділянки наведено на рис. 2.2. Для ділянки зареєстровано 1509 зсувних проявів. Для цієї території на основі даних з топографічних карт, глобальних геопорталів, що присвячені питанням динаміки рослинного лісового покриву планується створити цифрові картографічні шари та проведено просторовий аналіз щодо наявності та характеристик лісового покриву у точках проявів зсувних процесів. Встановлено, що розвиток зсувних процесів тяжіє до межі лісу, що пояснюється в основному впливом лісового покриву на формування стоку води на схилах. Також досліджено щільність лісового покриву для території досліджень та визначено її значення у точках прояву зсувних процесів.

Для базового полігону дисертаційного дослідження у верхів'ях р. Тереля частка лісів перевищує 70 % площі [62, 63]. Породний склад лісів Українських Карпат закономірно змінюється у висотному спектрі: у передгір'ї переважають дубово-букові та дубово-грабові деревостани, у середньому гірському поясі – бук європейський у поєднанні з ялицею білою та смерекою європейською, у верхньому гірському поясі – смерекові ліси; верхня межа лісу знаходиться на висотах 1500–1700 м.

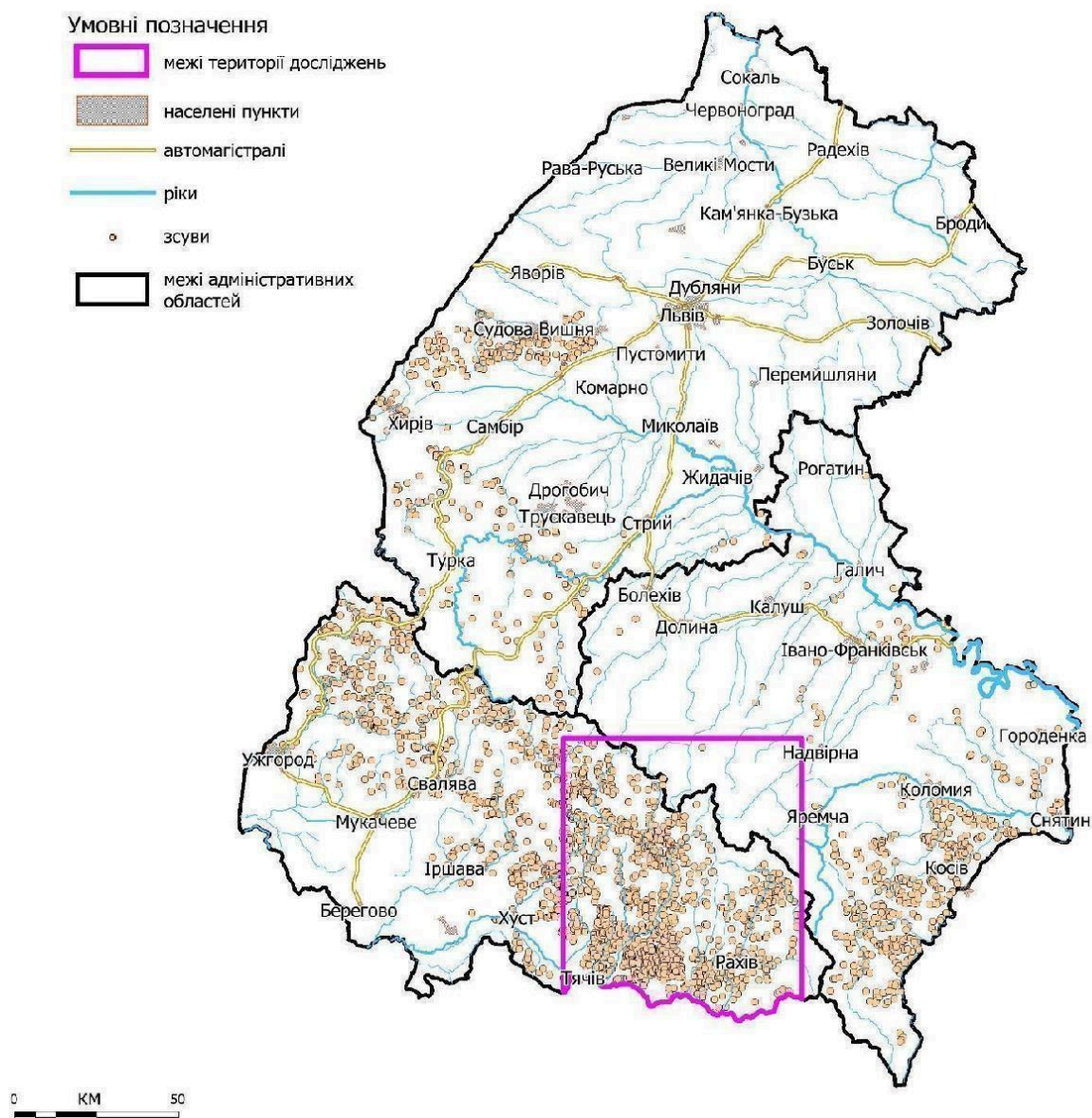


Рисунок 2.2 - Карта розташування території дослідження у межах Українських Карпат

Як базовий полігон детального моделювання у дисертаційному дослідженні обрано ділянку площею 25×25 км, розташовану у верхів'ях басейну р. Тересля у східній частині Закарпатської області (рис. 2.3). У межах полігону розташовані населені пункти Колочава, Руська Мокра, Німецька Мокра, Брустури та Усть-Чорна, що належать до Міжгірського і Тячівського районів Закарпатської області. Ділянка є типовою для середньогір'я Полонинсько-Чорногірської області, характеризується значною лісистістю, високою зволоженістю та інтенсивними зсувно-ерозійними процесами. За даними ДНВП «Геоінформ України» у межах

полігону задокументовано 236 зсувних проявів. Для цієї території у подальшому буде створено індексну модель LSA на основі комплексного врахування зсувоініціюючих факторів, причому окрему увагу буде приділено фактору рослинності, а саме врахування параметрів поширення, динаміки та стану лісового покриву. Як середовище моделювання планується використовувати хмарну платформу Google Earth Engine (GEE). Розмір та розташування ділянки обґрунтовується, по-перше, її приналежністю до однорідних природних умов Українських Карпат, по-друге, наявністю значної кількості зсувних процесів, також такий розмір забезпечує ефективний розрахунок LSA на платформі GEE з одночасним отриманням даних з різних джерел супутникових даних.



Рисунок 2.3 - Ділянка досліджень 25×25 км у верхів'ях р. Теребля (236 зсувних проявів)

Сукупність фізико-географічних передумов – середньогірський рельєф з крутизною $15\text{--}35^\circ$, висока зволоженість (1200–1800 мм/рік), потужна кора вивітрювання на флішових відкладах, висока лісистість з антропогенно трансформованою структурою – створює у Карпатському регіоні специфічне поєднання умов, за яких зсувні та ерозійні процеси мають регулярний,

масштабний і екологічно значущий характер. Ця специфіка визначає необхідність застосування комплексного геоекологічного підходу з урахуванням усіх ключових природних компонентів, серед яких ключову роль відіграє лісовий покрив.

2.3 Геолого-тектонічні умови

Геологічна будова Українських Карпат є складною і визначається тривалою історією тектонічного розвитку регіону. Геотектонічно Карпати належать до Альпійсько-Гімалайського складчастого поясу. Основна тектонічна структура – Карпатська складчасто-насувна система – характеризується північно-західним простяганням структур, серією покривів, насувів та великих розривних порушень [108, 109].

У структурі Українських Карпат традиційно виокремлюють декілька структурно-тектонічних зон, які простягаються паралельно головному Карпатському хребту. З північного сходу на південний захід виділяють: Передкарпатський прогин, Скибову зону, Кросненську зону, Дуклянську зону, Чорногірську зону та Магурську зону, Мармароський масив, Закарпатський внутрішній прогин [108]. Ця зональна будова має прямий вплив на розподіл зсувних процесів, оскільки різні структурно-тектонічні зони характеризуються різними типами порід, ступенем тектонічної порушеності та характером дислокацій.

Переважна частина території Українських Карпат, у тому числі базовий полігон дисертаційного дослідження у верхів'ях р. Тересва, приурочена до зони розвитку флішових відкладів крейдяного та палеогенового віку. Фліш являє собою ритмічне чергування пісковиків, алевролітів, аргілітів і мергелів, сформованих у глибоководних умовах давнього басейну [108, 110]. Характерною особливістю флішових товщ є:

- літологічна неоднорідність, що створює потенційні площини ковзання між шарами різної міцності;
- значна потужність (від сотень до тисяч метрів) з переважанням глинистих та алевролітових прошарків у верхній частині розрізу;

- підвищена тріщинуватість, ускладнена тектонічними порушеннями;
- знижена міцність у водонасиченому стані, особливо для глинистих різновидів;
- здатність до утворення кори вивітрювання потужністю 0,5–5 м і більше.

Саме флішова структурно-літологічна будова є однією з ключових передумов зсувних процесів у Карпатах. На контакті пісковиків і глинистих сланців при перезволоженні утворюються потенційні поверхні ковзання, по яких починається рух схилових мас. Механізми зсувоутворення у флішових товщах Карпат докладно описані у працях Е. Д. Кузьменка [11, 16], Г. І. Рудька [14, 123], М. Д. Круцика [20].

Важливим тектонічним елементом території досліджень є мережа розривних порушень різного рангу – від регіональних насувів (Скибовий, Кросненський, Дуклянський) до локальних розломів і зон тріщинуватості. Тектонічні розломи мають істотне значення для формування зсувної небезпеки через підвищену тріщинуватість порід, полегшену інфільтрацію атмосферних опадів, формування зон ослаблення механічної міцності. У дослідженнях О. М. Адаменка [19] та М. Д. Круцика [20] показано статистично значущу приуроченість зсувних ділянок до зон розривних порушень, особливо у радіусі 0,5–1 км від тектонічно активних зон.

У межах базового полігону дослідження (верхів'я р. Тересія) геологічна будова представлена потужними флішовими товщами Кросненського та Дуклянського покривів крейдово-палеогенового віку. На основі тектонічної карти Українських Карпат [111] у межах полігону виділяються три літологічні класи за переважаючим складом відкладів :

Клас 1 (глинистий фліш) - тонкоритмічна флішова товща з домінуванням аргілітових і глинисто-сланцюватих шарів та підпорядкованими алевролітами та тонкими прошарками пісковиків. Цей тип характеризується найбільшою кількістю потенційних поверхонь літологічної неоднорідності та схильністю до водонасичення під час інтенсивних опадів, але у межах полігону займає підпорядковану площу, тому акумулює 18,6 % зсувних проявів.

Клас 2 (піщано-глинистий фліш) - середньоритмічний фліш з приблизно рівним співвідношенням пісковиків, алевролітів та аргілітів. Цей тип є домінуючим літологічним різновидом у межах полігону як за площею (близько 60 %), так і за зсувною активністю - концентрує 73,3 % задокументованих зсувних проявів. Висока зсувна сприйнятливість обумовлена сприятливим поєднанням значного площинного поширення та чітких літологічних контактів між пісковиками та глинистими шарами, що формують ослаблені поверхні ковзання при сезонному перенасиченні водою.

Клас 3 (піщаний фліш) - переважно товстошаровий фліш з домінуванням пісковиків над аргілітовими прошарками. Цей тип характеризується вищою механічною міцністю та меншою кількістю поверхонь літологічної неоднорідності, що зумовлює найнижчу частку зсувних проявів (8,1 %), однак все ж залишається потенційно зсувонебезпечним через тріщинуватість, тектонічну порушеність та локальне підмивання основ схилів водотоками.

За результатами просторового аналізу з'ясовано, що з 236 задокументованих зсувних проявів базового полігону 173 прояви (73,3 %) локалізовані у межах літологічного класу 2, 44 прояви (18,6 %) – у класі 1, і лише 19 (8,1 %) – у класі 3 (рис. 2.6). Таке виражене переважання класу 2 відображає його площинне домінування у межах території дослідження, а високий відсоток зсувних проявів цього класу підтверджує загальновідому роль флішових відкладів як основного літологічного середовища зсувоутворення у Карпатах. Просторовий розподіл виділених літологічних класів, ліній тектонічних розломів та задокументованих зсувних проявів у межах базового полігону наведено на рис. 2.4.

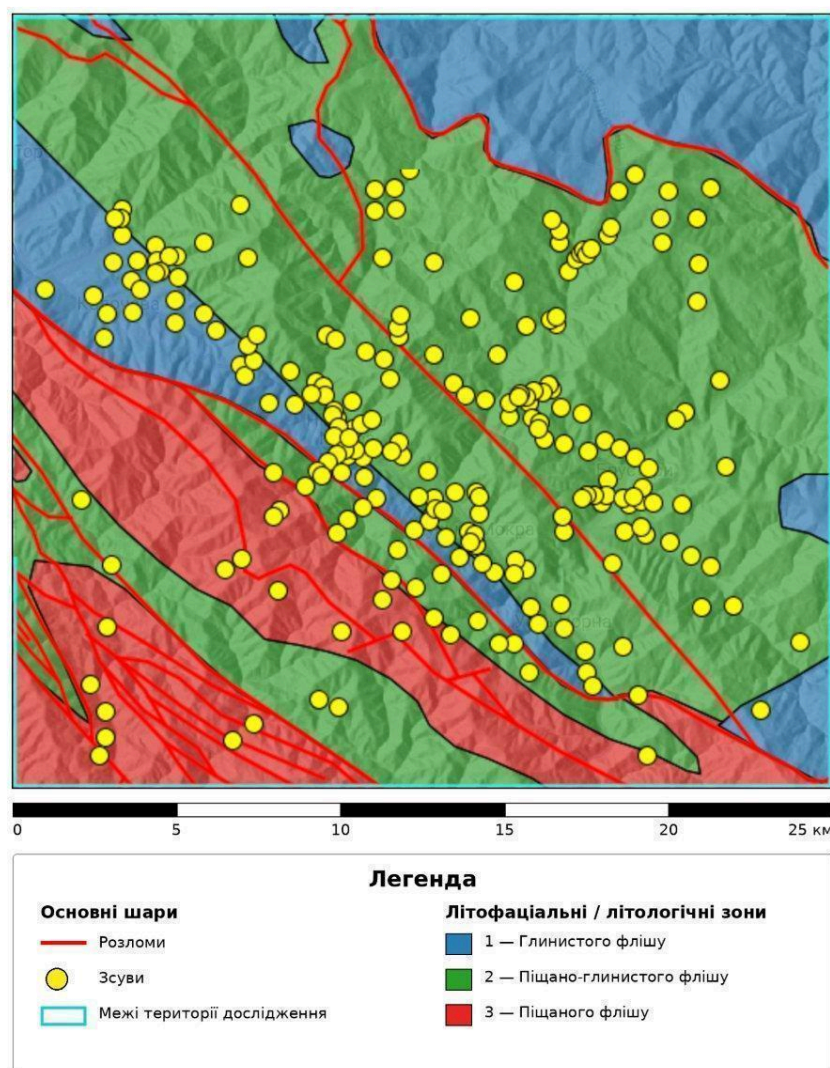


Рисунок 2.4 - Картограма літофаціальних / літологічних зон, тектонічних розломів та задокументованих зсувних проявів базового полігону «Теребля»: клас 1 - глинистий фліш (синій); клас 2 - піщано-глинистий (середньоритмічний) фліш (зелений); клас 3 - піщаний фліш (червоний); червоні лінії - тектонічні розломи; жовті точки - 236 зсувних проявів за даними ДНВП «Геоінформ України»; голу́ба рамка - межі території дослідження. За даними тектонічної карти Українських Карпат масштабу 1:200 000 [111]

Тектонічні розломи у межах території досліджень представлені кількома лінійними порушеннями північно-західного простягання, що узгоджуються із загальною орієнтацією тектонічних структур Карпатської системи. Для кожного пікселя території обчислено відстань до найближчого тектонічного розлому, з подальшою нормалізацією методом мінімум-максимум (з перцентильним

відсіканням p_2 – p_{98} та інверсією, де меншій відстані до розлому відповідає більше значення близькості). На відміну від попередніх версій моделі, для всіх відстаневих факторів застосовано єдиний підхід замість окремих параметрів експоненційного загасання, що усуває залежність результату від суб'єктивно заданих характерних відстаней; остаточне калібрування за емпіричними даними виконує метод частотного співвідношення (FR).

Статистичний аналіз розподілу 236 зсувних проявів за відстанню до найближчого тектонічного розлому показав, що середня відстань становить 1802,20 м ($\sigma = 1273,87$ м). Близько 36 зсувних проявів (15 %) розташовані у безпосередній близькості до розломів (0–500 м), що підтверджує роль тектонічної тріщинуватості у формуванні зон ослабленої міцності порід, особливо у поєднанні з іншими передумовами.

Територія Українських Карпат характеризується помірною сейсмічністю. Більшість землетрусів мають тектонічний характер і приурочені до зон розривних порушень. Максимальна сейсмічна активність спостерігається у Закарпатті, де можливі землетруси інтенсивністю до 6–7 балів за шкалою MSK-64 [112]. Сейсмічний чинник хоча й не є провідним у формуванні зсувної небезпеки в Карпатах (порівняно з тригерними опадками), проте може виступати додатковим фактором активізації.

У контексті геоекологічної оцінки ризиків зсувних процесів геолого-тектонічні характеристики території є важливими при створенні моделі зсувної сприйнятливості. Два фактори геологічного блоку – літологія та близькість до тектонічних розломів, включені до складу 14 факторів моделі, що розглядається у розділі 4. Їх просторова візуалізація і кількісний розподіл зсувних проявів за цими факторами наведені на рис. 2.5 і 2.6.

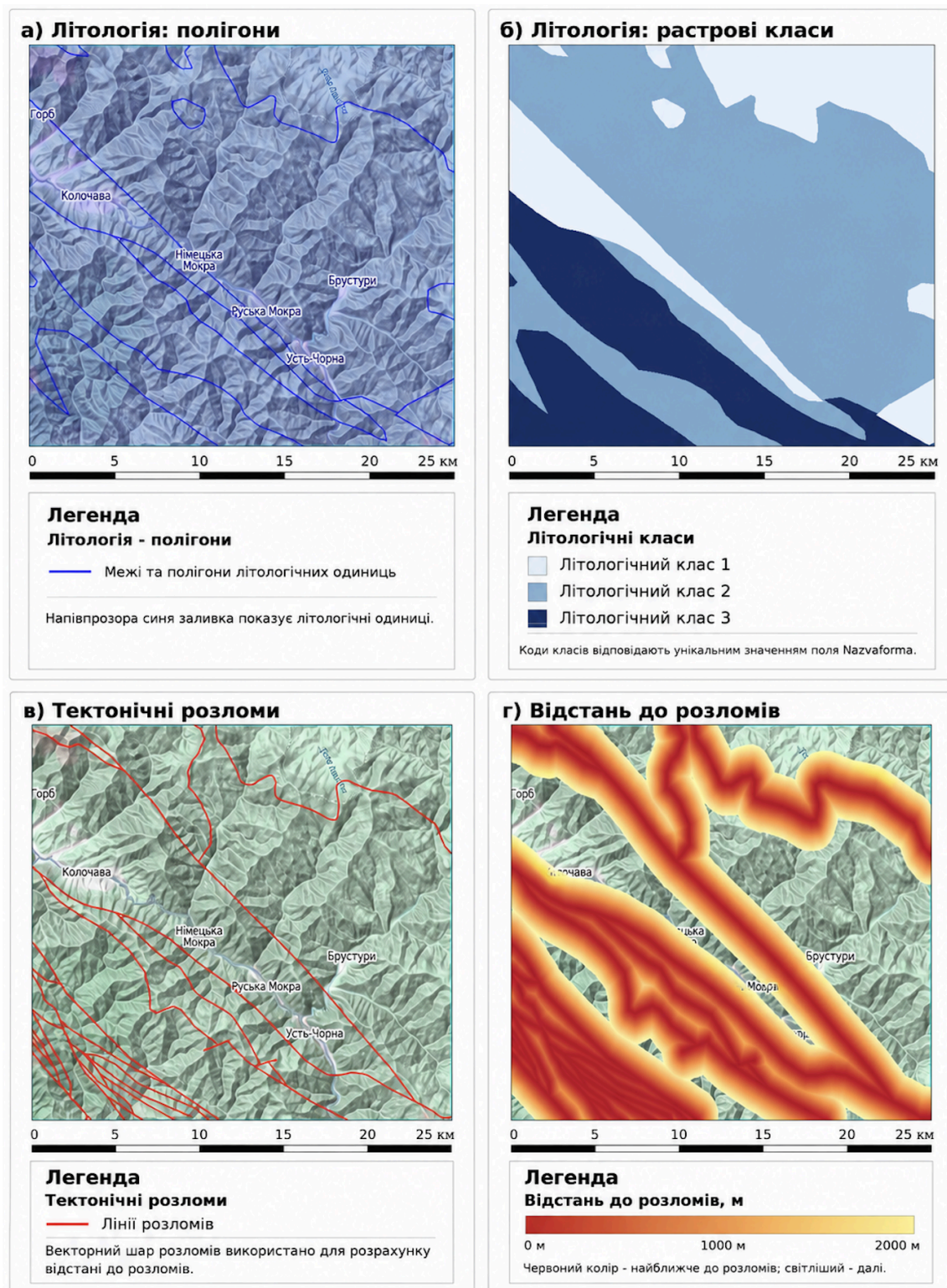
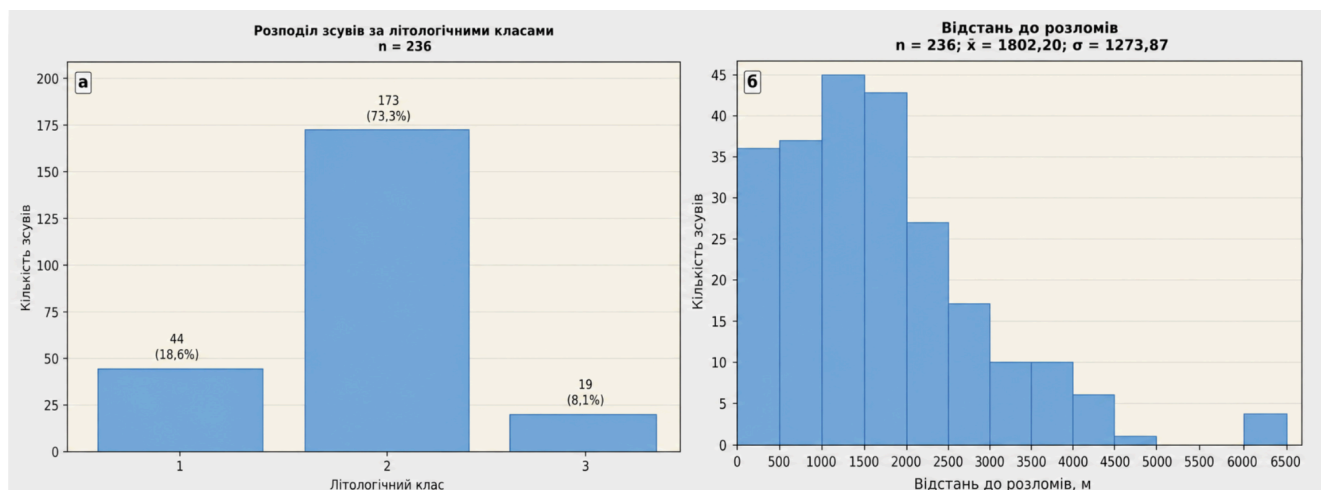


Рисунок 2.5 - Геолого-тектонічні шари території дослідження: а) літологічні полігони з вихідними векторними даними; б) літологічні растрові класи у просторовій розрізненості 25 м (клас 1 - глинистого флішу, клас 2 - піщано-глинистого флішу, клас 3 - піщаного флішу); в) тектонічні розломи; г) нормалізоване методом мінімум-максимум поле відстані до розломів



а)

б)

Рисунок 2.6 - Розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за літологічними класами території (а) (стовпчикова діаграма з абсолютними значеннями та частками; клас 1 - глинистого флішу, клас 2 - піщано-глинистого флішу, клас 3 - піщаного флішу) та відстанню до тектонічних розломів (б)

2.4 Гідрогеологічні умови та вплив гідрологічних змін на ерозію і зсуви

Гідрогеологічні умови та режим поверхневого і підземного стоку відіграють ключову роль у формуванні зсувної небезпеки у гірських районах Українських Карпат. Саме водний чинник є провідним тригером активізації мілких зсувів-спливів, оскільки визначає стан зволоженості приповерхневої товщі, поровий тиск на потенційній площині ковзання та інтенсивність ерозійного підмиву підосви схилу. Розгляд гідрогеологічних особливостей регіону та сучасних тенденцій трансформації водного режиму є важливою передумовою для коректної геоекологічної оцінки зсувних ризиків.

Гідрографічна мережа Українських Карпат сформована густою системою річок, що належать до басейнів Тиси (південно-західний схил Карпат, водозбір Дунаю), Дністра (північно-східний схил), Прута та Сіверського Серету (південно-східний край регіону). Загальна довжина річкової мережі в Карпатському регіоні перевищує 20 тис. км при середній густоті 1,2–1,5 км/км² у гірській частині [113].

Для гідрологічного режиму гірських карпатських річок характерні такі особливості:

- переважно дощове та змішане живлення (дощове – 55–65 %, снігове – 20–30 %, підземне – 10–20 %);
- висока мінливість витрат води протягом року з різкими паводками, приуроченими до періодів інтенсивних опадів або сніготанення;
- значні коефіцієнти стоку (0,5–0,8), що свідчать про високу частку опадів, які переходять у поверхневий стік;
- швидке добігання води у водотоки нижчих порядків (від десятків хвилин до кількох годин);
- висока частота катастрофічних паводків, пов'язаних з переходом дощових тригерних подій в інтенсивний поверхневий стік.

Особливістю гірських карпатських річок є їхня виражена ерозійна активність. Під час паводків відбувається інтенсивний розмив русел, підмив підшов схилів, транспортування великих обсягів твердого стоку. Ерозійний підмив підшови схилу є однією з типових передумов активізації зсувів у Карпатах – процес, що описано у працях С. В. Гошовського, Г. І. Рудька, П. В. Блінова [23], Г. І. Рудька [14], І. П. Ковальчука [18].

Катастрофічні паводки 1998, 2001 та 2008 років наочно продемонстрували механізм взаємодії гідрологічних і зсувних процесів у Карпатському регіоні. Паводок 1998 року в басейні Тиси призвів до людських жертв та економічних збитків [23, 28]. Під час цих подій одночасно з різким підняттям рівнів води активізувалися сотні зсувних проявів на схилах, що зазнали інтенсивних вирубок лісу протягом попередніх десятиліть. Ці катастрофи наочно продемонстрували взаємопов'язаність гідрологічних, зсувних та лісогосподарських процесів у Карпатах і стали поштовхом до розвитку нових підходів до оцінки природних ризиків у регіоні.

У межах базового полігону дисертаційного дослідження головним водотоком є р. Терєбля – ліва притока р. Тиса. Терєбля починається у високогір'ї Полонинсько-Чорногірської області, її верхів'я мають типовий гірський характер з

високою крутизною поздовжнього профілю (10–30%), швидкою течією, кам'янистим дном. На території полігону у р. Тереля впадає кілька лівих та правих приток (Мокрянка, Брустуранка та ін.), які утворюють розгалужену дренажну мережу [113]. Приуроченість зсувних ділянок до цієї мережі є одним із ключових аспектів, що аналізується у дисертаційному дослідженні.

Для задач просторового моделювання використано глобальний гідрографічний набір MERIT Hydro [114], що побудований на основі цифрової моделі рельєфу MERIT DEM та забезпечує уніфіковану характеристику річкової мережі у всьому світі. Набір містить шар накопиченого стоку, у межах якого можна виокремити водотоки різного рангу за порогом кількості пікселів. Використання моделі MERIT Hydro обумовлене такими причинами. По-перше, MERIT Hydro побудовано на моделях рельєфу SRTM3 та AW3D-30m, але вже гідрологічно виправлених - без локальних западин і з узгодженим напрямком стоку. По-друге, наявний шар AW3D30 є моделлю поверхні з впливом крон дерев і забудови, а Google Earth Engine не має надійних засобів корекції рельєфу для трасування стоку, тому мережа водотоків була б менш точною. Водотоки виокремлено за порогом 800 пікселів (площа водозбору $\approx 6,5 \text{ км}^2$) - це лише значущі русла, що підмивають підніжжя схилів, і відсікає дрібні водотоки, відстань до яких зі зсувами не пов'язана. Застосування MERIT Hydro забезпечує відтворюваність результатів та дозволяє стандартизувати гідрологічний блок моделі.

Для кількісного врахування близькості до водотоків у моделі обчислено евклідову відстань від кожного пікселя території до найближчого водотоку з подальшою нормалізацією методом мінімум-максимум у діапазон $[0; 1]$ з інверсією (менша відстань до водотоку відповідає більшому значенню близькості), що відповідає єдиному підходу до нормалізації всіх відстаневих факторів без суб'єктивного параметра загасання.

Статистичний аналіз розподілу 236 задокументованих зсувних проявів базового полігону за відстанню до найближчого водотоку показав виражений логнормальний закон розподілу, гістограма якого наведена на рис. 2.7. Середня

відстань від зсуву до водотоку становить 881,9 м ($\sigma = 832,5$ м), медіана – близько 600 м. Близько 73 зсувних проявів (31 %) розташовані у смугі 0–250 м від водотоків, ще близько 40 – у діапазоні 250–500 м. Майже половина всіх зсувних проявів (близько 48 %) приурочена до смуги 500 м від водотоку, що підтверджує провідну роль ерозійного підмиву та концентрації стоку у формуванні зсувної небезпеки (рис. 2.7) [11, 14, 115].

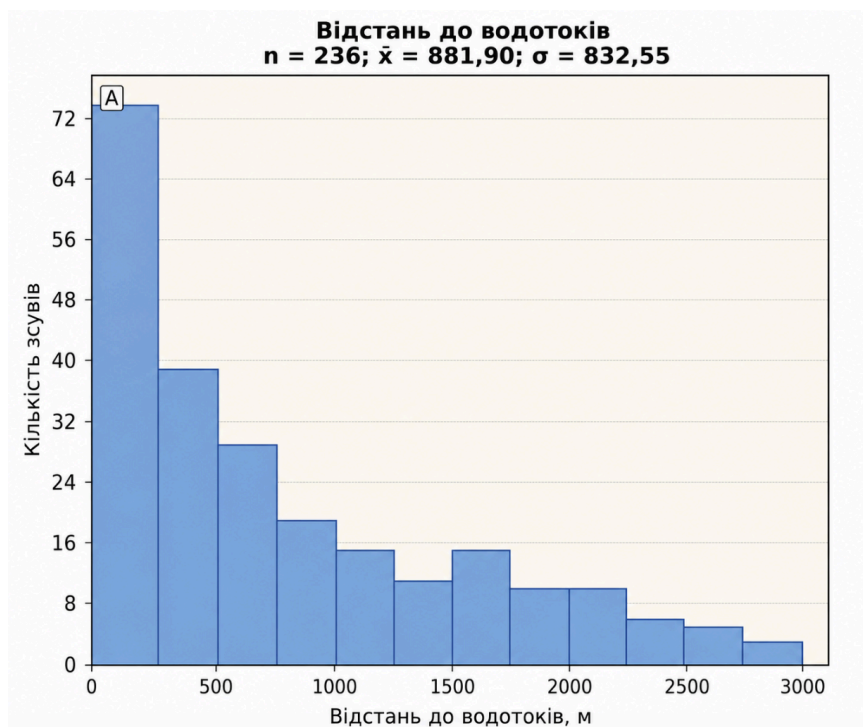


Рисунок 2.7 - Гістограма розподілу 236 зсувних проявів базового полігону за відстанню до найближчого водотоку

Крім поверхневої гідрографії, значний вплив на зсувну небезпеку має підземна гідросфера.

У вітчизняній практиці дослідження ролі підземних вод у зсувоутворенні ґрунтовно опрацьовано у працях Е. Д. Кузьменка зі співавторами [11, 16], О. М. Іванік [17], М. М. Карабінюка та ін. [116]. У монографії за редакцією Е. Д. Кузьменка [11] показано, що саме динамічні зміни рівня ґрунтових вод у приповерхневій зоні є ключовим тригером активізації зсувних процесів у Карпатах.

Окрему проблему становлять гідрологічні зміни, зумовлені одночасно змінами клімату і трансформацією земного покриву. Ці зміни реалізуються через декілька взаємопов'язаних механізмів.

Зміна режиму опадів у бік зростання частоти екстремальних подій. За період 2000–2015 років для басейну р. Прут зафіксовано збільшення кількості випадків, коли добова сума опадів перевищувала 40 мм [27]. Для території Карпатського регіону загалом за період 1990–2020 років статистично підтверджено зростання кількості екстремальних опадових подій [24, 26].

Скорочення тривалості стійкого снігового покриву та ранній початок сніготанення. За даними метеорологічних спостережень, тривалість снігового покриву в Українських Карпатах за останні декілька десятиліть скоротилася на 10–20 діб, з одночасним почастішанням змішаних опадових подій (дощ на сніг) [26].

Зростання частоти паводкових подій та екстремальних пікових витрат у гірських річках. Перехід дощових опадів у поверхневий стік є особливо інтенсивним на ділянках з деградованим лісовим покривом, де коефіцієнт стоку може сягати 0,7–0,9 замість типових для непорушеного лісу 0,3–0,5 [67, 68].

Зростання твердого стоку через активізацію поверхневої та руслової ерозії. Збільшення пікових витрат під час паводків призводить до зростання ерозійного розмиву русел та підмивання берегів, що, у свою чергу, активізує прирічкові зсувні процеси.

У сукупності зазначені тенденції створюють складну гідрологічну обстановку, в якій зсувні та ерозійні процеси формуються через комплекс взаємопідсилюваних механізмів. Для коректної оцінки геоекологічних ризиків розвитку зсувних процесів необхідно враховувати не тільки поточний стан гідрологічної мережі, але й історичну динаміку водного режиму та прогнозовані кліматично зумовлені зміни. У даному дослідженні цей аспект реалізовано через включення гідрологічного блоку у модель зсувної сприйнятливості у вигляді фактора “близькість до водотоків”.

2.5 Моделювання зсувних процесів за допомогою геоінформаційних систем

Геоінформаційні системи (ГІС) є невід'ємною частиною сучасних методів дослідження зсувних процесів. Роботи Г. І. Рудька [14] і Е. Д. Кузьменка зі співавторами [11, 16] заклали методичну основу вітчизняної школи ГІС-моделювання ЕГП. У цих роботах було реалізовано підхід експертно-евристичного зважування факторів з картографічним накладанням шарів у середовищі ГІС. Такий підхід дозволив отримати перші регіональні карти зсувної небезпеки для окремих районів Карпат.

Наступним етапом розвитку ГІС-моделювання в Україні стало впровадження статистичних методів аналізу зсувоініціюючих факторів. Ці методи забезпечили перехід від експертного зважування до об'єктивного підходу, який базується на аналізі фактичних даних, що суттєво підвищило якість регіональних моделей [22, 31, 117]. У роботах [11, 21, 22] продемонстровано ефективність цих методів для Карпатського регіону.

Починаючи з 2010-х років, впроваджуються методи машинного навчання (Random Forest, Gradient Boosting, Support Vector Machines, нейронні мережі) у регіональне ГІС-моделювання. Перехід до цих методів дозволив автоматизувати визначення вагових коефіцієнтів, враховувати нелінійні взаємодії між факторами, використовувати великі обсяги просторових даних. У роботах [40, 41] показано, що Random Forest забезпечує одну з найвищих точностей серед регіональних статистичних моделей зсувної сприйнятливості при помірній складності налаштування.

Поява хмарних платформ геопросторового аналізу, передусім Google Earth Engine (GEE) [46] забезпечила доступ до величезних архівів супутникових даних (Landsat, Sentinel, WorldPop, Hansen GFC, ESA WorldCover тощо) та обчислювальних потужностей, що радикально полегшує доступ до сучасних геоінформаційних методів. Фундаментальні можливості GEE для задач моніторингу довкілля в Україні розкрито у працях Л. І. Давибіди [47, 48]. У

даному дослідженні повний цикл моделювання зсувної сприйнятливості реалізовано саме на платформі Google Earth Engine (розділ 4).

Вибір Google Earth Engine основним середовищем зумовлений специфікою поставленого завдання, а саме регіональним моделюванням зсувної сприйнятливості територій переважно за дистанційно-зондувальними чинниками та методами, що ґрунтуються на аналізі фактичних даних (Frequency Ratio та Random Forest). Саме для таких задач платформа має вирішальні переваги: прямий доступ до петабайтних архівів супутникових даних (Landsat, Sentinel, Hansen GFC, ESA WorldCover тощо) без локального завантаження, паралельне серверне опрацювання довгих часових рядів, вбудовану реалізацію методу випадкового лісу, а також повну відтворюваність і масштабованість обчислень через програмний код [46–48].

Водночас GEE має й суттєві обмеження як середовище моделювання: робота в межах хмарного API та попередньо визначених обчислювальних операцій ускладнює реалізацію складних багат шарових моделей з тісною інтеграцією растрових, векторних і табличних даних, алгоритмів машинного навчання та фізично-детермінованих моделей стійкості схилу, а також інтеграцію локальних наземних та інженерно-геологічних спостережень - у цих аспектах класичні ГІС (QGIS, ArcGIS) є гнучкішими. Однак перелічені обмеження стосуються насамперед локального детерміністичного моделювання окремих зсувних ділянок, що не є предметом цього регіонального дослідження. Для задач, у яких класичні ГІС ефективніші (підготовка окремих векторних шарів та остаточне картографічне оформлення), у роботі застосовано QGIS, тоді як GEE використано як основне середовище опрацювання дистанційних даних і регіонального статистично-машинного моделювання зсувної сприйнятливості.

Для просторового моделювання зсувних процесів на регіональному рівні доцільно використовувати декілька основних підходів у ГІС-середовищі. Індексна модель LSA, яка ґрунтується на зважаному накладанні декількох факторних шарів з отриманням інтегрального показника сприйнятливості у діапазоні $[0; 1]$ або у вигляді дискретних класів (зазвичай 5 класів від дуже низької до дуже високої

сприйнятливості). Ваги факторів визначаються експертно (АНР) або статистично (FR, RF). Цей підхід реалізовано у даному дисертаційному дослідженні.

Моделі зсувної небезпеки з часовою компонентою, що передбачають додавання до моделі просторової сприйнятливості часової компоненти, що відображає ймовірність активізації зсуву у заданому часовому інтервалі. Часова компонента зазвичай описується за допомогою опадових порогів активізації або моделей, що враховують кумулятивні опадові історії у форматі ARI (Antecedent Rainfall Index).

Фізико-математичні (детерміністичні) моделі (TRIGRS, SHALSTAB, SINMAP) розраховують фактор стійкості схилу за фізичними законами механіки ґрунтів і забезпечують високу точність на локальному рівні, проте потребують детальних геотехнічних і гідрологічних даних для кожного схилу, недоступних у регіональному масштабі, тому в дослідженні не застосовуються.

У дослідженні розроблена модель належить до категорії гібридних: вона поєднує елементи індексної моделі LSA з сучасними методами машинного навчання (RF Feature Importance), кількісним статистичним калібруванням факторів, багатовимірним статистичним аналізом структури предикторів (K-means, кореляція, EFA, PCA) та ризик-орієнтованим підходом до фінальних карт. Повна реалізація всіх обчислень на платформі Google Earth Engine забезпечує повну відтворюваність та масштабованість підходу. Це дозволяє застосовувати розроблену методику до інших зсувонебезпечних територій Українських Карпат без додаткових модифікацій.

Важливим аспектом ГІС-моделювання є валідація отриманих моделей. Основним підходом для валідації моделей є розбиття задокументованих зсувних проявів на навчальну та тестову вибірки з подальшим розрахунком точності на тестовій частині [119].

2.6 Застосування дистанційного зондування для вивчення зсувів та ерозії

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є одним із найпотужніших сучасних інструментів для дослідження зсувних та ерозійних процесів. Поєднання високої просторової і часової розрізненості з глобальним покриттям та доступністю даних зробило ДЗЗ невід'ємною частиною регіональних геоекологічних досліджень.

Оптичне мультиспектральне зондування є найбільш широко використовуваним методом для характеристики лісового покриву, стану рослинності, земного покриву загалом. Основними супутниковими програмами оптичного зондування, результати яких використовуються у дослідженні, є програми Landsat та Sentinel-2.

Landsat (NASA/USGS) – найдовший глобальний архів супутникових знімків, розпочатий у 1972 році з Landsat 1 і триває до сьогодні (Landsat 8 – з 2013, Landsat 9 – з 2021). Просторова розрізненість сенсорів TM/ETM+/OLI становить 30 м, частота повторення – 16 днів. Колекція Landsat Collection 2 Tier 1 Level 2 доступна через GEE і містить радіометрично та атмосферно скориговані дані, придатні для кількісного аналізу. Для дисертаційного дослідження колекція Landsat використовується для аналізу ретроспективної динаміки лісового покриву за період 1990–2020 років [44].

Sentinel-2 (ESA Copernicus) – сучасна європейська програма мультиспектрального зондування, розпочата у 2015 році (Sentinel-2A) та 2017 році (Sentinel-2B). Просторова розрізненість – 10 м (видимий та ближній інфрачервоний діапазони) і 20 м (коротко- та середньоінфрачервоний діапазони). Частота повторення – 5 днів для території Європи. Для дисертаційного дослідження дані Sentinel-2 використані для обчислення амплітуди NDVI як одного з шести показників лісового блоку моделі [45].

Крім прямих даних щодо оптичного мультиспектрального зондування у роботі використано також оброблені дані. Зокрема, Hansen Global Forest Change [54] - глобальний продукт щодо моніторингу лісового покриву планети,

побудований на основі часових рядів супутникових знімків Landsat. Містить інформацію про щільність деревного покриву за роками, втрати деревного покриву, приріст лісу. Просторова розрізненність - 30 м. У дослідженні Hansen GFC використано як основне джерело для показників щільності лісу та інтенсивності втрат лісу за 2001–2023 рр. Ресурс ESA WorldCover (Європейське космічне агентство) [120] – глобальна карта земного покриву з просторовою розрізненністю 10 м, побудована на основі Sentinel-2 і Sentinel-1. Вона містить 11 класів земного покриву. У дослідженні використано, як базову основу для формування маски лісу та обчислення показника близькості до межі лісу. Портал Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100 [65] – глобальний продукт з просторовою розрізненністю 100 м, побудований на основі Proba-V і Sentinel-2. Доступні щорічні версії 2015–2019 років. Зазначений продукт є унікальним завдяки наявності класифікаційного показника (поля) типів лісу, що містить шість категорій (невідомий/нелісовий, вічнозелений хвойний, вічнозелений широколистяний, листяний хвойний, листяний широколистяний, змішаний ліс). У дослідженні CGLS-LC100 2019 р. використано як основу для одного з шести лісових предикторів - типу лісу, що калібрується категоріальним методом Frequency Ratio.

Радарне зондування (SAR, InSAR) та лідарне знімання (LiDAR) забезпечують вимірювання деформацій поверхні з міліметровою точністю та надзвичайно детальні моделі рельєфу відповідно, проте в дослідженні безпосередньо не використовуються - модель спирається на оптичні дані (Sentinel-2), цифрову модель рельєфу ALOS AW3D30 та глобальні продукти лісового покриву.

Окремим і цінним напрямом є використання даних ДЗЗ для ідентифікації нових зсувних проявів за результатами катастрофічних подій. Методики автоматизованої ідентифікації розроблені у працях А. Мондіні зі співавторами [95], Ф. Гуцетті зі співавторами [5], що ґрунтуються на аналізі спектральних змін у межах зсувних ділянок (поява нових вирубок, знищення рослинності, зміна

NDVI). Ці методи є перспективними для швидкого оновлення регіональних кадастрів зсувних проявів після паводкових подій у Карпатах.

У дослідженні дані ДЗЗ використовуються комплексно – як для формування факторних шарів моделі зсувної сприйнятливості (морфометричні параметри з ALOS AW3D30, гідрографія з MERIT Hydro, лісові фактори з Hansen GFC, ESA WorldCover, CGLS-LC100, Sentinel-2), так і для ретроспективного аналізу динаміки лісового покриття за довгими часовими рядами Landsat (1990–2020 рр.). Повна обробка виконується на хмарній платформі Google Earth Engine, що забезпечує уніфікованість підходу та відтворюваність результатів (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 - Основні джерела даних дистанційного зондування Землі та глобальні геопросторові продукти, використані у дослідженні: Landsat 4-9, Sentinel-2, ALOS AW3D30, Hansen Global Forest Change, ESA WorldCover, Copernicus CGLS-LC100 та MERIT Hydro.

Програмне забезпечення та джерела даних. Усі картографічні матеріали роботи (карти зсувної сприйнятливості, ризику та природоохоронного пріоритету, факторні та геолого-тектонічні шари) обчислено на хмарній платформі Google Earth Engine (JavaScript API) з остаточним картографічним оформленням і

експортом у середовищі QGIS. Статистичні графіки (гістограми, кореляційні матриці, PCA, EFA, K-means, ROC-криві, діаграми важливості факторів) побудовано засобами мови Python (бібліотека matplotlib). Основними джерелами вхідних даних слугували відкриті продукти дистанційного зондування - ALOS AW3D30 (рельєф), Landsat 4–9 та Sentinel-2 (ретроспективна динаміка лісистості та амплітуда NDVI), Hansen Global Forest Change, ESA WorldCover, Copernicus Global Land Cover (лісові фактори), MERIT Hydro (гідрографія), WorldClim (опади), WorldPop і JRC GHSL (експозиція населення та забудови), база даних WDPA/IUCN (природоохоронні території), а також кадастр зсувних проявів ДНВП «Геоінформ України».

Висновки до розділу 2

За результатами аналізу особливостей розвитку зсувних та ерозійних явищ в Українських Карпатах сформульовано такі висновки.

1. Зсувні та ерозійні процеси являють собою дві взаємопов'язані групи екзогенних геологічних процесів, що взаємно підсилюють одна одну у гірських районах Карпат. Механізм активізації мілких зсувів-сплавів у флішових товщах регіону визначається комплексом чинників – крутизною схилу, щільністю зчеплення у потенційній площині ковзання, поровим тиском води, станом рослинного покриву. Саме водний чинник є провідним тригером активізації, що робить гідрологічний режим та стан лісу ключовими складовими оцінки зсувної небезпеки.

2. Фізико-географічна характеристика Українських Карпат (середньогірський рельєф 200–2061 м з переважаючою крутизною 15–35°, висока зволоженість 700–1800 мм/рік, значна лісистість 50–70 %, помірна сейсмічність) у сукупності з геологічною будовою (переважання флішових відкладів крейдово-палеогенового віку, значна тектонічна порушеність, потужна кора вивітрювання) створюють специфічні умови, за яких зсувно-ерозійні процеси мають регулярний, масштабний і екологічно значущий характер. Базовий полігон

експериментального дослідження у верхів'ях р. Теребля (25×25 км, 236 зсувних проявів) є репрезентативним для гірської частини Закарпатської області.

3. Геолого-тектонічні умови базового полігону представлені флішовими товщами Кросненського та Дуклянського покривів, у межах яких виокремлено три літологічні класи. Встановлено, що 73,3 % задокументованих зсувних проявів (173 з 236) приурочено до середньоритмічного флішу (літологічний клас 2), що підтверджує загальновідому роль цього літологічного типу як основного середовища зсувоутворення у Карпатах. Тектонічні розломи, що мають північно-західне простягання, додатково впливають на просторовий розподіл зсувів через створення зон підвищеної тріщинуватості та ослабленої міцності порід.

4. Гідрологічні та гідрогеологічні умови Карпатського регіону характеризуються високою зволоженістю, густою гідрографічною мережею ($1,2\text{--}1,5$ км/км²), переважно дощовим живленням річок, значною мінливістю витрат і високою частотою паводкових подій. У межах базового полігону дослідження 31 % зсувних проявів локалізовано у смузі 0–250 м від найближчого водотоку, що підтверджує провідну роль ерозійного підмиву та концентрації стоку у формуванні зсувної небезпеки. Вплив кліматичних змін проявляється через збільшення частоти екстремальних опадів, скорочення тривалості снігового покриву та зростання ерозійних процесів на ділянках з деградованим лісовим покривом.

5. Сучасний арсенал методів ГІС-моделювання зсувних та ерозійних процесів еволюціонував від експертно-евристичних моделей 1990-х років до сучасних гібридних підходів на хмарних платформах. Найбільш перспективним є поєднання статистичних методів з методами машинного навчання (RF) та багатовимірним статистичним аналізом на платформі Google Earth Engine, що і реалізовано у даному дисертаційному дослідженні.

6. Сучасні дані дистанційного зондування Землі (Landsat, Sentinel-2, ALOS AW3D30, MERIT Hydro, Hansen Global Forest Change, ESA WorldCover, Copernicus CGLS-LC100) становлять потужну інформаційну основу для регіонального

моделювання зсувних та ерозійних процесів. Особливо цінним є продукт Copernicus CGLS-LC100, який містить класифікаційний показник (параметр) типів лісу. Цей показник в межах дисертаційного дослідження застосовано для території Українських Карпат як самостійний категоріальний чинник лісового блоку моделі зсувної сприйнятливості.

РОЗДІЛ 3

ЛІСОВИЙ ПОКРИВ ЯК ЧИННИК РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ТА ЕРОЗІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1 Фактор впливу рослинності на розвиток зсувних процесів

Рослинний покрив, і насамперед лісовий, виконує інтегральну роль у формуванні стійкості схилових систем у гірських регіонах світу. Цей вплив реалізується через складну взаємодію механічних, гідрологічних і морфодинамічних механізмів, які одночасно діють у межах деревостану і разом забезпечують стабілізуючу функцію лісу. Водночас стан лісового покриву, його структура, динаміка і породний склад деревостану є чинниками, що значно варіюють у просторі та часі, що створює диференціацію зсувної сприйнятливості території за лісовою ознакою [51, 127].

Вплив рослинного покриву на стійкість схилів систематизовано у фундаментальній монографії Р. Сідла і Х. Очіаї «Landslides: Processes, Prediction, and Land Use» [51]. Автори виокремлюють три основних типи впливу. Узагальнено три ключових типи впливу рослинного покриву на стійкість схилів - механічний, гідрологічний та морфодинамічний - наведено на рис. 3.1.

Механічний вплив – забезпечення додаткового зчеплення ґрунту за рахунок армуючого впливу корневих систем деревостану. Коренева мережа діє як природне армування, що зв'язує частинки ґрунту, перешкоджає формуванню безперервних площин ковзання, підвищує загальну міцність приповерхневої товщі. Ефективність механізму залежить від щільності коренів, їхньої глибини проникнення у ґрунт, міцності коренів на розрив. У роботі [128], встановлено, що додаткове зчеплення, яке забезпечують корені деревостану у приповерхневій товщі, коливається у межах 1,0–17,5 кПа залежно від виду дерев, густоти корневих систем, віку насадження та ґрунтово-гідрологічних умов.

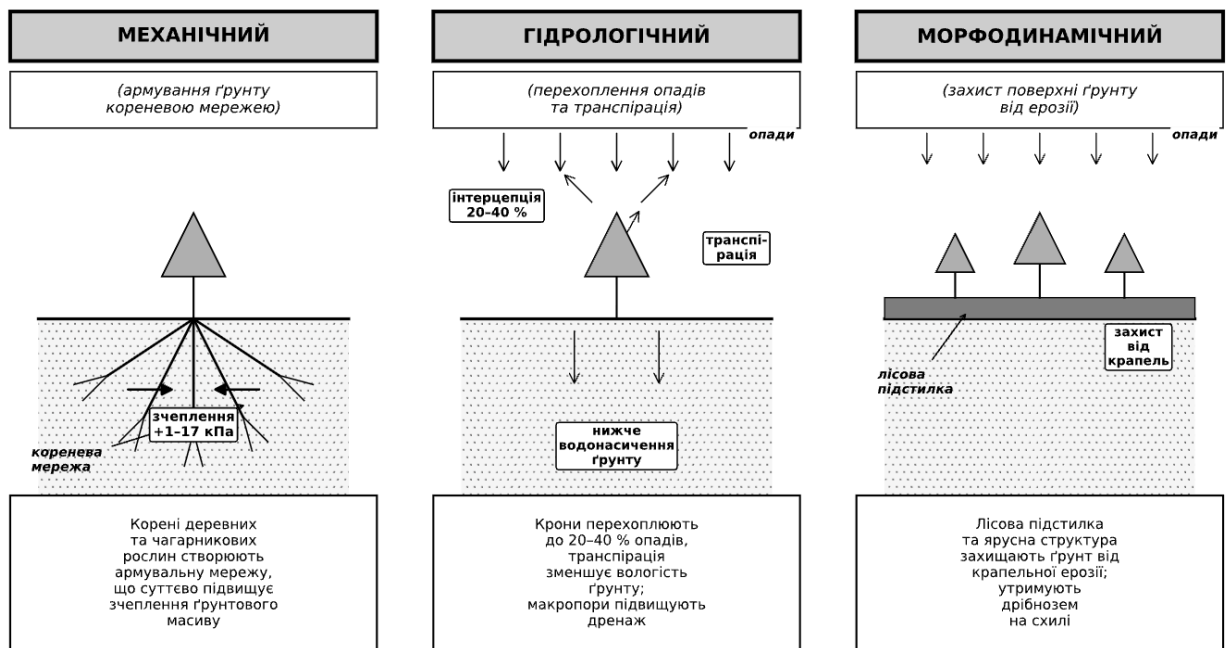


Рисунок 3.1 - Три механізми впливу рослинного покриву на стійкість схилів (механічний, гідрологічний, морфодинамічний), за [51]

Гідрологічний вплив – регулювання водного балансу схилу деревостаном через три основні процеси: інтерцепцію (перехоплення кронами частини атмосферних опадів, що випаровується або стікає по стовбуру); транспірацію (активне відкачування води з ґрунту через кореневу систему з наступним випаровуванням через листя); формування розвиненої системи ґрунтових макропор (мертві корені, ходи ґрунтової біоти), які сприяють глибокій інфільтрації та відведенню надлишкової води з приповерхневої зони. Сумарний ефект гідрологічного механізму – це зниження рівня насичення ґрунту водою під час опадових подій та зменшення порового тиску на потенційних площинах ковзання.

Морфодинамічний вплив – захист ґрунтової поверхні від ударного впливу дощових крапель, від поверхневого розмиву та від лінійної ерозії. Лісова підстилка, чагарниковий та трав'янистий яруси, моховий покрив гасять енергію крапель дощу, тим самим запобігаючи дезінтеграції ґрунтових агрегатів та переміщенню частинок ґрунту вниз по схилу. Саме цей механізм є основою протиерозійної ролі лісу у гірських районах.

Для Українських Карпат усі три типи впливу мають своєрідні характеристики, зумовлені конкретними умовами регіону. По-перше, значна потужність кори вивітрювання (0,5–5 м) та поширення мілких зсувів-опливин як домінантного типу зсувних процесів означає, що механічний вплив (коренева армування) має потенційно високу значущість у стабілізації схилів. Коренева система буку, ялиці та інших деревних порід, що досягає глибин до 1,5–2,5 м, може значною мірою охоплювати потенційні площини ковзання мілких зсувів.

По-друге, висока зволоженість Карпатського регіону (1200–1800 мм опадів/рік) створює умови, за яких гідрологічний вплив є критично важливим. У зрілому зімкнутому деревостані інтерцепція крон може сягати 20–40 % річних опадів [129], що суттєво зменшує кількість води, яка досягає поверхні ґрунту. Транспіраційна активність деревостану влітку знижує вологість ґрунту у приповерхневому шарі, тим самим забезпечуючи «резерв» вологості перед наступними опадовими подіями.

По-третє, гірський рельєф з крутизною схилів 15–40° [125] і висока інтенсивність окремих опадових подій роблять морфодинамічний вплив важливим для збереження ґрунтового покриву від змивання. Непорушений ліс з повноцінною лісовою підстилкою забезпечує майже повне захоплення енергії дощових крапель.

Однак роль лісу у стабілізації схилів не є абсолютно позитивною і залежить від низки додаткових чинників. По-перше, ефективність кореневого армування суттєво знижується на схилах з потужною корою вивітрювання або з площиною ковзання, розташованою нижче зони активних коренів. По-друге, зрілі деревостани створюють додаткове навантаження на схил за рахунок маси крон і стовбурів, а вітрові навантаження можуть призводити до передачі значних зусиль у ґрунт, особливо для неглибоко укорінених смерекових деревостанів на крутих схилах. По-третє, вітровали зрілих дерев у періоди шквальних вітрів нерідко супроводжуються вивертанням корневих систем разом з прилеглою корою вивітрювання – що функціонально еквівалентно початковій фазі зсувної активізації [130].

Мішані буково-ялицево-смерекові деревостани, що є типовими для середнього гірського поясу Карпат, поєднують переваги різних порід і забезпечують найбільш стабільну стабілізуючу функцію на схилах. У працях С. М. Стойка [68] та В. І. Парпана, Ю. С. Шпарика [66] обґрунтовано екологічну цінність природних мішаних карпатських деревостанів і показано, що широкомасштабна заміна природних типів лісу на штучні одновікові смерекові монокультури (що відбувалася на значних площах у ХХ столітті) призвела до істотного зниження стабілізуючої функції лісу і підвищення зсувної та вітровальної вразливості гірських схилів.

У контексті геоекологічного підходу до оцінки зсувних ризиків лісовий покрив слід розглядати не лише як набір окремих механізмів впливу, але як цілісну екосистемну компоненту гірської геосистеми. Ліс виконує інтегральну регулятивну функцію у взаємодії з іншими компонентами геосистеми – ґрунтами, водними ресурсами, мікрокліматом [124]. Порушення стану лісового покриву (вирубки, всихання, фрагментація) веде до каскадних змін у гідрологічному режимі, ерозійних процесах, температурному режимі ґрунту, біорізноманітті, які у сукупності можуть значно посилити зсувну активність протягом десятків років після безпосередньої події порушення.

3.2 Вплив вирубки лісів на розвиток зсувних процесів. Оцінка впливу лісу на поверхневий стік на схилах

Антропогенна трансформація лісового покриву – передусім вирубки різних типів – є одним з провідних чинників підвищення зсувної та ерозійної активності у гірських регіонах світу. Незважаючи на те, що сам факт негативного впливу вирубок на стійкість схилів є загальновизнаним, деталізоване кількісне оцінювання цього впливу та механізмів його реалізації залишається активним напрямом сучасних досліджень. Для Українських Карпат, де інтенсивна антропогенна трансформація лісів у період 1990–2010 років суттєво змінила просторову структуру лісового покриву, питання впливу вирубок на зсувно-ерозійні процеси є особливо актуальним. Узагальнене зображення

геомеханічних і гідрологічних взаємодій на залісеному та знелісненому фрагментах схилу, що формують основу подальшого якісного та кількісного аналізу впливу вирубок на стійкість схилів, наведено на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 - Схематичний профіль схилу з відображенням взаємодії чинників на залісений та знеліснений ділянках

На наведеному схематичному профілі (рис. 3.2) відображено типову для Українських Карпат стратиграфічну послідовність: лісова підстилка потужністю 0,1–0,3 м, кора вивітрювання потужністю 0,5–5 м та флішова товща корінних порід. На залісеному фрагменті схилу інтегральна дія крон, кореневих систем та лісової підстилки забезпечує перехоплення значної частки опадів, переважно вертикальну інфільтрацію у кору вивітрювання та поступове відведення води через систему макропор. На знелісненій ділянці (вирубка або прикrajова зона) припиняється ефект інтерцепції та транспірації, зростає поверхневий стік, а підповерхневий стік концентрується вздовж покрівлі флішового субстрату, який слугує потенційною площиною ковзання при перевищенні граничного рівня водонасичення. Таким чином, прикrajові зони та свіжі вирубки виявляються найбільш чутливими ділянками з точки зору ініціювання мількіх зсувів-опливин - саме цей зв'язок далі підтверджується кількісно за результатами картометричного аналізу та FR-калібрування лісових факторів моделі (розділ 4).

Суцільні рубки головного користування є найбільш деструктивним типом лісогосподарського втручання з точки зору геоекологічної стабільності. Після такої рубки на схилі одночасно припиняються усі три механізми впливу лісу на стійкість – кореневе армування, гідрологічне регулювання, протиерозійний захист. У перші 2–3 роки після рубки зберігається певний рівень кореневого армування за рахунок мертвих коренів, проте у подальшому, внаслідок гниття і розкладу деревини, цей ефект поступово зникає. Одночасно зникає ефект інтерцепції й транспірації, що призводить до різкого зростання водонасиченості приповерхневої товщі під час опадів. Максимальний рівень нестабільності схилу, як правило, досягається у межах 5–15 років після рубки – у так званому «вікні підвищеної нестійкості» [131, 132].

Численні дослідження у різних регіонах світу підтверджують статистично значущу приуроченість активізації зсувів до ділянок недавніх суцільних рубок. У праці Е. Шмальца зі співавторами «The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information» [59] на матеріалах Австрійських Альп показано, що ризик активізації зсувів на ділянках рубок головного користування у 1,8–2,5 раза перевищує базовий рівень у непорушених лісових масивах. У праці [60] продемонстровано, що знеліснення є провідним чинником зростання зсувної небезпеки у тропічних гірських районах. Робота [61] підтверджує загальносвітову тенденцію до зростання уваги дослідників до зв'язку між антропогенною трансформацією лісу та активізацією зсувних процесів.

Окрему проблему становить розгалужена мережа лісогосподарських доріг та трелювальних волоків, яка формується у процесі господарської експлуатації лісів. Лісові дороги в гірських умовах створюють низку негативних геоекологічних ефектів, зокрема, перехоплюють поверхневий та підповерхневий стік, концентруючи його в обмежених лінійних коридорах, формують ерозійні врізи глибиною до 1–2 м під час великих опадових подій, порушують природну гідрогеологічну структуру схилу, а також спричиняють локальне підрізання схилових мас, що знижує їх стійкість. Фундаментальне дослідження Дж. Вемпл, Ф. Свансона та Дж. Джонс «Forest roads and geomorphic process interactions» [133]

виявило, що мережа лісових доріг може бути самостійним лінійним концентратором зсувної активності, причому інтенсивність зсувних процесів поблизу доріг у 2–6 разів перевищує базовий рівень для навколишніх ділянок.

Фрагментація лісових масивів – ще один важливий аспект антропогенної трансформації лісу, що впливає на зсувну небезпеку. Фрагментація збільшує відносну протяжність прикрайових зон лісу, які з точки зору геоекологічної стабільності є особливо вразливими. Прикрайова зона – це перехідна смуга між зімкнутим лісовим масивом і відкритою територією, де одночасно: змінюється гідрологічний режим (припиняється інтерцепція та транспірація, зростає інфільтрація та поверхневий стік). У прикрайових зонах формується специфічний біокліматичний режим (вища температура влітку, нижча вологість повітря, інша інтенсивність сонячної радіації), локалізується більшість антропогенних втручань (лісові дороги, волоки, сільськогосподарські угіддя), змінюється структура кореневої системи дерев, що ростуть на межі. Сукупність цих чинників робить прикрайові зони лісу ділянками підвищеної зсувної сприйнятливості.

Вплив вирубки лісу на поверхневий стік на схилах є одним з найбільш вивчених аспектів гідрологічного впливу лісів. Класичні дослідження виконувалися у форматі експериментів, коли два суміжні водозбори з подібними природними умовами, один з яких залишається непорушеним як контрольний, а на другому виконується експериментальна рубка лісу, відстежуються за гідрологічними характеристиками до і після рубки. Узагальнення результатів: 94 таких експериментів, виконані Дж. Бошем і Дж. Хьюлеттом [134], а пізніше доповнені Е. Брауном зі співавторами [135], дозволять сформулювати такі узагальнюючі результати:

Вирубка лісу призводить до статистично значущого збільшення річного стоку води з водозбору. Середня величина збільшення становить 25–40 мм стоку на кожні 10 % вирубаного лісу, але може варіювати в широких межах залежно від кліматичних умов і породного складу.

Після вирубки суттєво зростає пікова витрата під час паводкових подій, часто у 1,5–3 рази. Цей ефект особливо виражений на малих водозборах (площа

до 10 км²), де вплив рубки не згладжується просторовим усередненням. Прискорюється добігання води з водозбору до русла водотоку внаслідок зменшення транспірації та зростання щільності поверхневого стоку, часто у 2–5 разів. Якість води у водотоках знижується через збільшення твердого стоку, мутності, хімічного забруднення.

Усі описані ефекти поступово нівелюються з часом при відновленні лісового покриву, однак швидкість цього процесу залежить від регіональних умов і може складати від 5–10 до 30–50 років до повного відновлення попереднього гідрологічного режиму.

Для Карпатського регіону ці результати підтверджуються дослідженнями С. М. Стойка [68], В. І. Парпана і Ю. С. Шпарика [66], О. М. Стефурак [67]. Особливо яскраво вплив знеліснення на поверхневий стік проявився під час катастрофічних паводкових подій 1998 та 2001 років у басейні Тиси. У монографії С. В. Гошовського, Г. І. Рудька та П. В. Блінова [23] задокументовано, що на схилах, де протягом попередніх 5–15 років виконувалися інтенсивні рубки, спостерігалася суттєво вища щільність активізованих зсувів порівняно з непорушеними лісовими масивами. Таким чином, підтверджується прямий зв'язок між антропогенною трансформацією лісу, гідрологічним режимом та активізацією зсувно-ерозійних процесів.

Історичний контекст антропогенного впливу на лісове господарство Українських Карпат має декілька виражених періодів. У ХХ столітті масштабні лісозаготівлі проводилися у радянський період (1950–1980-ті роки), з пріоритетним експлуатаційним підходом до лісових ресурсів. Перехідний період 1990–2000-х років, що характеризувався соціально-економічною кризою та послабленням регуляторного контролю, призвів до активізації нелегальних рубок і загальної інтенсифікації лісозаготівель. Період 2010-х років характеризувався частковою стабілізацією ситуації через посилення природоохоронного законодавства (мораторій на рубки головного користування у лісах I категорії захисності, розширення мережі природно-заповідних територій) та поступовим природним поновленням деревостанів.

У сучасних умовах зберігається декілька ключових викликів для раціонального лісокористування у Карпатах, що впливають на зсувні ризики. Це фрагментована структура лісового покриву з підвищеною часткою крайових зон, кліматично зумовлені всихання смерекових деревостанів (короїдні епіфітотії), що функціонально еквівалентні вирубкам, зростаючий тиск нелегальних рубок у віддалених гірських районах, необхідність адаптації методик лісокористування до нових кліматичних умов з урахуванням збереження геоекологічних функцій лісу.

З погляду моделювання зсувної сприйнятливості, описані процеси вимагають систематичного врахування не лише поточного стану лісового покриву, але й його історичної динаміки за довгі часові ряди. Саме тому у даному дисертаційному дослідженні до лісового блоку моделі (розділ 4) включено показник втрат лісу за період 2001–2023 рр., що формується на основі даних Hansen Global Forest Change і відображає 23-річну історію антропогенної трансформації лісу.

3.3 Оцінка проблеми достовірності даних про лісові ресурси. Оцінка можливості використання даних ДЗЗ

Якість і достовірність даних про лісові ресурси є ключовою передумовою для коректного врахування лісового покриву у моделях зсувної сприйнятливості та у геоекологічних оцінках загалом. У цьому підрозділі проаналізовано проблеми достовірності традиційних джерел даних про ліси в Україні та обґрунтовано можливість і переваги використання сучасних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для подолання цих проблем.

Традиційними джерелами інформації про лісові ресурси в Україні є ряд інформаційних ресурсів, які охарактеризуємо нижче.

Матеріали лісовпорядкування є основним офіційним джерелом детальної атрибутивної інформації про лісовий фонд України. Лісовпорядкування здійснюється спеціалізованими підприємствами системи Державного агентства лісових ресурсів України у циклічному режимі (плановий цикл 10 років). Матеріали містять детальну характеристику кожної лісової ділянки за такими

показниками: породний склад деревостану (у форматі формули складу), вік, повнота, бонітет, запас деревини, тип лісорослинних умов, структура ярусів, вид відновлення [136]. Переваги лісовпорядкувальних матеріалів – висока атрибутивна детальність і традиційна якість; недоліки – значний цикл оновлення (до 10 років), що не дає оперативної інформації про поточні зміни, та обмежена доступність даних для широкого кола користувачів.

Державний лісовий кадастр є систематизованим джерелом даних про стан, розподіл і використання лісів України, формується на основі лісовпорядкувальних матеріалів та інших офіційних джерел. Кадастр містить агреговані показники за адміністративно-територіальним поділом [136]. Переваги – офіційний статус, систематизований характер; недоліки – ще більший рівень агрегування порівняно з матеріалами лісовпорядкування, обмежена просторова деталізація.

Топографічні карти різних масштабів (від 1 : 10 000 до 1 : 200 000) містять картографічне зображення лісових масивів як площинних об'єктів без деталізації внутрішньої структури. Топографічні карти були базовим джерелом інформації про розподіл лісів у територіальному плануванні. Переваги їх є стандартизований формат, національне покриття, а недоліками обмежена деталізація, застарілість значної частини матеріалів, обмежена доступність.

Галузева звітність Державного агентства лісових ресурсів України містить узагальнену статистичну інформацію про стан лісового фонду, обсяги лісозаготівель, лісовідновлювальні роботи, що оформлюється у формі щорічних звітів та інформаційних бюлетенів [137].

Проблеми достовірності традиційних джерел даних про лісові ресурси в Україні можна узагальнити за декількома основними аспектами. Лісовпорядкувальні цикли оновлення до 10 років не забезпечують оперативної інформації про поточні зміни лісового покриву, особливо у контексті швидких трансформацій, пов'язаних з нелегальними рубками, вітровалами, всиханням деревостанів. Між циклами лісовпорядкування фактичний стан лісу може значно відрізнятись від задокументованого.

Проблема нелегальних рубок. У період 1990–2010 років в Україні значні обсяги лісозаготівель виконувалися поза офіційним документуванням, що призводило до розбіжностей між офіційною статистикою та фактичним станом лісового фонду. Хоча ситуація за останні роки поступово стабілізувалася, «тіньовий» компонент у лісогосподарській діяльності Карпатського регіону до кінця не усунено.

Офіційна статистика агрегована за адміністративно-територіальними одиницями (область, район, лісгосп), що не дозволяє виконувати детальний просторовий аналіз на рівні окремих схилів або водозборів, необхідний для геоекологічного моделювання зсувних процесів.

Проблема доступності даних. Детальні лісовпорядкувальні матеріали в Україні традиційно мають обмежений доступ, що ускладнює їх використання для академічних та прикладних досліджень. Хоча у світовій практиці відбувається поступовий перехід до відкритих даних про лісові ресурси, для України цей процес знаходиться на початковому етапі.

Різні регіональні підприємства лісовпорядкування можуть застосовувати дещо відмінні методики класифікації, що створює проблеми при зіставленні даних між регіонами. Це особливо актуально для Карпатського регіону з його складною природно-територіальною структурою.

Подолання описаних проблем у сучасних умовах можливо через активне використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) як альтернативного або доповнюючого джерела інформації про лісові ресурси. Супутникові програми Landsat, Sentinel та інші забезпечують регулярне покриття всієї території планети з єдиною методикою зйомки, що дозволяє виконувати просторово-однорідний аналіз у будь-яких масштабах – від локального до регіонального і глобального. Архів Landsat з 1972 року, Sentinel-2 з 2015 року забезпечують унікальні можливості для ретроспективного аналізу динаміки лісового покриття за багато десятиліть. Це принципово важливо для оцінки кумулятивних ефектів антропогенної трансформації лісу.

Супутникові дані відображають фактичний стан лісового покриву незалежно від якості офіційної документації, нелегальних рубок, різниці у методиках реєстрації. Це робить ДЗЗ ефективним інструментом для верифікації традиційних джерел інформації.

Сучасні продукти ДЗЗ (Sentinel-2 – 10 м, Landsat – 30 м, ESA WorldCover – 10 м, Hansen GFC – 30 м, Copernicus CGLS-LC100 – 100 м) забезпечують достатню деталізацію для регіонального моделювання зсувних процесів з просторовою розрізненністю 25–30 м.

Усі провідні програми ДЗЗ забезпечують відкритий доступ до даних (Landsat, Sentinel, ESA WorldCover, Copernicus Global Land Cover, Hansen GFC), що робить їх потужним інструментом для академічних та прикладних досліджень.

ДЗЗ дозволяє отримувати не тільки бінарні класифікації (ліс / не ліс), але й неперервні кількісні показники – щільність деревного покриву у відсотках, індекси вегетації, амплітуди сезонних змін NDVI.

Водночас використання ДЗЗ у гірських умовах Карпатського регіону має певні методичні обмеження, які необхідно враховувати.

Висотні ефекти та тіньові зони на крутих схилах можуть спотворювати оптичні характеристики знімків, що призводить до помилок класифікації. Для подолання цього ефекту застосовуються топографічні корекції, а також комбінування оптичних і радарних даних.

Висока хмарність у гірських районах, особливо у вегетаційний період, зменшує кількість придатних для аналізу знімків. Комбінування даних різних супутників (Landsat + Sentinel) дозволяє частково скомпенсувати цю проблему.

Сучасні глобальні продукти дозволяють розрізняти основні категорії типу лісу (хвойний/широколистий, вічнозелений/листяний), але не забезпечують детальної класифікації на рівні окремих деревних порід. Для детальнішої класифікації необхідне доповнення ДЗЗ наземними дослідженнями. Точність супутникових класифікацій у гірських умовах Карпат може коливатися від 75 до 95 % залежно від типу місцевості та методики обробки. Валідація за наземними даними є необхідним елементом контролю якості.

Таким чином, використання даних ДЗЗ як основного джерела інформації про лісовий покрив для задач геоecологічного моделювання зсувних ризиків в Українських Карпатах є методично обґрунтованим, ефективним і сучасним підходом. Основні обмеження компенсуються через комплексне поєднання декількох продуктів ДЗЗ, застосування топографічних корекцій та крос-валідацію з іншими джерелами.

На рисунку 3.3 наведено картограму з точками зсувів та накладеними векторними полігональними просторовими об'єктами лісового покриву за даними топографічної карти для території 75×75 км (рис. 2.2). На ділянці зареєстровано 1509 точок зсувів. Зсувні процеси спостерігаються як всередині лісових масивів, так і поза їх межами [62].

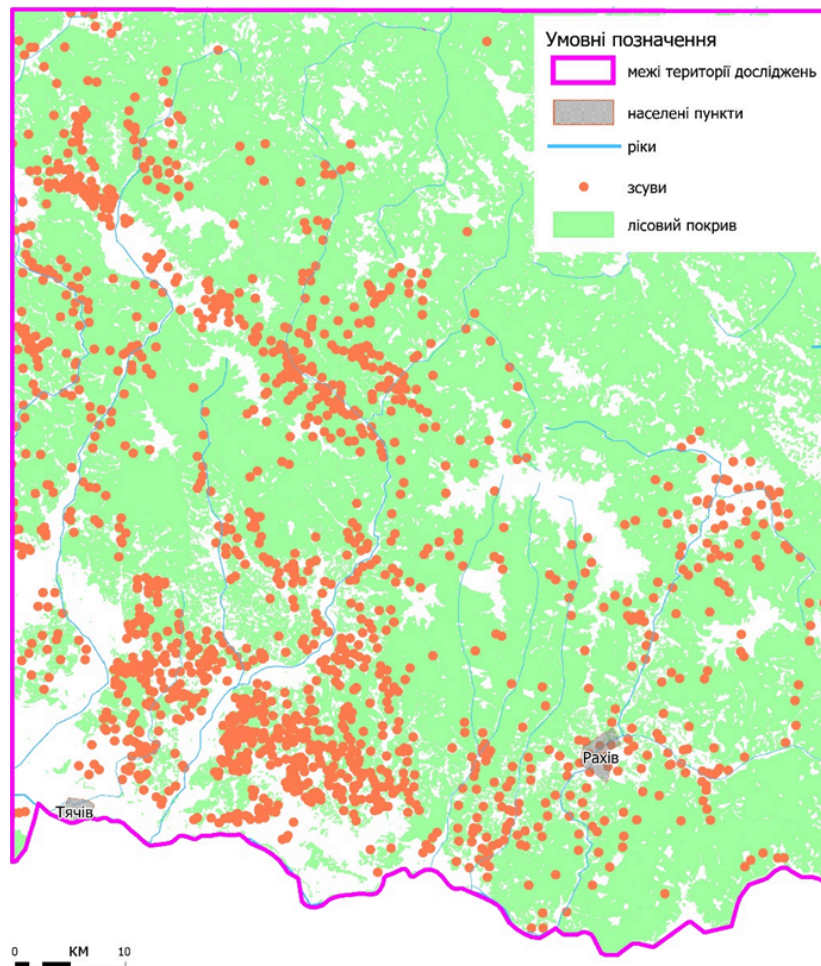


Рисунок 3.3 - Картограма поширення лісових масивів за даними топографічної карти

Для оцінки зміни лісового покриву варто використовувати дані дистанційного зондування Землі. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) відіграє

вирішальну роль у вивченні та оцінці змін площ лісового покриву та її впливу на розвиток зсувних процесів [54, 59, 130]. Цей метод дозволяє здійснювати моніторинг стану лісів, використовуючи дані, отримані з супутникових знімків та інших джерел геопросторової інформації. Шляхом аналізу цих даних можна виявляти зміни у структурі та розмірах лісових масивів, оцінювати їхню висоту, густину та інші параметри, що є важливими для розуміння екосистем та їхньої динаміки. Дистанційне зондування Землі забезпечує можливість систематично відстежувати зміни в лісовому покриві на великих територіях та протягом тривалого періоду часу. Це дозволяє не лише виявляти вже існуючі зміни, а й вивчати їхні причини та передбачати майбутні тенденції. Більш того, дистанційне зондування може використовуватися для моніторингу лісів у важкодоступних або екологічно чутливих районах, де проведення терестричних досліджень є складним або неможливим. Це робить ДЗЗ незамінним інструментом для оцінки стану лісів у великому масштабі та на різних рівнях географічного поділу.

Також важливо зазначити, що дані, отримані з ДЗЗ, можуть бути використані для розробки та підтримки природоохоронних програм та політик, спрямованих на збереження та відновлення лісових ресурсів. Інформація, отримана за допомогою ДЗЗ, може служити основою для прийняття обґрунтованих рішень у сфері лісового господарства та екологічного забезпечення сталого розвитку.

Для геопросторового аналізу використаємо дані з порталу Об'єднаного дослідницького центру Євросоюзу (EC JRC), де представлено глобальна карта лісового покриву на 2020 рік. Фрагмент карти наведено на рис. 3.4. Глобальна карта лісового покриву створюється на основі комбінації існуючих глобальних просторових шарів земного покриву, землекористування та висоти дерев. Вона має на меті відобразити стан лісового покриву до 31 грудня 2020 року. Глобальний земний покрив слугує базовим шаром для визначення протяжності деревного покриву на 2020 рік з просторовою розрізненністю 10 м [62].

Одержано фрагмент карти на досліджувану ділянку у форматі растрового покриття, далі за допомогою геоінформаційної системи QGIS виконано перетворення растрового формату у векторний.

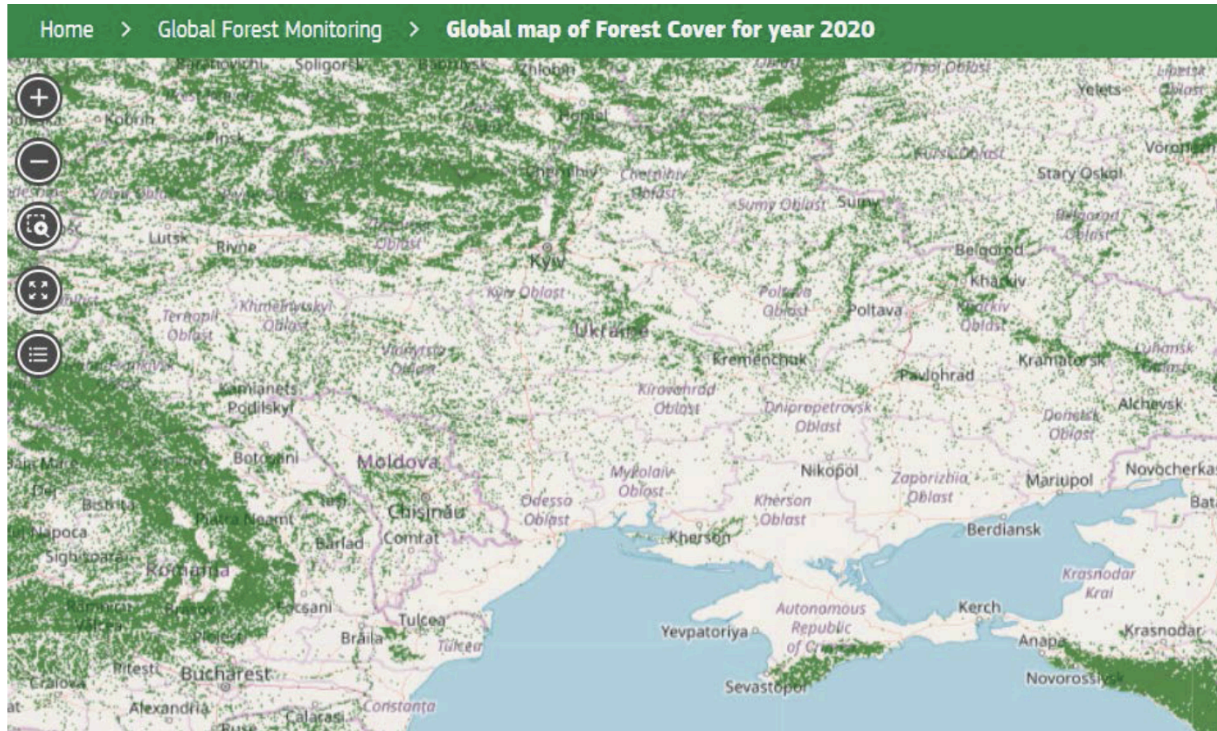


Рисунок 3.4 - Фрагмент глобальної карти лісового покриття на 2020 рік
(<https://forest-observatory.ec.europa.eu/forest/gfc2020>)

На рис. 3.5 наведено картограму накладання даних щодо лісових масивів з топографічної карти та отриманих з глобальної карти лісового покриття 2020 року. Як випливає з картограми існують ділянки які, відображають зміну меж лісових масивів, але це може бути також наслідком різного підходу до отримання меж лісових масивів.

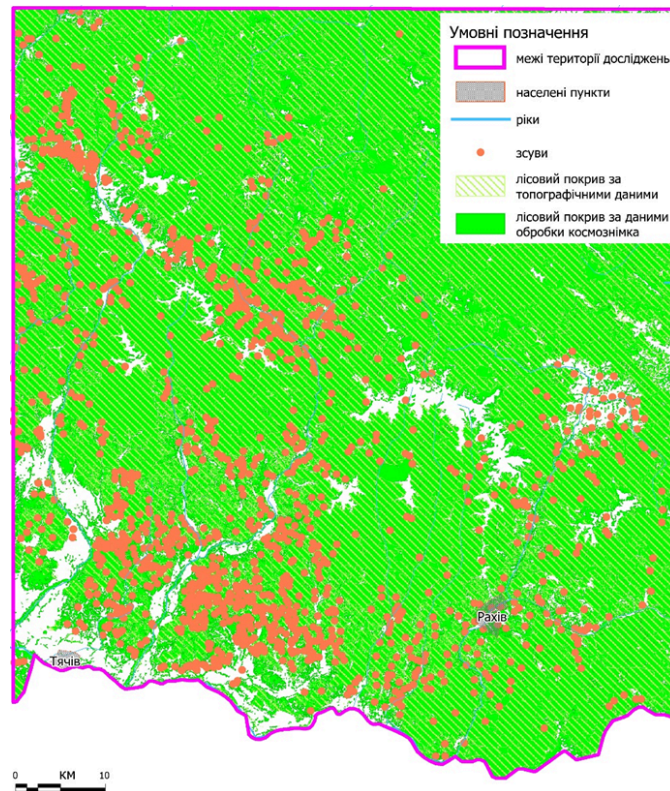


Рисунок 3.5 - Картограма накладених шарів поширення лісу за даними топографічної карти та глобальної карти лісового покриття 2020 року

Спробуємо оцінити розташування точок прояву зсувних процесів відносно до межі лісу. Для цього проведемо картометричний аналіз – виміряємо відстань від центру зсуву до межі лісу. На рис. 3.6 наведено суміщену гістограму розподілу параметра «відстань до межі лісу» одержану за даними проведених картометричних операцій у середовищі ГІС за даними лісових масивів з топографічної карти та отриманих з глобальної карти лісового покриття 2020 року. Отримані розподіли є наближеними до нормального, і вказують що розвиток зсувних процесів тяжіє до межі лісу. Від’ємні значення інтервалу гістограми, що характеризує величину «відстань до межі лісу» вказують що зсуви розташовані у межах лісового масиву, додатні – поза межами. За даними отриманими за результатами глобальної карти лісового покриття 2020 року можна зробити висновок, що зсувні процеси більше зміщені в сторону віддалення від межі лісу вглиб лісового масиву, а саме 73 відсотки значень вибірки потрапляють в інтервал від 0 до -500 м. (рис. 3.6 а). Це може бути зумовлено зміною меж лісового покриття,

тобто дані щодо точок прояву зсувів спостережені у часі раніше ніж карта лісового масиву 2020 року і вказує на залісеність ділянок зсувів, які відбулись раніше [62, 147]. Якщо прокласифікувати дані отримані за результатами картометричного аналізу топокарти з інтервалом 100 м, то можна зробити висновок, що 48% зсувів потрапляє у зону шириною 100 м від межі лісу (рис. 3.6 б).

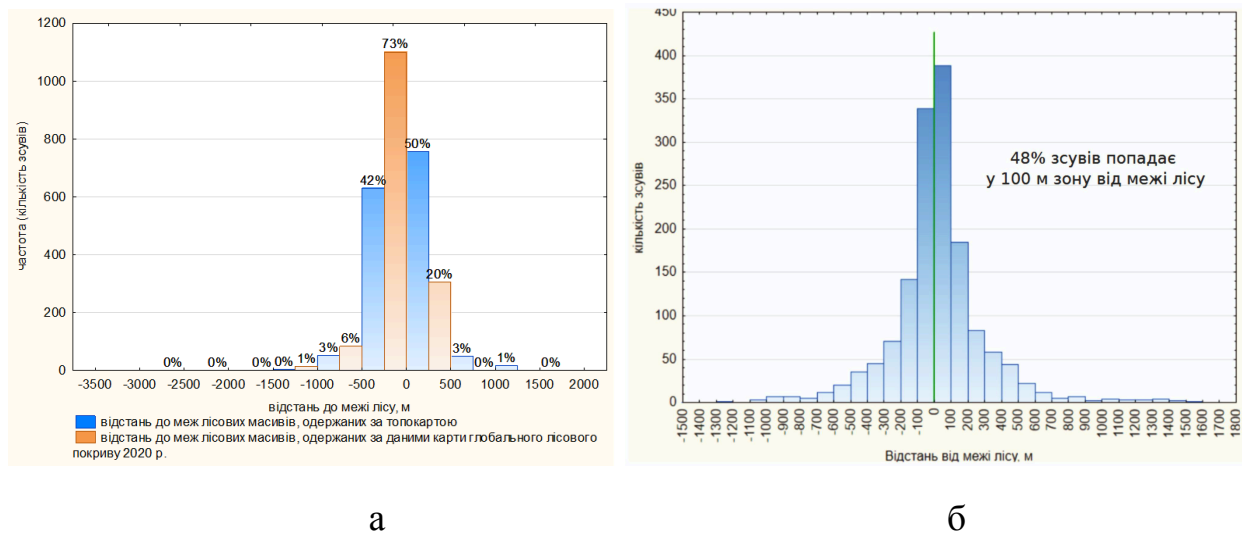


Рисунок 3.6 - Гістограми розподілу зсувів за параметром «відстань до межі лісу» (а- суміщена гістограма розподілу параметра «відстань до межі лісу» одержана за даними щодо лісових масивів з топографічної карти та отриманих з глобальної карти лісового покриття 2020 року, б - деталізована гістограма з інтервалом 100 м за даними топокарти)

Факт прояву зсувних процесів на межі лісу можна пояснити фізичними причинами. По-перше, це збільшена кількість опадів, що сприяє насиченню ґрунту вологою. По-друге, добре дреновані породи в лісі сприяють перетворенню поверхневого стоку в ґрунтовий. Третім чинником є внутрішній стік води вздовж схилу. Також має місце зростання гідродинамічного тиску вздовж шляху фільтрації ґрунтових вод вниз по схилу, що пояснюється зменшенням водопроникності порід далеко від лісу. Не менш важливим є рубка лісу, яка переважно відбувається на межі масиву, що також впливає на цей процес [147].

Іншим параметром, лісового покриву який можна оцінювати за даними дистанційного зондування Землі є коефіцієнт щільності, одержаний за даними лабораторії Global Land Analysis and Discovery (GLAD) при Університеті штату Меріленд у партнерстві з Global Forest Watch (GFW). На основі цих даних сформовано відповідні набори (масиви) геопросторових даних у вигляді растрового покриття для території досліджень. На рис. 3.7 наведено картограму фрагменту території досліджень, яка характеризує зміну коефіцієнта щільності лісового покриву території із накладанням точок прояву зсувних процесів. За допомогою засобів аналізу даних геоінформаційної системи QGIS виконано просторовий аналіз та одержано коефіцієнт щільності лісового покриву у точках прояву зсувів для даних за 2000 та 2023 роки [62, 147].

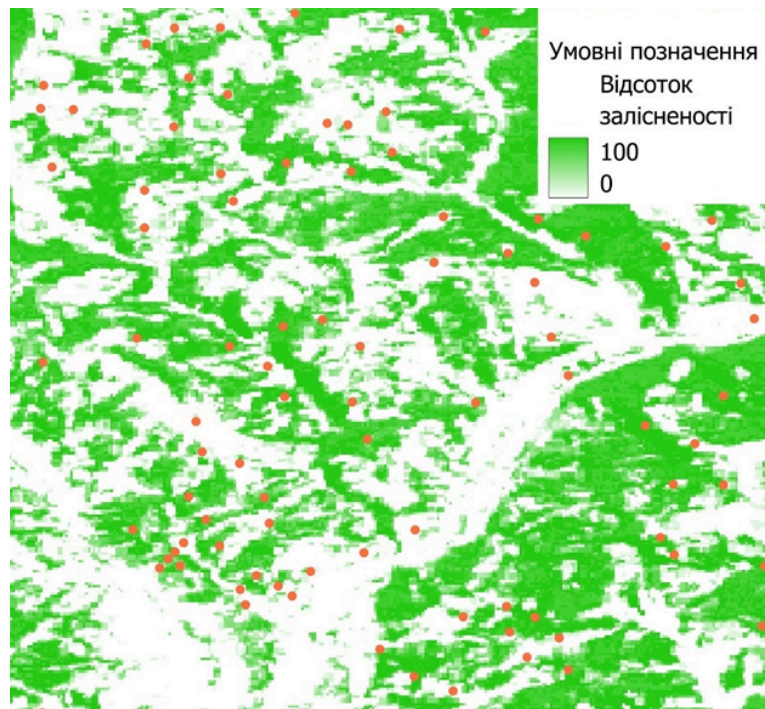


Рисунок 3.7 - Картограма зміни відсотка залісненості лісового покриву фрагменту території досліджень станом на 2000 р. із нанесеними точками зсувних проявів

Далі, для загальної оцінки залісненості відносно до точок прояву зсувних процесів побудовано гістограми розподілу (рис. 3.8). З рисунка випливає що більшість зсувних процесів спостерігається на територіях із щільністю лісового покриву більшою 80%, також значна кількість зсувів спостерігається на ділянках

із щільністю рівною 0. Зміни у розподілі коефіцієнтів щільності лісового покриття між 2000 та 2023 роками можна пояснити фактичним часом активізації зсувних процесів. Для давніх зсувів, що активізувались до 2000 року у період до 2023 року могла збільшитись щільність лісового покриття. Для зсувів, що утворились у межах лісу у період з 2000 до 2023 року щільність лісового покриття могла зменшитись. Ці судження є оціночними. Для достовірної інтерпретації отриманих результатів слід мати дані щодо року активізації конкретного зсуву.

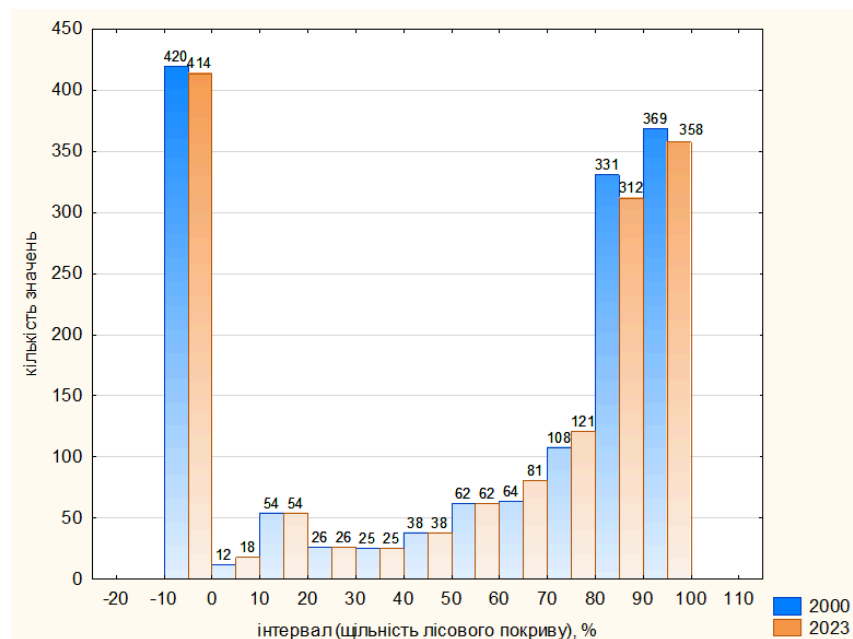


Рисунок 3.8 - Суміщена гістограма розподілу щільності лісового покриття станом на 2000 та 2023 р у точках прояву зсувів

Одержані результати вказують на важливість врахування характеру лісового покриття при створенні прогностичних моделей активізації зсувних процесів на регіональному рівні. Спостерігається зміна площ лісового покриття для лісових масивів Карпат, яка у першу чергу пов'язана із антропогенними факторами. Аналіз зв'язку між зміною площ залісеності та розвитком зсувних проявів є важливим для розуміння взаємодії природних процесів та людської діяльності. Використання геоінформаційних систем (ГІС) та дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє одержувати дані щодо змін у лісовому покритті, проводити просторовий аналіз швидко та ефективно. Супутниковий моніторинг також

застосовується для дослідження розвитку зсувних процесів [91, 92, 93], проте використання інтерпретацій даних супутникового моніторингу для територій покритих лісами є ускладненим. Варто відмітити, що для достовірної оцінки взаємозв'язку впливу лісового покриття на розвиток та активізацію зсувних процесів слід паралельно розглядати геоморфологічні фактори – абсолютна висота зсуву над рівнем моря та параметри крутизни та експозиції схилів. Також варто провести подібні дослідження для еталонних ділянок із відомими даними щодо розвитку зсувів у часі. Дослідження у цьому напрямку мають високу актуальність ще й з точки зору встановлення закономірностей між, власне, вирубкою лісів та розвитком зсувних процесів.

Такий аналіз дозволяє виявити потенційні небезпеки та ризики, пов'язані з руйнуванням природного середовища під впливом людської діяльності. Він може бути використаний для розробки стратегій збереження природних ресурсів та запобігання негативним наслідкам катастрофічної активізації зсувних процесів.

У дисертаційному дослідженні використано комплексний підхід, що поєднує декілька глобальних продуктів ДЗЗ для формування шести кількісних показників лісового блоку моделі зсувної сприйнятливості: ESA WorldCover 2021 (маска лісу як основа для обчислення близькості до межі лісу) (рис. 3.9 а); Hansen Global Forest Change (щільність деревного покриття на 2000 р. та динаміка втрат 2001–2023 pp.); Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100 за 2019 р. (тип лісу) (рис. 3.9 б); Sentinel-2 Surface Reflectance (амплітуда NDVI за 2022 р.). Такий комплексний підхід забезпечує одночасне охоплення статичних структурних характеристик лісу (щільність, тип, маска), динамічних показників (втрати, амплітуда NDVI) та просторово-контекстних характеристик (близькість до межі лісу, частка лісу вище по схилу).

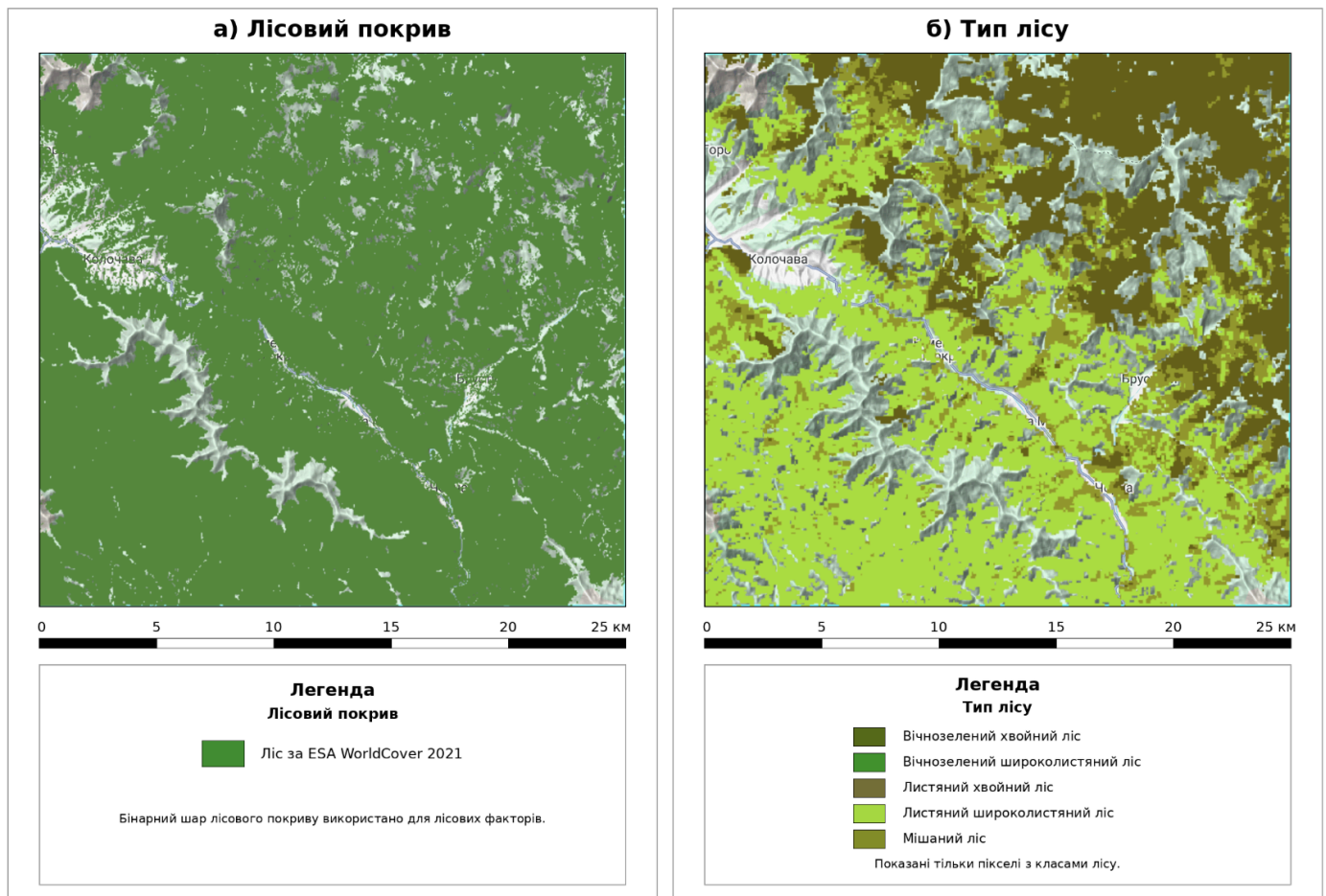


Рисунок 3.9 - Шари лісового покриву та типу лісу, використані для формування лісових факторів моделі зсувної сприйнятливості: а) маска лісу за *ESA WorldCover 2021*; б) тип лісу за *Copernicus CGLS-LC100 2019*

3.4 Результати оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриву та розвитку зсувних процесів

Для вирішення завдання щодо оцінки взаємозв'язку між поширенням лісового покриву та розвитком зсувних процесів у межах Українських Карпат застосовано комплекс методів: картометричний аналіз просторової приуроченості зсувних проявів до меж лісових масивів; статистичний аналіз розподілу зсувів за параметрами лісового покриву з побудовою гістограм у Statistica; буферний аналіз стану лісу у зоні близької локалізації зсувів. Роботи виконувалися на двох просторових масштабах - для розширеного полігону 75×75 км (1509 зсувних

проявів) (підрозділ 3.3) та базової ділянки 25×25 км у верхів'ях р. Тереля (236 зсувних проявів). Основні результати дослідження опубліковано у роботах [62, 63].

Узагальнимо результати, наведені у підрозділі 3.3. Для території 75×75 км (рис. 2.2, 3.3), де зареєстровано 1509 зсувних проявів отримано такі результати картометричного аналізу. За маскою лісу, побудованою на основі топографічних карт, середнє значення відстані від зсуву до межі лісу становить -187 м (тобто зсуви у середньому розташовані всередині лісового масиву на 187 м від межі), медіана становить -120 м, інтерквартильний розмах охоплює діапазон від -380 до -40 м.

Важливим результатом є те, що більшість зсувних процесів приурочена до межі лісу, що підтверджується гістограмою розподілу (рис. 3.6) та базовими статистиками (середнє значення - 187 м, медіана - 120 м). Ця картина особливо інформативна з точки зору геоecологічного підходу - вона показує, що зсуви не відбуваються рівномірно всередині лісу, а істотно концентруються саме у перехідній зоні між зімкнутим деревостаном і відкритою територією. Аналогічне за структурою розподілу отримано при використанні маски лісу ESA WorldCover 2021: переважна більшість зсувних проявів потрапляє у прикордову зону лісу з невеликими відмінностями, пов'язаними зі зміщенням меж лісу внаслідок актуальнішої дати зйомки.

Цей результат має принципове методичне значення. По-перше, він підтверджує гіпотезу, яка висувалася у численних міжнародних дослідженнях [59, 60, 61], про особливу роль прикордових зон лісу у формуванні зсувної небезпеки. По-друге, він створює кількісну основу для включення параметра «відстань до межі лісу» у модель зсувної сприйнятливості як самостійного предиктора. По-третє, він демонструє обмеженість традиційної бінарної параметризації лісу «ліс / не ліс»: якщо б лісовий покрив розглядався лише як бінарна ознака, то абсолютна більшість зсувних проявів була б класифікована як «лісові», що не відображає їх реальну приуроченість до перехідної зони.

Буферний аналіз стану лісового покриву у 100 -метровому радіусі навколо зсувних проявів виконано для двох експериментальних полігонів розміром 25×25

км, які розташовані в Українських Карпатах (рис. 3.10) за даними Hansen Global Forest Change [54].

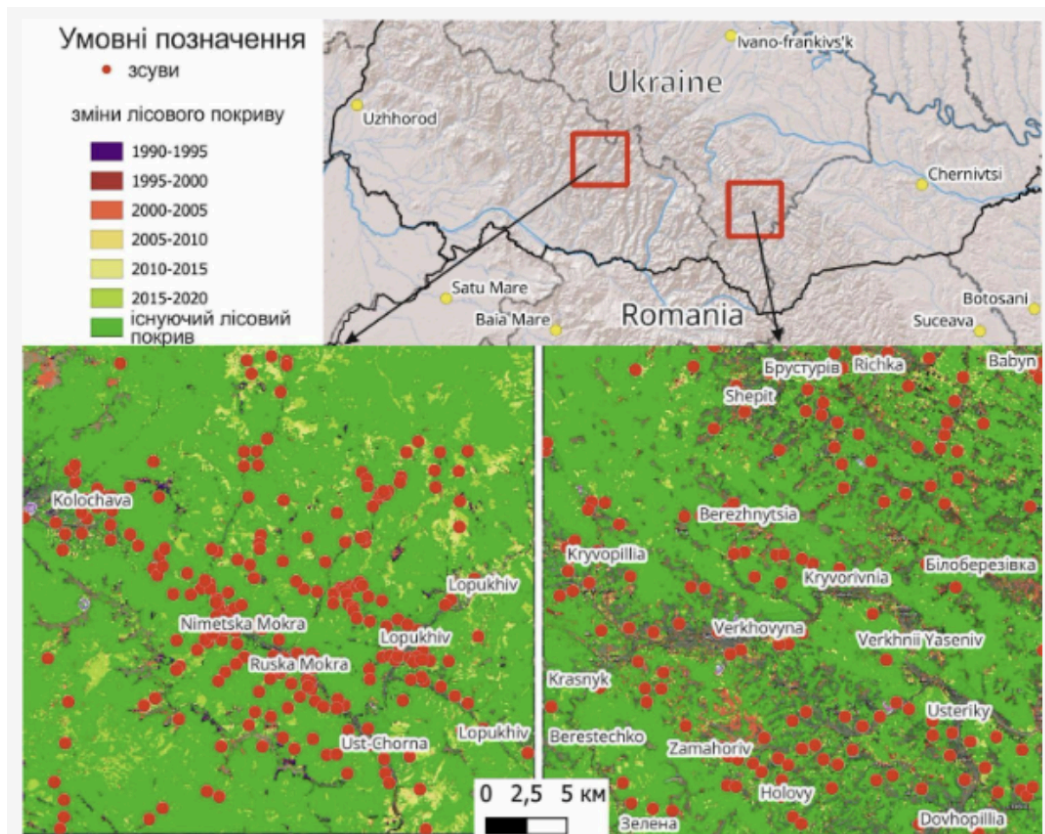


Рисунок 3.10 - Результати буферного аналізу (радіус 100 м) стану лісового покритву у місцях зсувних проявів для двох експериментальних полігонів [63]

Перша ділянка розташована у східній частині Закарпатської області, включає у свої межі такі населені пункти, як Колочава, Руська Мокра, Лопухів, Усть-Чорна. У її межах згідно з каталогом зсувів ДНВП «Геоінформ України» зареєстровано 236 зсувів, що становить $0,38$ зсувів/км². Інша ділянка розташована на півдні Івано-Франківської області в основному у межах Верховинського району та включає такі основні населені пункти, як Верховина, Кривопілля, Брустурів, Верхній Ясенів, Довгопілля тощо. У її межах зареєстровано 157 зсувів. Остання масова зареєстрована активізація зсувів тут спостерігалась у 2008 році. Для зазначеної території досліджень виконано розрахунок змін площ лісового покритву на основі супутникових даних Landsat 5–9 за період 1990–2020 рр. з використанням платформи Google Earth Engine (GEE).

Для вказаних ділянок на платформі GEE проаналізовано супутникові знімки Landsat 5, 7, 8 і 9 за період 1990–2020 рр. Обробка даних Landsat включала маскування хмар і тіней за спеціалізованим каналом (смугою) оцінки якості пікселів та перерахунок цифрових значень пікселів у коефіцієнти відбиття поверхні; для кожного року формувався безхмарний композит із літніх знімків (червень–серпень).

Лісовий покрив виділявся за пороговим значенням нормалізованого різницевого вегетаційного індексу $NDVI = (NIR - Red)/(NIR + Red)$, де NIR - ближній інфрачервоний, а Red - червоний канали. Пікселі зі значенням NDVI понад 0,65 інтерпретувались як лісовкриті; за ними обчислювалась площа лісу в гектарах для кожного року.

У результаті отримано карти зміни лісового покриття за період 1990–2020 рр та графіки зміни площі лісового покриття для двох ділянок досліджень (рис. 3.11).

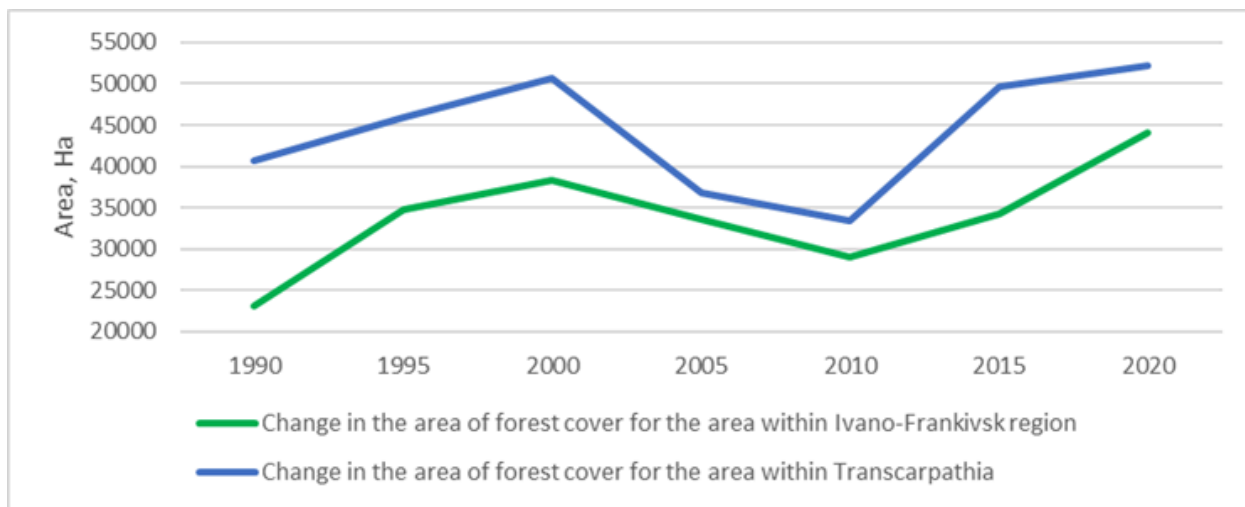


Рисунок 3.11 - Зміни площ лісового покриття для двох експериментальних полігонів за даними Landsat за період 1990–2020 років [63]

На рис. 3.10 на карти зміни площ лісового покриття накладено точки розвитку зсувів, які зареєстровані у каталозі зсувів ДНВП «Геоінформ України». Для кожної точки зсуву за допомогою геоінформаційного аналізу визначено стан рослинного покриття. Для ділянки, яка розташована у Закарпатті встановлено, що 15 з 236 точок не мають лісового покриття, 5 втратили лісовий покрив з 1990 по 2000 рік, 5

– з 2000 по 2010, 12 – з 2010 по 2020. Для ділянки, яка розташована у Івано-Франківській області встановлено, що 36 з 157 точок не мають лісового покриву, 1 втратив лісовий покрив з 1990 по 2000 рік, 13 – з 2000 по 2010, 3 – з 2010 по 2020. З метою більш повної оцінки залісеності зсувних ділянок, для кожного точкового об'єкту створено буферну зону радіусом 100 м та виконано просторовий геоінформаційний аналіз, щодо наявності змін лісового покриву для зон навколо центроїдів зсувних ділянок. Для Закарпатського полігону (верхів'я р. Тересля, 236 зсувних проявів) результати буферного аналізу такі: 15 зсувних проявів розташовані у повністю знеліснених ділянках (щільність лісу у буфері = 0 %); 5 зсувних проявів приурочені до ділянок з втратами лісу у період 1990–2000 років; 5 - у період 2000–2010 років; 12 - у період 2010–2020 років. Сумарно в зоні порушення лісу у 100-метровому радіусі знаходяться 37 зсувних проявів (15,7 % від загальної вибірки) (рис. 3.10).

Для Івано-Франківського полігону (Верховинський район, 157 зсувних проявів) результати такі: 36 зсувних проявів розташовані у повністю знеліснених ділянках; 1 - з втратами 1990–2000 рр.; 13 - 2000–2010 рр.; 3 - 2010–2020 рр. Сумарно в зоні порушення лісу - 53 зсувних прояви (33,8 %). Частка зсувів у зонах з повною відсутністю лісу (23 %) є суттєво вищою, ніж для Закарпаття (6 %), що відповідає загалом меншій лісистості Верховинського району.

Особливо важливим результатом є те, що з 157 зсувних проявів Івано-Франківського полігону 132 зсуви (84 %) знаходяться у радіусі 100 м від ділянок з порушеннями лісового покриву (знеліснені зони або зони втрат лісу). З них 112 зсувних проявів (71 %) розташовані саме поблизу межі лісу (у перехідній смузі шириною 100 м). Для Закарпатського полігону аналогічний показник - 145 з 236 зсувів (61 %) у радіусі 100 м від порушень лісу. Ці результати ще раз підтверджують висновок про ключову роль прикрайових зон і трансформованих ділянок лісу у формуванні зсувної небезпеки.

На основі виконаного комплексного аналізу результатів можна сформулювати такі узагальнюючі висновки про взаємозв'язок поширення лісового покриву та розвитку зсувних процесів у межах Українських Карпат:

По-перше, на регіональному просторовому масштабі - для ширшої території 75×75 км (1509 задокументованих зсувних проявів) - картометричний аналіз відстані зсувів до межі лісу показав, що 73 % проявів приурочені до смуги 0–500 м від межі лісу, переважно з її внутрішнього (залісненого) боку. Цей результат характеризує положення зсувів відносно межі лісового покриву (відстань до межі) і вказує на провідну роль прикрайових (перехідних) зон у регіональному розподілі зсувної активності.

По-друге, на локальному просторовому масштабі - за результатами буферного аналізу стану лісового покриву в радіусі 100 м навколо кожного зсувного прояву на двох детальних полігонах (рис. 3.10) - встановлено високу частку зсувів, приурочених до ділянок з порушеннями лісового покриву: 61 % для Закарпатського полігону і 84 % для Івано-Франківського. На відміну від попереднього, цей аналіз стосується іншого просторового питання: він характеризує не відстань до межі лісу, а безпосередній стан лісу в найближчому оточенні зсуву (знеліснення, втрати лісу, щільність деревостану), і підтверджує гіпотезу про опосередкований вплив антропогенної трансформації лісу на активізацію зсувних процесів. Два наведені результати отримані на різних просторових масштабах (регіональному та локальному) і не дублюють, а доповнюють один одного, забезпечуючи багатомасштабне підтвердження ролі лісу у зсувних процесах.

По-третє, різниця у показниках між двома експериментальними полігонами (Закарпатським і Івано-Франківським) відображає регіональні особливості і підтверджує необхідність адаптивного підходу до моделювання зсувної сприйнятливості з урахуванням конкретних умов території. Водночас узагальнені закономірності (концентрація зсувів у прикрайових зонах, приуроченість до порушених ділянок) залишаються стійкими для обох територій.

По-четверте, отримані результати є емпіричною основою для подальшого розвитку моделі зсувної сприйнятливості з комплексним врахуванням лісового блоку та для розробки практичних рекомендацій щодо лісогосподарських заходів у зсувонебезпечних зонах.

3.5 Просторово-часові зміни лісових масивів у Карпатському регіоні

Для коректного врахування лісового фактора у регіональних моделях зсувної сприйнятливості принципово важливим є розуміння не тільки поточного стану лісового покриву, а і його багаторічної динаміки. У межах даного дисертаційного дослідження виконано детальний аналіз просторово-часової динаміки лісового покриву у зсувонебезпечних районах Українських Карпат на основі довгих часових рядів супутникових даних Landsat за період 1990–2020 рр.

Методично аналіз виконано на базі колекцій Landsat Collection 2 Tier 1 Level 2, зокрема наборів LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 (Landsat 5 TM, 1984–2013), LANDSAT/LE07/C02/T1_L2 (Landsat 7 ETM+, 1999–2022), LANDSAT/LC08/C02/T1_L2 (Landsat 8 OLI, 2013–донині), LANDSAT/LC09/C02/T1_L2 (Landsat 9 OLI-2, 2021–донині). Для кожного року формувалися безхмарні композиції (із маскуванням хмар і тіней за спеціалізованим каналом (смугою) оцінки якості пікселів) з літнього періоду (червень–серпень), оскільки саме у ці місяці найбільш стабільно розрізняються характеристики лісових і нелісових земель у Карпатському регіоні.

Для виділення лісового покриву використано пороговий підхід за NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), що обчислюється за формулою: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, де NIR - близькоінфрачервоний канал, Red - червоний канал. Значення $NDVI > 0,65$ інтерпретовано як ліс, нижчі значення - як нелісові ділянки (відкриті території, молоді поновлення, водні об'єкти). Крім того, для верифікації результатів на критичні роки (2000, 2010, 2020) залучено референтні дані Hansen Global Forest Change та ESA WorldCover [54, 120].

Таким чином, оцінювання лісового покриву поєднує два типи джерел даних: готові тематичні продукти (Hansen Global Forest Change, ESA WorldCover, Copernicus Global Land Cover, GLAD/GFW), які дають щільність деревостану (рис. 3.7-3.8) і формують операційні факторні шари моделі (Розділ 4), та власний аналіз річних безхмарних композитів Landsat із пороговою сегментацією за NDVI (поріг 0,65 відповідає густому деревостанному покриву), який дає багаторічну зміну площі лісу (рис. 3.11).

Аналіз площі лісового покриву для двох експериментальних полігонів (Закарпатського 25×25 км і Івано-Франківського 25×25 км) за період 1990–2020 років дав такі результати:

Закарпатський полігон (верхів'я р. Теребля): лісистість 1990 р. - близько 71 %; 2000 - близько 69 %; 2005 - близько 63 %; 2010 - близько 62 %; 2015 - близько 67 %; 2020 - близько 70 %. Фіксується виражене зниження лісистості у період 2000–2010 років з подальшим частковим відновленням після 2010 року.

Івано-Франківський полігон (Верховинський район, басейн Чорного Черемошу): лісистість 1990 р. - близько 58 %; 2000 - близько 56 %; 2005 - близько 52 %; 2010 - близько 50 %; 2015 - близько 53 %; 2020 - близько 56 %. Аналогічна динаміка, але з менш вираженим піком деградації та повільнішим відновленням.

Отримані результати узгоджуються з висновками міжнародних досліджень для інших гірських регіонів Європи. Зокрема, у праці П. Потапова зі співавторами [138] на матеріалах Східної Європи за період 1985–2012 років зафіксовано значні обсяги деградації лісів у Карпатському регіоні після 2000 року. Подібні тенденції описані в національних звітах Державного агентства лісових ресурсів України [137], у монографіях Ю. С. Шпарика і В. І. Парпана [66].

Процеси трансформації лісового покриву у межах досліджуваних полігонів мають комплексні причини. Період найінтенсивнішої деградації (2000–2010 рр.) співпадає із соціально-економічною кризою, посиленням експорту лісопродукції, послабленням регуляторного контролю над лісозаготівлями. Після 2010 року спостерігається тенденція до стабілізації та часткового відновлення лісових масивів, пов'язана з кількома чинниками: посиленням природоохоронного законодавства (мораторій на суцільні рубки у низці регіонів, розширення природоохоронних територій); природним поновленням деревостанів на зрубках і перелогах; цілеспрямованими лісовідновлювальними роботами; загальною стабілізацією соціально-економічної ситуації.

Для цілей моделювання зсувної сприйнятливості особливо важливою є просторова структура трансформацій лісу. Втрати лісу у період 2001–2023 років, зафіксовані у продукті Hansen Global Forest Change [54], не розподілені рівномірно

по території, а формують виражені просторові патерни, що концентруються у легкодоступних зонах - поблизу лісових доріг, у долинах водотоків, на схилах середньої крутизни, які є економічно привабливими для лісозаготівлі. Водночас, частина втрат лісу пов'язана з природними процесами - вітровалами, сніголомами, короїдними епіфітотіями смереки, що також мають свою специфічну просторову організацію.

У дисертаційному дослідженні для кількісного врахування динаміки лісу у моделі зсувної сприйнятливості використано показник інтенсивності втрат лісового покриву за період після 2001 року (що відображає локальну концентрацію вирубок та деградації деревостану) у межах ковзного вікна радіусом 250 м - який безпосередньо увійшов до лісового блоку моделі як один з шести факторних предикторів. Такий підхід дозволяє врахувати не тільки сам факт наявності втрат лісу, а й їх локальну просторову інтенсивність, що є більш інформативним параметром.

Таким чином, просторово-часова динаміка лісового покриву у Карпатському регіоні характеризується вираженням періодом деградації 2000–2010 років з подальшим частковим відновленням, що накладає кумулятивний «антропогенний борг» на сучасну зсувну небезпеку регіону. Інтеграція показника динаміки лісу у регіональну модель зсувної сприйнятливості є необхідним елементом коректного врахування лісового фактора у геоecологічних оцінках Українських Карпат.

Висновки до розділу 3

За результатами теоретичного і емпіричного аналізу ролі лісового покриву як чинника розвитку зсувних та ерозійних процесів в Українських Карпатах сформульовано такі висновки.

1. Вплив лісового покриву на стійкість схилів у гірських регіонах реалізується через три взаємодоповнюючі механізми - механічний (кореневе армування ґрунту), гідрологічний (регулювання інфільтрації, транспірація, зниження поверхневого стоку), морфодинамічний (захист ґрунтового покриву від поверхневої ерозії). Домінантний механізм залежить від характеру зсуву, глибини

потенційної поверхні ковзання, породного складу деревостану, стадії розвитку насадження.

2. Для Українських Карпат, де переважають буково-ялицево-смерекові формації на флішових схилах, ефективність лісу у стабілізації схилів суттєво залежить від породного складу та вікової структури деревостану. Найбільш ефективний захист від мілких зсувів-спливів забезпечують мозаїчні мішані деревостани з розвиненою кореневою системою, тоді як одновікові смерекові монокультури, значна частина яких штучно посаджена поза межами природного ареалу смереки, мають обмежену стабілізуючу функцію і є особливо вразливими до зсувних та вітровальних процесів.

3. Антропогенна трансформація лісу - суцільні рубки, фрагментація, формування мережі лісових доріг - є одним із провідних чинників підвищення зсувної небезпеки у Карпатському регіоні. Особливо вразливими є ділянки у межах «вікна підвищеної нестійкості» (5–15 років після суцільної рубки), а також прикрайові зони лісу - перехідна смуга між зімкнутим лісовим масивом і відкритою територією, де одночасно змінюються гідрологічний режим, коренева структура та інтенсивність антропогенних втручань.

4. Традиційні джерела даних про лісові ресурси в Україні (матеріали лісовпорядкування, державний лісовий кадастр, топографічні карти, галузева звітність) мають значні обмеження для задач регіонального моделювання зсувної сприйнятливості через циклічність оновлення, проблему нелегальних рубок, обмежену просторову деталізацію, складність доступу. Використання сучасних даних дистанційного зондування Землі забезпечує подолання цих обмежень і створює інформаційну основу для комплексної кількісної параметризації лісового блоку.

5. За результатами картометричного аналізу для ділянки досліджень (75×75 км, 1509 зсувних проявів) встановлено, що більшість зсувних процесів приурочена до межі лісу, з переважанням розташування всередині лісового масиву. Цей результат, отриманий для території Українських Карпат, підтверджує гіпотезу про ключову роль прикрайових зон лісу у формуванні зсувної небезпеки.

6. Буферний аналіз стану лісового покриву у 100-метровому радіусі навколо зсувних проявів показав, що: для ділянки досліджень у Закарпатті (236 зсувів) 145 зсувів (61 %) знаходяться поблизу ділянок з порушеннями лісу; для ділянки досліджень у Івано-Франківській області (157 зсувів) аналогічний показник становить 132 зсуви (84 %). Ці результати емпірично доводять, що стан лісового покриву у межах 100-метрової зони навколо зсуву є інформативною характеристикою зсувної небезпеки.

7. Аналіз просторово-часової динаміки лісового покриву за супутниковими даними Landsat 1990–2020 років виявив виражений період деградації лісів у 2000–2010 рр. з наступним частковим відновленням у 2010–2020 рр. Цей період співпадає з соціально-економічною кризою 1990-х–2000-х років, посиленням експорту лісопродукції, послабленням регуляторного контролю над лісозаготівлями. Часткова стабілізація після 2010 року пов'язана з посиленням природоохоронного законодавства та природним поновленням деревостанів.

8. Отримані емпіричні результати створюють наукову основу для розробки моделі зсувної сприйнятливості з комплексною кількісною параметризацією лісового блоку через шість взаємодоповнюючих показників - близькість до межі лісу, щільність лісового покриву, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу 2001–2023 рр., частка лісу вище по схилу.

РОЗДІЛ 4

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СХИЛЬНОСТІ ТЕРИТОРІЇ ДО РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ЛІСОВОГО ФАКТОРА

4.1 Індексна модель зсувної сприйнятливості (LSA)

Індексна модель зсувної сприйнятливості (LSA) є методологічною основою більшості сучасних регіональних досліджень просторового розподілу зсувної сприйнятливості для зсувонебезпечних територій. LSA розглядається як інтегральний кількісний показник, що характеризує відносну ймовірність активізації зсувних процесів у конкретній точці території на основі комплексу природних і антропогенних чинників.

У сучасній літературі під зсувною сприйнятливістю прийнято розуміти просторову компоненту зсувної небезпеки - відносну ймовірність виникнення зсуву у даній точці території на основі її фізико-географічних, геологічних, лісових та інших характеристик, без явного врахування часової компоненти тригерних подій. У порівнянні з двома іншими ключовими поняттями - небезпекою та ризиком - сприйнятливість є найбільш «чистим» просторовим показником, що не вимагає кліматичних прогнозів або даних про експозицію [31, 40].

Математична формалізація індексної моделі LSA у найбільш загальному вигляді подається у формі зваженої суми нормалізованих факторних шарів [38, 41]:

$$LSA_{proxy} = \sum_{i=1}^N w_i \times F_i \quad (4.1)$$

де LSA_{proxy} - інтегральний показник зсувної сприйнятливості у форматі опосередкованого показника у діапазоні $[0; 1]$; w_i - нормалізована вага i -го фактора ($\sum w_i = 1$); F_i - нормалізоване значення i -го фактора у діапазоні $[0; 1]$ після

калібрування методом біваріантного частотного аналізу; $i = 1, 2, \dots, N$ - порядковий номер фактора (N - загальна кількість факторів моделі).

У подальшому опосередкований показник сприйнятливості трансформується у фінальний показник LSA шляхом додаткового калібрування через логістичну функцію з параметрами, визначеними за статистичним розподілом значень LSA_proху у точках навчальної вибірки зсувних проявів. Це забезпечує коректне перетворення лінійної зваженої суми у нелінійний показник з чіткою інтерпретацією у термінах «ймовірності активізації». Сам термін «проксі» (від англ. проху - опосередкований, замінний показник) підкреслює, що така зважена сума є лише попередньою відносною оцінкою зсувної сприйнятливості, а не остаточно каліброваною величиною.

Модель LSA, яка запропонована у даному дослідженні ґрунтується на системі факторних характеристик, об'єднаних у п'ять тематичних блоків - морфометричний, у якому ми плануємо до розгляду 4 фактори - крутизну схилу, експозицію схилу, абсолютну висоту, профільну кривизну (характеризує кривину поверхні вздовж лінії найбільшого схилу за методом Zevenbergen & Thorne, 1987), гідрологічний (близькість до водотоків), лісовий, де розглянемо 6 факторів - щільність деревного покриву, близькість до межі лісу, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу 2001–2023 рр., частка лісу вище по схилу, геологічний блок (літологія, близькість до тектонічних розломів) та кліматичний блок (середньорічна сума опадів).

Модель реалізовано на хмарній геоінформаційній платформі Google Earth Engine (GEE), що забезпечує повну відтворюваність результатів та масштабованість підходу на інші зсувонебезпечні території Карпат. При моделюванні буде використано просторово-блоковий поділ вибірки задокументованих зсувних проявів на навчальну (57 %) та тестову (43 %) частини. Такий підхід забезпечить коректну валідацію просторових моделей [119]. Визначення вагових коефіцієнтів факторів буде проведено на основі методу Random Forest Feature Importance (алгоритм контрольованого машинного навчання методом випадкового лісу)[141].

Для перевірки внутрішньої структури набору предикторів застосовано комплекс багатовимірних статистичних методів - кластерний аналіз K-means ($k = 4$), кореляційний аналіз, експлораторний факторний аналіз (EFA) з varimax-обертанням, метод головних компонент (PCA). Результати цих методів використовуються для перевірки змістової узгодженості набору предикторів, виявлення латентних факторних блоків та аналізу взаємозв'язків між змінними.

Повний алгоритм обчислення моделі LSA складається з таких основних кроків:

1. Підготовка вхідних даних - кадастру зсувних проявів, цифрової моделі рельєфу, гідрографічної мережа, шарів лісового покриву, геологічних даних.

2. Просторово-блоковий поділ вибірки зсувів на навчальну вибірку та тестову, з генерацією точок псевдо-відсутності зсувів для забезпечення альтернативної протилежної за змістом вибірки при тренуванні алгоритму Random Forest.

3. Формування факторних шарів та їх нормалізація для території досліджень із забезпеченням просторової розрізненості 25 м.

4. Калібрування кожного фактора методом біваріантного частотного аналізу на основі точок навчальної-вибірки: перетворення неперервних факторів (які змінні по всій території досліджень) на 10 класів, обчислення емпіричної ймовірності зсувів у кожному класі, нормалізація результату у діапазон $[0; 1]$ з додатковим згладжуванням; для категоріальних факторів (експозиція, тип лісу, літологія), які покривають територію досліджень зонами - обчислення методом біваріантного частотного аналізу відбувається по дискретних класах.

5. Обчислення вагових коефіцієнтів факторів методом Random Forest Feature Importance: тренування випадкового лісу на 300 деревах з використанням шарів які відображають присутність/відсутність зсувів як цільової змінної, обчислення середнього зменшення індексу Джіні для кожного фактора із забезпеченням нормалізації у загальну суму $= 1$.

6. Обчислення інтегрального опосередкованого показника сприйнятливості LSA_proxu за формулою зваженої суми FR-каліброваних факторних шарів.

7. Логістичне калібрування LSA_proxu у фінальний показник LSA з автоматичним визначенням параметрів p_0 (пороговий рівень, обмежений діапазоном 0,30–0,70) та k (коефіцієнт нахилу сигмоїди, обмежений діапазоном 4–14) на основі перцентилей розподілу LSA_proxu у навчальних-точках зсувів.

8. Класифікація LSA на п'ять класів зсувної сприйнятливості (дуже низька, низька, середня, висока, дуже висока) за квантильним методом.

9. Валідація моделі на незалежній тестовій-вибірці зсувних проявів з обчисленням частки тестових зсувів у кожному класі LSA та коефіцієнтів просторового збагачення.

10. Побудова карти зсувної сприйнятливості як основного результативного продукту моделі.

Такий повний алгоритм забезпечує систематичне поєднання об'єктивних статистичних методів з сучасними обчислювальними технологіями, що відповідає найкращим міжнародним практикам регіонального моделювання зсувної небезпеки. Детальна реалізація алгоритму виконується у середовищі Google Earth Engine з використанням авторського програмного коду, що забезпечує повну відтворюваність результатів.

Узагальнену архітектуру методології геоекологічної оцінки зсувної сприйнятливості, розробленої у рамках дослідження, наведено на рис. 4.1. Схема відображає повний цикл обчислень - від підготовки вхідних даних до формування картограми ризику та практичних рекомендацій щодо використання отриманих результатів. Методика поділена на вісім послідовних етапів, кожен з яких деталізовано у наступних підрозділах цього та п'ятого розділів.

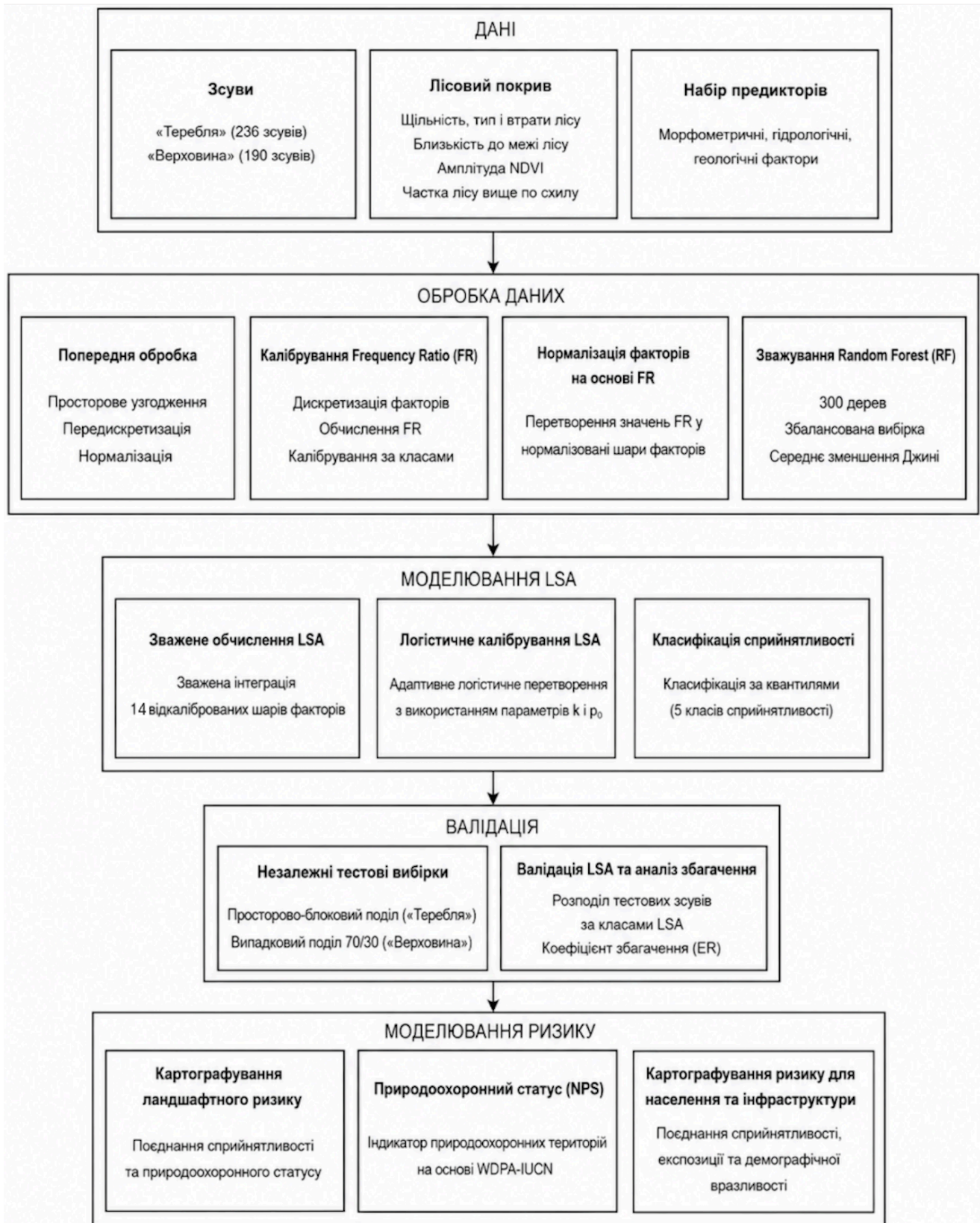


Рисунок 4.1 - Узагальнена методична схема геоекологічної оцінки зсувної сприйнятливості: підготовка даних, обробка (FR-калібрування та RF-зважування), моделювання LSA, валідація та моделювання ризику

Як показано на схемі, обчислювальний цикл згруповано у п'ять функціональних блоків: (1) формування вхідних даних - кадастр зсувів модельного полігону (ділянка «Теребля», 236 зсувів), показники лісового покриву та повний набір предикторів; (2) обробку даних - попередню підготовку, калібрування факторів методом Frequency Ratio, нормалізацію та зважування методом Random Forest; (3) моделювання LSA - зважене інтегрування відкаліброваних шарів, адаптивне логістичне калібрування з параметрами k і p_0 та класифікацію сприйнятливості за квантилями; (4) валідацію - незалежні тестові вибірки й аналіз збагачення (ER); (5) моделювання ризику - поєднання сприйнятливості з природоохоронним статусом (NPS на основі WDPA-IUCN) та демографічною вразливістю.

Зазначена методологія реалізована для модельного полігону розмірами 25×25 км у східній частині Закарпатської області, у верхів'ї басейну р. Теребля, між хребтами Красна та Пішконя (рис. 4.2).

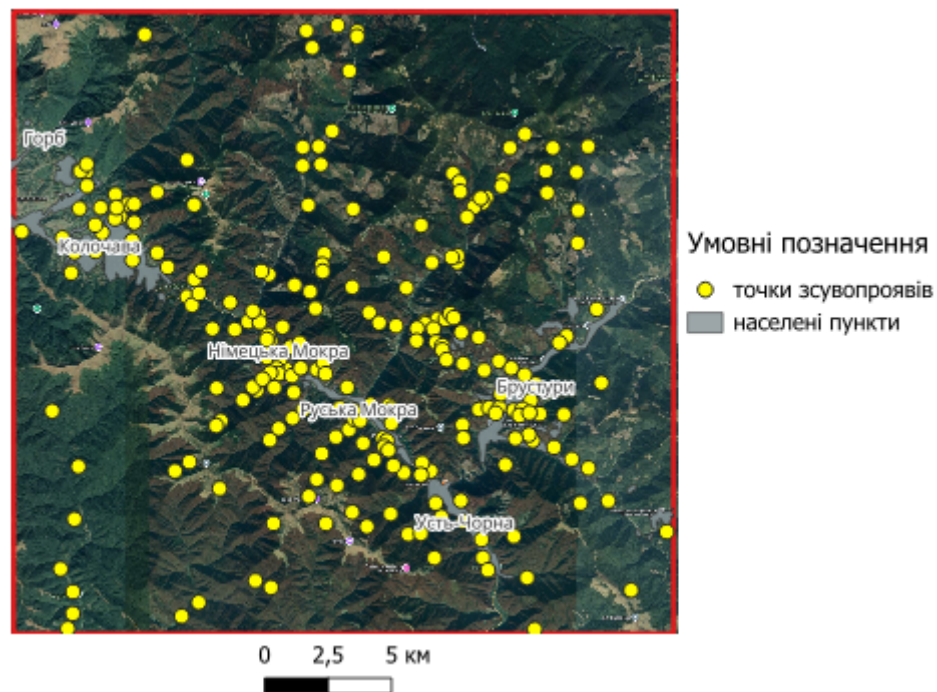


Рисунок 4.2 - Картограма району дослідження та локалізація зсувних ділянок у межах басейну р. Теребля.

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.

Перший етап передбачав підготовку вхідних даних з п'яти основних джерел. Кадастр зсувних проявів базового полігону (236 точок у верхів'ях р. Теремля), що створений на основі даних ДНВП «Геоінформ України». Використано цифрову модель рельєфу ALOS AW3D30 Японського аерокосмічного агентства JAXA, що забезпечує обчислення морфометричних показників з просторовою розрізненністю 30 м. Гідрографічний блок обчислено на основі глобального гідрографічного набору MERIT Hydro. Комплекс продуктів дистанційного зондування Землі (Hansen Global Forest Change, ESA WorldCover 2021, Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100 та Sentinel-2 Surface Reflectance) дозволив сформувати шість показників лісового блоку. Векторні шари літологічних формацій і тектонічних розломів складають основу для геологічного блоку.

Другим етапом реалізації методології стало формування набору нормалізованих факторних шарів за п'ятьма тематичними блоками: морфометричний (чотири фактори - крутизна, експозиція, висота, профільна кривизна), гідрологічний (один - близькість до водотоків), лісовий (шість - щільність лісу, близькість до межі лісу, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу 2001–2023 рр., частка лісу вище по схилу) геологічний (два - літологія, близькість до розломів) і кліматичний (один - середньорічна сума опадів). Виокремлення лісового блоку як самостійного структурного компонента з шістьма предикторами є особливістю нашого дослідження. Усі розрахунки виконано на хмарній платформі GEE з просторовою розрізненністю растрових шарів 25м.

На третьому етапі виконується просторово-блоковий поділ вибірки 236 зсувних проявів на навчальну (135 точок, 57 %) та тестову (101 точка, 43 %) частини з використанням квадратних блоків розміром 3×3 км для виокремлення

тестової вибірки. Такий підхід, на відміну від випадкового розподілу окремих точок, запобігає просторовому витоку інформації між вибірками і забезпечує коректну валідацію моделі. Додатково генерується вибірка з 236 точок, де відсутні зсуви, псевдо-відсутності зсувів за межами 150-метрового буфера навколо задокументованих проявів, що необхідно для коректного тренування алгоритму Random Forest. Розмір просторового блоку 3×3 км обрано виходячи з регіонального масштабу моделювання та усталеної практики аналогічних досліджень зсувної сприйнятливості: за просторово-блокової крос-валідації блоки кілометрового порядку забезпечують компроміс між збереженням достатньої кількості незалежних блоків у межах полігону 25×25 км і усуненням просторової автокореляції між суміжними точками навчальної та тестової вибірок, що запобігає просторовому витоку інформації та дає реалістичну оцінку узагальнюваності моделі.

Загальна схема формування факторних шарів моделі LSA з чотирьох тематичних блоків наведена на рис. 4.3. Кожен з факторних шарів калібрується методом частотного співвідношення на основі навчальних-точок зсувів з розбиттям на 10 класів для неперервних факторів.



Рисунок 4.3 - Загальна схема формування факторних шарів моделі LSA з чотирьох тематичних блоків: джерела даних, алгоритми обчислення, просторова розрізненість

Далі виконується багатовимірний статистичний аналіз зібраних предикторів (аналіз мультиколінеарності, кластерний аналіз K-means з $k = 4$, кореляційний аналіз, експлораторний факторний аналіз EFA з varimax-обертанням, метод головних компонент PCA, тощо) для перевірки змістової узгодженості архітектури моделі.

Вагові коефіцієнти факторів визначаються об'єктивним методом Random Forest Feature Importance через середнє зменшення індексу Джіні по ансамблю з 300 дерев. Інтегральний опосередкований показник обчислюється як зважена сума FR-каліброваних шарів, після чого застосовується логістичне калібрування з автоматично визначеними параметрами p_0 і k для отримання фінального індексу LSA у діапазоні $[0; 1]$. Завершальним кроком виконується класифікація LSA на п'ять класів за квантильним методом (перцентилі 20, 40, 60, 80).

П'ятий етап - отримання фінальної картограми зсувної сприйнятливості та її валідація на незалежній тестовій вибірці.

На шостому етапі формуються додаткові компоненти моделі ризику. Відбувається інтегрування усіх компонентів у два паралельні показники ризику: індекс природоохоронного пріоритету, що характеризує потенційні втрати природних екосистем та ризик для населення, що характеризує втрати людей та інфраструктури.

4.2 Обґрунтування факторних характеристик та створення наборів даних для розрахунку зсувної сприйнятливості

Підхід до обґрунтування набору факторних характеристик є принципово важливим методичним елементом побудови моделі зсувної сприйнятливості. Вибір факторів має одночасно забезпечити повноту врахування провідних причин зсувоутворення, наявність відповідних просторових даних, об'єктивність обчислення, відсутність взаємних залежностей (або їх контрольоване врахування), інтерпретованість результатів. У цьому підрозділі наведено обґрунтування чотирнадцяти факторних характеристик, що увійшли до моделі LSA, та опис алгоритмів формування кожного факторного шару.

4.2.1 Система факторних характеристик моделі

Зсувна небезпека у гірських районах Українських Карпат формується під впливом комплексу природних і антропогенних чинників. На основі аналізу міжнародної та вітчизняної літератури, виконаного у розділі 1, та емпіричних результатів, отриманих у розділі 3, у даному дисертаційному дослідженні сформовано систему з чотирнадцяти факторних характеристик, об'єднаних у п'ять тематичних блоків (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 - Система факторних характеристик моделі

№	Показник	Джерело даних	Одиниці	Просторова розрізненість джерела	Призначення у моделі
МОРФОМЕТРИЧНИЙ БЛОК					
1	Крутизна схилу	ALOS AW3D30	°	~30 м	базова характеристика стійкості
2	Експозиція схилу	ALOS AW3D30	8 секторів	~30 м	
3	Абсолютна висота	ALOS AW3D30	м	~30 м	висотне положення (600–900 м)
4		ALOS AW3D30	індекс	~30 м	концентрація/розсіювання стоку
ГІДРОЛОГІЧНИЙ БЛОК					
5	Близькість до водотоків	MERIT Hydro	1 – minmax(d)	~90 м	вплив ерозійного підмиву
ЛІСОВИЙ БЛОК					
6	Щільність лісу	Hansen GFC	0–1	30 м	деревний покрив, зімкнутість
7	Близькість до межі лісу	ESA WorldCover 2021	1 – minmax(d)	10 м	врахування зміни рослинного покриву
8	Тип лісу	CGLS-LC100 2019	6 класів	100 м	класифікація лісового покриву
9	Амплітуда NDVI	Sentinel-2 SR 2022	індекс 0–1	10 м	стан та класифікація лісового покриву
10	Втрати лісу 2001–2023	Hansen GFC	рік / 0–1	30 м	вплив динаміки лісового покриву
11	Частка лісу вище схилом	ESA WC + ALOS	0–1	~30 м	врахування фрагментації лісового покриву вище за схилом
ГЕОЛОГІЧНИЙ БЛОК					
12	Літологічні формації	векторна карта	3 класи	векторний	тип флішу
13	Близькість до розломів	векторна карта	1 – minmax(d)	векторний	врахування впливу тектонічних порушень
КЛІМАТИЧНИЙ БЛОК					
14	Опади (середньорічна сума)	WorldClim BIO12	мм/рік	~1 км	тригерний потенціал зволоження

Вибір системи з чотирнадцяти просторових предикторів, розподілених у п'яти тематичних блоках, ґрунтується на трьох взаємопов'язаних принципах - відповідності фізико-географічним механізмам зсувоутворення у флішевих породах Українських Карпат, узгодженості з практикою регіонального LSA-моделювання, забезпеченні методичної реалізованості на платформі Google Earth Engine з використанням виключно відкритих глобальних продуктів дистанційного зондування Землі.

Крутизна схилу є класичним і найбільш досліджуваним предиктором у регіональних LSA-моделях: статичні розрахунки рівноваги схилу демонструють, що при крутизні понад $25\text{--}30^\circ$ навіть незначне зниження ефективного напруження за рахунок насичення приповерхневої кори вивітрювання достатнє для активізації зсувно-зміщувальних процесів. Експозиція схилу калібрується як категоріальна змінна з восьми секторів і відображає диференційний режим зволоження, інсоляції та снігонакопичення: південні і південно-західні схили Українських Карпат характеризуються інтенсивнішим циклом зволоження–висихання, що сприяє формуванню тріщинуватості кори вивітрювання. Абсолютна висота виокремлює зсувно-активний середньогірний пояс 600–900 м, у межах якого збігаються кілька несприятливих факторів - інтенсивні опади, широколистяні ліси з обмеженим кореневим армуванням і максимальна потужність делювіально-елювіальної товщі. Профільна кривизна, обчислена за стандартним методом Zevenbergen & Thorne (1987), характеризує кривизну земної поверхні вздовж лінії найбільшого схилу і визначає прискорення чи сповільнення поверхневого стоку: увігнуті ділянки сприяють концентрації вологи й послабленню ґрунту, тоді як опуклі - її розсіюванню. Цей показник стабільніший за низької розрізненності ЦМР, ніж локальна шорсткість, і безпосередньо пов'язаний із гідрологічними механізмами зсувоутворення.

Гідрологічний блок представлений показником близькості до водотоків, обчисленим методом мінімум-максимум: $1 - \min\max(d)$ від річкової мережі, отриманої з продукту MERIT Hydro і авторського растру. Характерна відстань спадання $L = 300$ м відображає три накладені фізичні механізми впливу водотоків

на стійкість схилів: підмив основи схилу під час паводків (0–100 м), гідрогеологічне перенасичення приплавневих ґрунтів (100–400 м) та загальну гідрогеологічну спряженість схил–русло (400–900 м).

Щільність лісового покриву (за продуктом Hansen Global Forest Change, шар *treecover2000*) відображає базову зімкнутість деревостану та стабілізуючий ефект кореневої системи. Близькість до межі лісу (нормалізована знакова відстань: $1 - \min \max(|d|)$ від маски ESA WorldCover 2021) кількісно характеризує прикорайовий ефект - посилену нестабільність схилів у смузі переходу між лісом і відкритими ділянками, аналіз 1509 історичних зсувних проявів на ширшій території підтвердив, що 73 % з них приурочені до смуги 0–500 м від межі лісу. Тип лісу (Copernicus CGLS-LC100 2019, 6 класів) використано як самостійний категоріальний предиктор у LSA-моделі, що дозволяє розрізнити стабілізуючий вплив хвойних, листяних, мішаних лісів. Амплітуда NDVI за даними Sentinel-2 (2022 р.) служить фенологічним індикатором фітоценотичної активності та водозабезпеченості рослинного покриву. Втрати лісу за період 2001–2023 рр. (на основі шару *lossyear* продукту Hansen GFC, з ковзним вікном 250 м) є динамічною характеристикою антропогенної трансформації лісу - компонентою, що дозволяє визначити сучасний характер деградації лісового покриву. Частка лісу вище по схилу обчислюється як середня залісненість у круговому вікні радіусом 500 м з обмеженням за висотою центрального пікселя. Цей предиктор відображає просторово-контекстну характеристику захищеності схилу - наявність стабілізаційного лісового масиву вище по схилу, який перехоплює поверхневий стік і знижує надходження вологи до критичних ділянок.

Геологічний блок формує тектонічно-літологічну основу моделі. Літологія (категоріальна, 3 класи флішової товщі - глинистий, піщано-глинистий і піщаний фліш - за векторною геологічною картою) відображає механічні властивості корінних порід, причому близько 73 % задокументованих зсувних проявів полігону приурочені саме до піщано-глинистого (середньоритмічного) флішу, що підтверджує літологічний контроль активізації. Близькість до тектонічних розломів ($1 - \min \max(d)$ від векторного шару *rozlom*) кількісно враховує

посилення тріщинуватості порід у прирозломних зонах і відповідне ослаблення геотехнічних характеристик масиву; характерна відстань $L = 500$ м обрана як верхня межа зони регіонального тектонічного впливу для умов Українських Карпат.

Отже, узагальнимо інформацію щодо факторів, які обрані для моделювання. Морфометричний блок (4 фактори): крутизна схилу, експозиція схилу, абсолютна висота, профільна кривизна (кривизна вздовж лінії найбільшого схилу за методом Zevenbergen & Thorne). Гідрологічний блок (1 фактор) - близькість до водотоків (`dist_streams_m_raw`, з нормалізацією мінімум-максимум). Лісовий блок (6 факторів): щільність лісового покриву (на основі Hansen GFC), близькість до межі лісу (знакова відстань, нормалізація мінімум-максимум), тип лісу (Copernicus CGLS-LC100, 6 класів), амплітуда NDVI (за Sentinel-2 2022), втрати лісу 2001–2023 рр. (на основі Hansen GFC з ковзним вікном 250 м), частка лісу вище по схилу (показник у вікні 500 м з обмеженням за висотою). Геологічний блок (2 фактори): літологія (3 категоріальних класи), близькість до тектонічних розломів (з нормалізацією мінімум-максимум).

4.2.2 Формування морфометричних факторів

Морфометричні фактори обчислюються на основі цифрової моделі рельєфу (ЦМР) ALOS World 3D 30m (AW3D30) Version 2.2 Японського аерокосмічного агентства JAXA [142]. ALOS AW3D30 є однією з найбільш детальних глобально доступних ЦМР з природною просторовою розрізненністю близько 30 м (рис. 4.4).

Вибір ЦМР AW3D30 з просторовою розрізненністю 30 м обґрунтований вимогами регіонального масштабу аналізу та повнотою покриття. Альтернативний продукт ALOS PALSAR з номінальною розрізненністю 12,5 м є радарним і отриманий передискретизацією вихідних даних SRTM (≈ 30 м), тобто не несе додаткової морфометричної інформації порівняно з оптичним AW3D30 і за фактичною розрізненністю йому не поступається. Для регіональної оцінки сприйнятливості на площі 625 км² просторова розрізненність 30 м є достатньою та узгоджується з більшістю опублікованих LSA-досліджень, що оперують даними

SRTM/ALOS аналогічної розрізненності [Reichenbach et al., 2018]; перехід до вищої номінальної розрізненності без відповідної точності вхідних даних не покращив би якість моделі, натомість підвищивши обчислювальне навантаження.

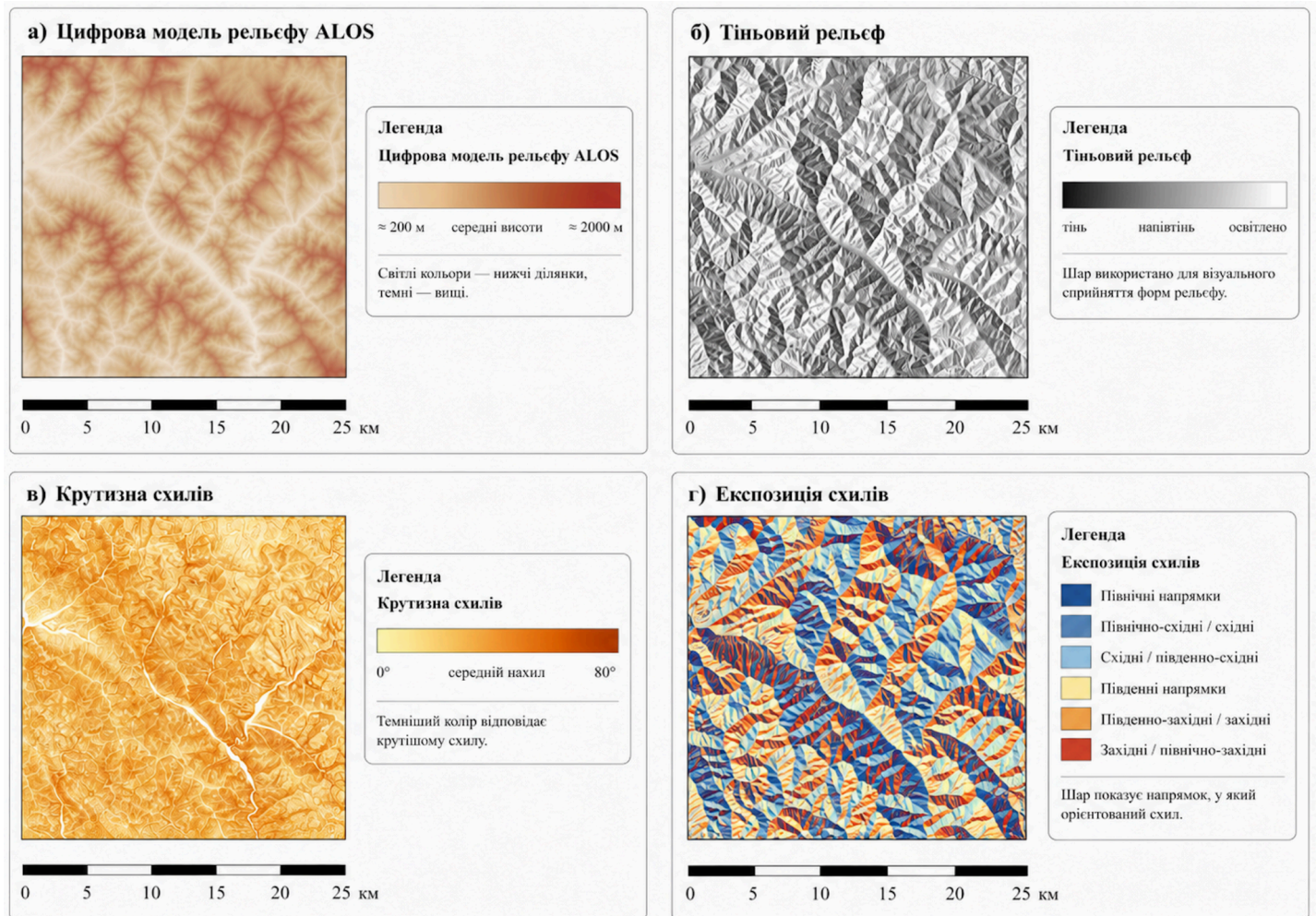


Рисунок 4.4 - Морфометричні шари рельєфу території дослідження: а) *цифрова модель рельєфу ALOS AW3D30*; б) *тіньовий рельєф*; в) *крутизна схилів*; г) *експозиція схилів (адаптовано з картографічних шарів GEE)*

Крутизна схилу обчислюється стандартним методом градієнта висот у середовищі Google Earth Engine із застосуванням вбудованих алгоритмів геопросторового аналізу цифрових моделей рельєфу. Результат подається у градусах від 0 до 90. За статистикою 236 зсувних проявів базового полігону (рис. 4.2): середнє значення $25,34^\circ$, стандартне відхилення $8,73^\circ$, пік розподілу у діапазоні $20\text{--}30^\circ$ (рис. 4.5).

Експозиція схилу обчислюється за допомогою стандартних алгоритмів визначення азимутального напрямку поверхонь у хмарному середовищі Google Earth Engine, отримані значення подаються у градусах від 0 до 360 (відлік ведеться від півночі за годинниковою стрілкою). Для категоріальної FR-калібрації експозиція перетворюється на 8 секторів: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Розподіл 236 зсувних проявів показує відносну рівномірність за секторами з невеликим переважанням південних напрямків (рис. 4.4, б): S - 38 (16,1 %), SE - 33 (14,0 %), SW - 32 (13,6 %), NW - 30 (12,7 %), N - 29 (12,3 %), E - 27 (11,4 %), W - 24 (10,2 %), NE - 23 (9,7 %) (рис. 4.5).

Абсолютна висота використовується як прямий показник із ALOS AW3D30 у метрах над рівнем моря. Розподіл 236 зсувних проявів за висотою: середнє 875,54 м, стандартне відхилення 218,92 м, пік 600–900 м, що відповідає типовому для середньогір'я Карпат висотному діапазону активного зсувоутворення.

Морфометричні характеристики рельєфу

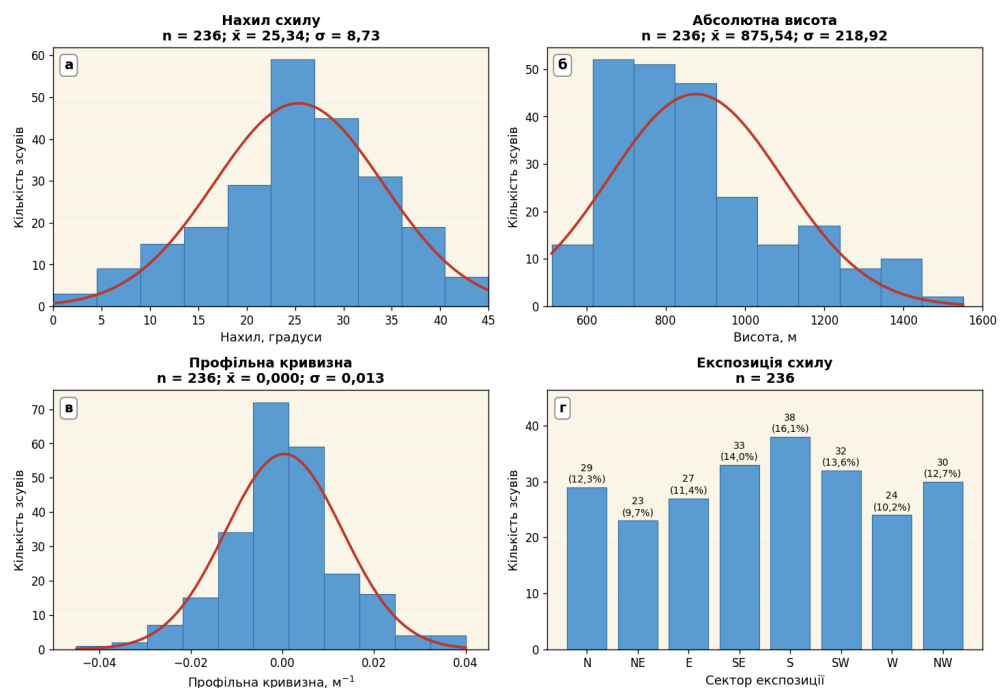


Рисунок 4.5 - Статистичний розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за значеннями морфометричних факторів: а) крутизна схилу; б) абсолютна висота; в) профільна кривизна; г) експозиція схилу

Профільна кривизна обчислюється за методом Zevenbergen & Thorne (1987) як друга похідна висоти вздовж лінії найбільшого схилу і характеризує концентрацію стоку на увігнутих формах та його розсіювання на опуклих. Для базового полігону розподіл сирих значень кривизни концентрується навколо нуля (середнє $\approx 0 \text{ м}^{-1}$, стандартне відхилення $\approx 0,013 \text{ м}^{-1}$; діапазон від $-0,042$ до $+0,038 \text{ м}^{-1}$), що відображає переважання слабо викривлених ділянок із підвищенням частки виражено увігнутих і опуклих форм на крутих схилах (рис. 4.4, в).

4.2.3 Формування гідрологічного фактора

Гідрологічний блок представлений одним фактором - близькістю до водотоків, що обчислюється на основі глобального гідрографічного набору MERIT Hydro [114]. У цьому наборі використовується шар накопиченого стоку з подальшим виокремленням водотоків за порогом 800 пікселів, що відповідає мінімальній площі водозбору приблизно $6,5 \text{ км}^2$.

З метою оцінки впливу просторової неоднорідності вихідних даних та обґрунтованості вибору джерела гідрографії виконано аналіз чутливості гідрологічного фактора на базовому полігоні «Колочава» (135 навчальних і 101 тестовий зсувний прояв). По-перше, перевірено стійкість фактора до порога виокремлення мережі: за значень 400, 800 і 1600 пікселів накопиченого стоку univariate-показник AUC ROC фактора близькості до водотоків склав відповідно 0,665, 0,660 і 0,643 за взаємної просторової кореляції шарів 0,81–0,85, що свідчить про слабку залежність результату від густини мережі. По-друге, фактор зіставлено з незалежною векторною гідрографією державного водного кадастру (2082 лінійні об'єкти), яка охоплює всю річкову мережу полігону, включно з дрібними водотоками. Повна кадастрова мережа дала слабший фактор (AUC 0,54) за низької просторової кореляції з мережею MERIT Hydro (0,25): відстань до найближчого водотоку за умови врахування всіх дрібних водотоків майже не має просторового контрасту й виявляє слабку асоціацію зі зсувними проявами, тоді як фізично значущим чинником є ерозійний контроль з боку магістральних русел. Порогова фільтрація MERIT Hydro за площею водозбору виокремлює саме таку мережу

гідрологічно значущих русел, що пояснює сильніший і монотонніший фактор та підтверджує обґрунтованість обраного джерела даних. Локальну концентрацію поверхневого стоку, не охоплену регіональною річковою мережею, у моделі відображає окремий морфометричний фактор - профільна кривизна, обчислена за ЦМР ALOS AW3D30 (30 м).

Для кожного пікселя території обчислюється евклідова відстань до найближчого водотоку за допомогою алгоритму швидкого перетворення відстаней. Результат подається у метрах. Для нормалізації у діапазон $[0; 1]$ застосовується метод мінімум-максимум з інверсією: $\text{stream_proximity} = 1 - (d - d_{\min}) / (d_{\max} - d_{\min})$, де d - відстань у метрах. Така нормалізація забезпечує високі значення фактора поблизу водотоків і поступове спадання при віддаленні без залежності від заданого параметра загасання.

Розрахунок базових статистик для вибірки з 236 зсувних проявів досліджуваної території за фактором “відстань до водотоків” дає такі значення - середнє 881,90 м, стандартне відхилення 832,55 м, пік у діапазоні 0–250 м (73 зсувних прояви, 31 %) (рис 2.7). Це підтверджує провідну роль ерозійного підмиву та концентрації стоку у формуванні зсувної небезпеки.

4.2.4 Формування лісових факторів

Лісовий блок моделі представлений шістьма показниками, що всебічно характеризують стан та динаміку лісового покриву. Детальне обґрунтування формування кожного показника наведено нижче. Просторові шари шести факторів лісового блоку зображено на рис. 4.6.

Щільність лісового покриву обчислюється на основі продукту Hansen Global Forest Change [54], який містить шар *treecover2000* з відсотковим представленням деревного покриву станом на 2000 рік. Для отримання нормалізованого значення у діапазоні $[0; 1]$ виконується поділ на 100. Цей показник відображає структурну характеристику лісу - ступінь зімкнутості деревостану, що напряду пов'язана з інтенсивністю дії трьох механізмів впливу лісу на стійкість схилів.

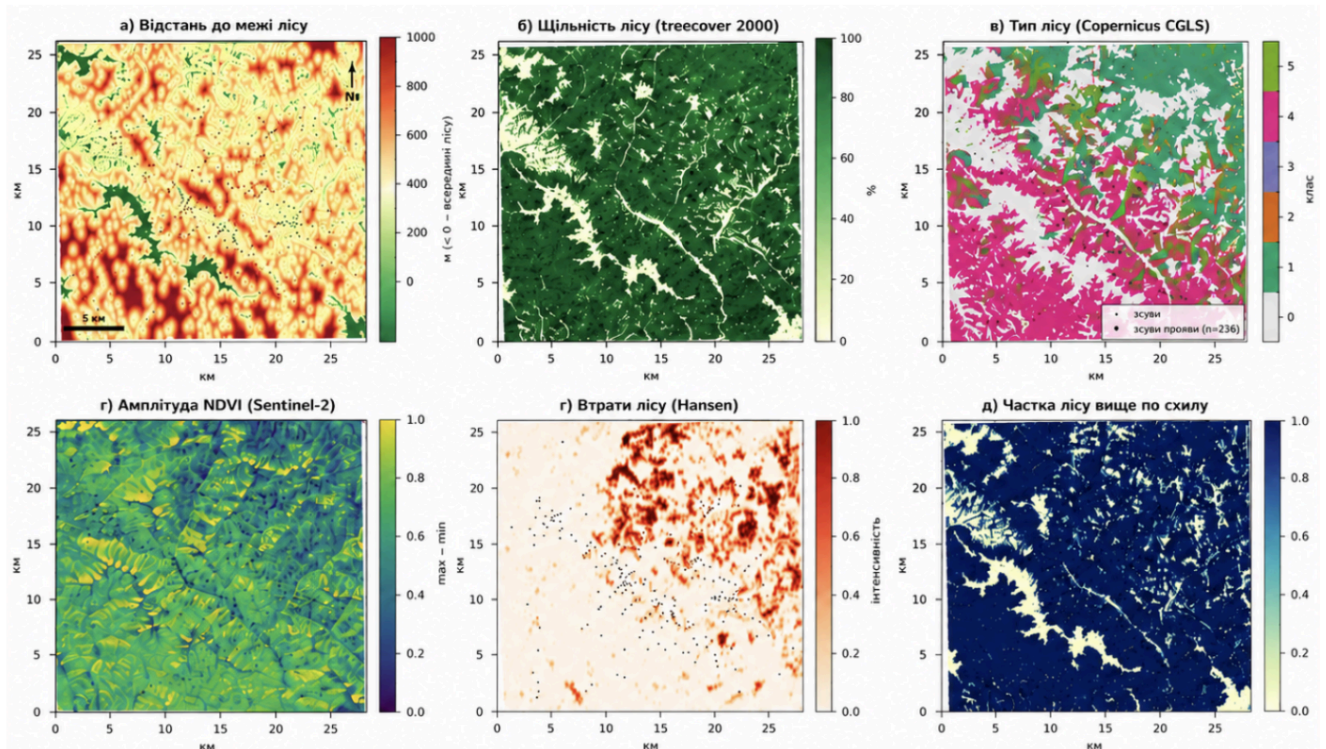


Рисунок 4.6 - Просторові шари шести факторів лісового блоку моделі LSA для базового полігону «Теребля». а- близькість до межі лісу, б - щільність лісу, в - тип лісу, г - амплітуда NDVI, г - втрати лісу 2001–2023 рр., д - частка лісу вище по схилу

Близькість до межі лісу (рис. 4.6 а) є принципово важливим показником, враховуючи встановлений у розділі 3 факт концентрації 73 % зсувних проявів у смузі 0–500 м від межі лісу. Для його обчислення використовується маска лісу за ESA WorldCover 2021 (клас 10 - «Дерева») з подальшим обчисленням знакової евклідової відстані: від'ємні значення для пікселів усередині лісового масиву, додатні - для пікселів за межами лісу. Нормалізація у діапазон [0; 1] виконується методом мінімум-максимум з інверсією абсолютного значення знакової відстані: $forest_edge = 1 - (|d| - |d_min|) / (|d_max| - |d_min|)$, де $|d|$ - абсолютне значення відстані до межі лісу у метрах. Таке перетворення забезпечує високі значення (близькі до 1) для пікселів на межі лісу або у безпосередній близькості до неї, і низькі значення для пікселів глибоко усередині лісового масиву або далеко від нього.

Тип лісу (рис. 4.6 в) - категоріальний показник, що формується на основі атрибуту `forest_type` з глобальної карти земного покриття Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100 за 2019 рік [65]. Цей атрибут містить 6 класів: 0 - території без лісового покриття, 1 - вічнозелений хвойний, 2 - вічнозелений широколистяний, 3 - листяний хвойний, 4 - листяний широколистяний, 5 - змішаний ліс. Для території Українських Карпат на базовому полігоні з 236 зсувних проявів розподіл такий: клас 4 (листопадні широколисті - переважно букові) - 98 (41,5 %); клас 0 - 77 (32,6 %); клас 5 (змішаний) - 35 (14,8 %); клас 1 (вічнозелений хвойний - смерекові) - 26 (11,0 %); класи 2 і 3 - відсутні. Врахування цього фактору запропоноване автором, оскільки тип лісу до цього часу не використовувався у регіональних моделях зсувної сприйнятливості для Українських Карпат. У таблиці 4.2 наведено ураженість зсувами площ поширення кожного типу лісу.

Таблиця 4.2 - Ураженість зсувами за типами лісового покриття (ділянка Колочава/Теребля)

Тип лісу	% від площі території	Кількість зсувів	Частка зсувів, %	Ураженість, зсув/км ²
Мішаний ліс	11,3	35	14,8	0,438
Листопадний широколистяний	36,0	98	41,5	0,386
Безлісі ділянки	31,2	77	32,6	0,350
Вічнозелений хвойний	21,5	26	11,0	0,171
Разом	100,0	236	100,0	0,335 (сер.)

Найвищу ураженість зсувами демонструє мішаний ліс (0,438 зсув/км²), за ним - листопадний широколистяний (0,386 зсув/км²). Найнижчий показник характерний для вічнозелених хвойних (смерекових) насаджень (0,171 зсув/км²).

Амплітуда NDVI (рис. 4.6 г), що характеризує сезонний розмах вегетації, обчислюється за колекцією Sentinel-2 MSI Surface Reflectance Harmonized (рівень L2A) за період з 1 січня по 31 грудня 2022 року. З колекції попередньо відсіюються сцени із загальною хмарністю понад 20 %, а на рівні окремих пікселів застосовується маска за шаром класифікації сцени (SCL): вилучаються

пікселі тіней від хмар, хмар середньої та високої ймовірності, перистих хмар і снігу/льоду. Для кожної безхмарної сцени обчислюється нормалізований вегетаційний індекс за формулою $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$, де B8 - ближній інфрачервоний канал, B4 - червоний. Далі для кожного пікселя виконується часова редукція за всіма безхмарними значеннями року: визначаються максимальне (NDVI_max) і мінімальне (NDVI_min) значення індексу, а їх різниця $ndviAmp = NDVI_max - NDVI_min$ приймається за показник амплітуди. Висока амплітуда відповідає сезонно мінливим покривам (листопадні деревостани, трав'янисті екосистеми), низька - фенологічно стабільнішим (вічнозелені хвойні ліси, водні об'єкти). Отриманий показник нормалізується у діапазон [0; 1] методом мінімум-максимум із відсіканням крайніх значень за перцентилями 2 і 98 %.

Слід критично зауважити, що NDVI є опосередкованим предиктором зсувної сприйнятливості: він відображає стан і щільність рослинного покриву, а не безпосередньо механічні чи гідрологічні чинники схилової нестабільності. У гірських умовах його інтерпретація ускладнюється сезонністю фенологічних циклів, впливом рельєфу (затінення та різна освітленість схилів різної експозиції) і висотною поясністю рослинності. Крім того, зниження вегетаційного індексу може бути як передумовою (розріджений, порушений покрив на сприйнятливих до зсувів ділянках), так і наслідком зсуву (оголення ґрунту в його тілі), що створює ризик хибної причинно-наслідкової інтерпретації.

Саме тому як предиктор обрано не одномоментне значення NDVI, а його річну амплітуду (сезонний розмах). Перехід до попиксельної часової різниці $max-min$ послаблює залежність показника від конкретної дати зйомки та від систематичних відмінностей в освітленні схилів різної експозиції, оскільки амплітуда фіксує фенологічний тип покриву (листопадний/вічнозелений, деревний/трав'янистий), а не абсолютний рівень відбиття. Опосередкований і нелінійний характер зв'язку враховується непараметричним калібруванням Frequency Ratio, що не передбачає лінійності залежності. Нарешті, амплітуда NDVI використовується не ізольовано, а як один із шести взаємодоповнюючих

індикаторів лісового блоку; її внесок інтерпретується у сукупності з рештою лісових і морфометричних факторів, а не як самостійний причинний механізм.

Втрати лісу за період 2001–2023 рр. - динамічна характеристика, що відображає антропогенну трансформацію лісового покриву. Формується на основі шару lossyear продукту Hansen Global Forest Change [54], що містить рік втрати лісу для кожного пікселя (значення від 1 до 23, відповідно 2001–2023 рр.). Для отримання просторово усередненого показника застосовується згортка з нормалізованим круговим ядром радіусом 250 м, що перетворює дискретний растр втрат на неперервний показник інтенсивності втрат у локальному оточенні кожного пікселя. Результат нормалізується у діапазон [0; 1]. Період 2001–2023 рр. охоплює весь наявний у продукті Hansen GFC ряд обліку втрат: 2001 рік є початком фіксації втрат у продукті, а 2000 рік слугує лише базовим зрізом зімкнутості деревостану. Хоча показник відображає динаміку лісового покриву, до моделі він входить як статичний кумулятивний індикатор багаторічної трансформації лісу, який агрегований у локальному околі, тобто характеризує просторову схильність території, а не вплив окремого року; відтак береться повний наявний ряд втрат, а точний рік завершення періоду не є чутливим параметром моделі.

Частка лісу вище по схилу, запропонований у цій роботі, і обчислюється як середня залісненість у межах кругового вікна радіусом 500 м з обмеженням за умовою більшої абсолютної висоти відносно центрального пікселя. Алгоритмічно це реалізується через методи аналізу локального околу пікселів у GEE з попереднім маскуванням за висотною умовою. Ідея показника полягає у тому, що стан лісу у верхній частині водозбору істотно впливає на гідрологічний режим нижніх частин схилу через регулювання поверхневого і підповерхневого стоку. Поєднання цього показника з традиційними характеристиками лісу суттєво підвищує інформативність моделі у гірських районах.

Гістограми розподілів факторів, які обґрунтовано вище та стосуються лісового покриву наведено на рис. 4.7 (безпосередньо обчислені дані) та рис. 4.8 (нормалізовані дані).

Лісова структура

(сірі значення; n = 236 зсувних проявів базового полігону)

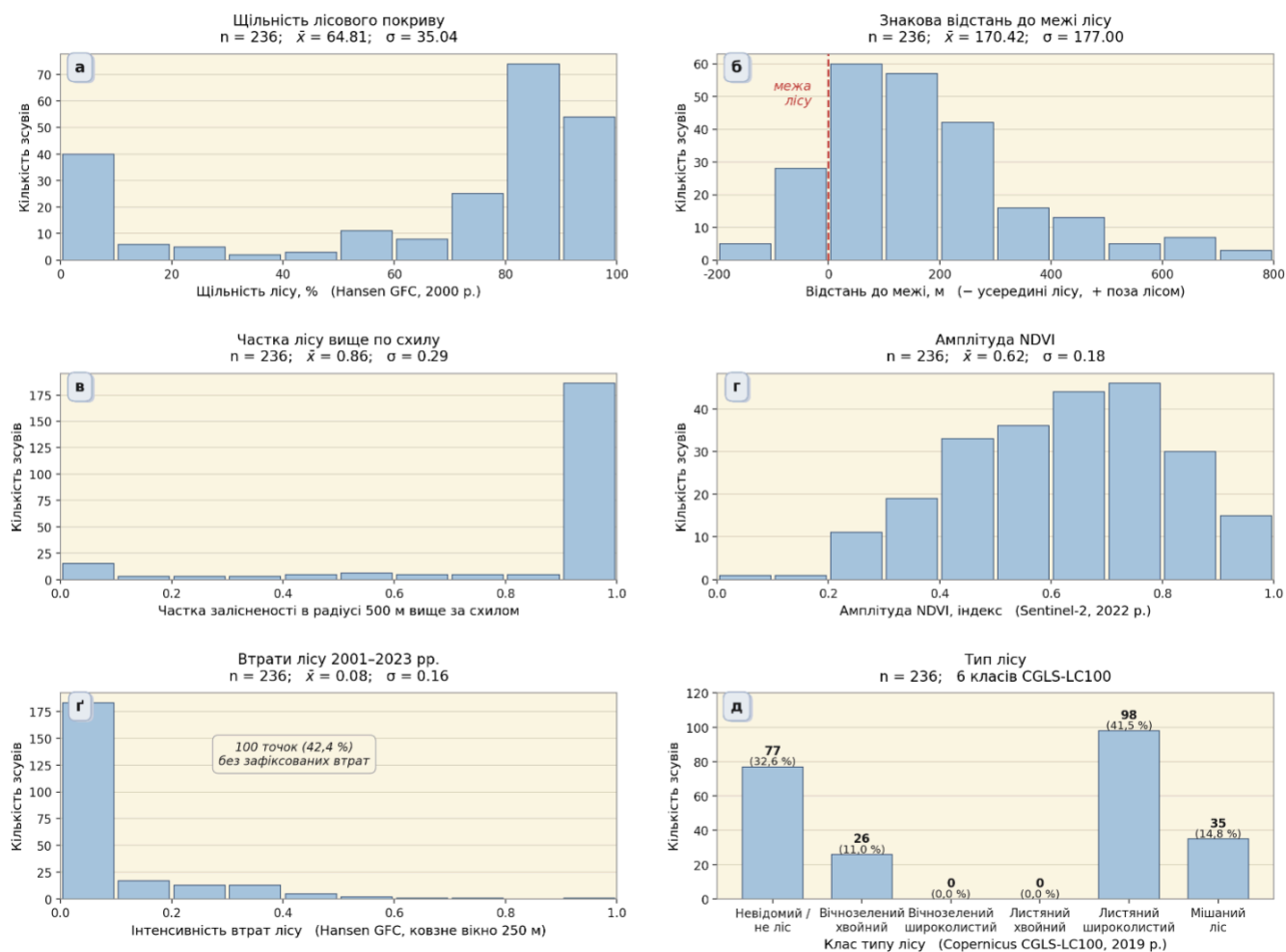


Рисунок 4.7 - Статистичний розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за значеннями шести показників лісового блоку моделі (вихідні дані)

Лісова структура

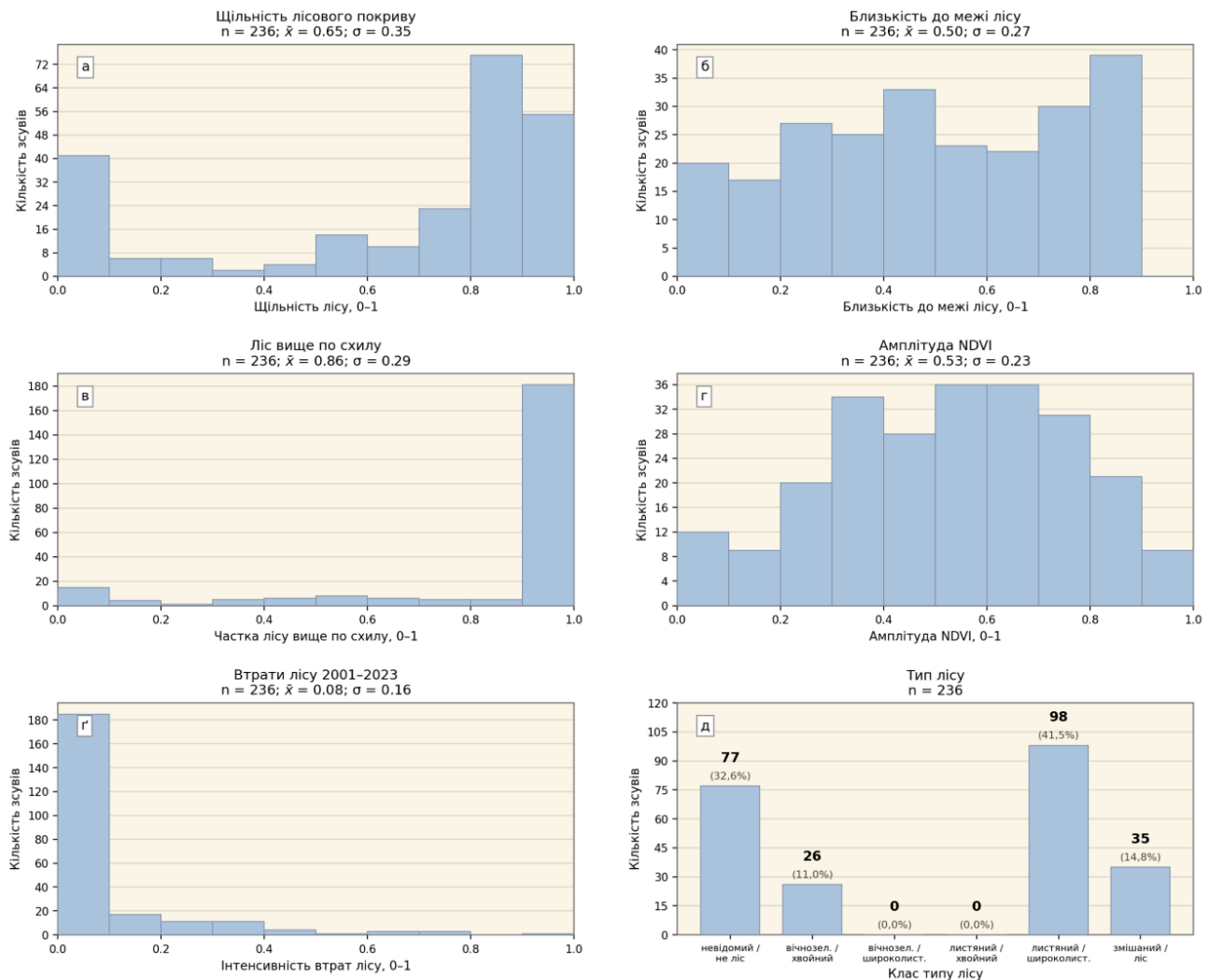


Рисунок 4.8 - Статистичний розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за значеннями шести показників лісового блоку моделі (нормалізовані дані)

Розподіл щільності лісового покриття (рис. 4.7 а) за значеннями у зсувних точках є чітко бімодальним ($\bar{x} = 0,65$; $\sigma = 0,35$): перший пік припадає на діапазон 0–0,1 (близько 40 зсувів у повністю знеліснених або сильно порідених ділянках), другий, ще більш виражений - на діапазон 0,8–1,0 (близько 130 зсувів у ділянках з високою зімкнутістю деревостану). Така бімодальність є важливою - вона емпірично підтверджує, що зсувні процеси розвиваються як на антропогенно трансформованих (знеліснених), так і на зімкнутих лісових ділянках, що додатково обґрунтовує відмову від простої бінарної параметризації «наявність лісу / відсутність лісу» у моделі.

Розподіл показника близькості до межі лісу, нормалізованого методом мінімум-максимум, характеризується середнім значенням 0,50 ($\sigma = 0,27$) з найбільшим піком у діапазоні 0,8–0,9, що відповідає зсувам, розташованим у безпосередній близькості до межі лісу ($d \approx 20\text{--}50$ м) (рис. 4.7 б) Це узгоджується з результатами картометричного аналізу для полігону 75×75 км (73 % зсувів у смузі 0–500 м від межі лісу) і підтверджує ключову роль прикрайових зон у формуванні зсувної небезпеки.

Показник частки лісу вище по схилу має розподіл з домінантним піком у діапазоні 0,9–1,0 ($\bar{x} = 0,86$; $\sigma = 0,29$): близько 180 зсувних проявів з 236 (76 %) розташовані у ділянках, де в 500-метровому радіусі вище за абсолютною висотою переважає лісовий покрив (рис. 4.7 в). Цей результат має важливу геоекологічну інтерпретацію - навіть за наявності лісу у верхній частині водозбору зсувні процеси активно розвиваються на нижчих схилах, куди концентрується підповерхневий стік із заліснених ділянок.

Амплітуда NDVI (рис. 4.7 г) характеризується дзвіноподібним розподілом ($\bar{x} = 0,53$; $\sigma = 0,23$) з піком у діапазоні 0,5–0,7, що відповідає сезонно мінливим рослинним покривам - типовим для листопадних деревостанів, характерних для нижнього і середнього лісових поясів Українських Карпат.

Розподіл інтенсивності втрат лісу 2001–2023 рр. є сильно скошеним праворуч ($\bar{x} = 0,08$; $\sigma = 0,16$): близько 185 зсувних проявів (78 %) мають значення, близьке до нуля, тобто розташовані у ділянках без значних втрат лісу у двадцятилітньому ретроспективному періоді (рис. 4.7 г). Решта 51 прояв розподілена у широкому діапазоні значень 0,1–0,9 - це зсуви, приурочені до ділянок з інтенсивною трансформацією лісового покриву в межах 250-метрового радіусу.

Нарешті, розподіл за типом лісу (класифікація Copernicus CGLS-LC100) демонструє виражену асиметрію: найбільша частка зсувів (98, 41,5 %) припадає на листяні деревостани, що відповідає буковим лісам нижнього і середнього лісового поясу Карпат; 77 зсувів (32,6 %) локалізовані на ділянках невідомого типу лісу або без лісового покриву у даній класифікації; 35 зсувів (14,8 %) - у

змішаних деревостанах; 26 (11,0 %) - у вічнозелених хвойних (смерека) (рис. 4.7 д). Листопадні хвойні та вічнозелені широколисті деревостани у місцях зсувних проявів відсутні. Така картина розподілу дозволяє емпірично ранжувати типи лісу за зсувонебезпечністю для умов Українських Карпат і слугує основою для категоріального FR-калібрування фактора тип лісу.

Окремо слід зауважити, що метод оцінки значущості за середнім зменшенням індексу Джині схильний завищувати важливість неперервних факторів із великою кількістю унікальних значень (Strobl et al., 2007). У запропонованій схемі цей зсув суттєво послаблено, оскільки значущість обчислюється на FR-каліброваних шарах, дискретизованих у 10 інтервалів, тож усі фактори входять до моделі з порівнянною кардинальністю (3–10 унікальних значень) замість сирих неперервних величин (сира амплітуда NDVI має близько 460 унікальних значень). Додатково виконано крос-перевірку методом *Permutation importance*, який не чутливий до кардинальності. Провідні позиції за результатами обох перевірок посідають морфометричні фактори та близькість до межі лісу, тоді як амплітуда NDVI виступає вторинним контекстним індикатором динаміки рослинного покриву, а не первинним причинним фактором.

4.2.5 Формування геологічних факторів

Геологічний блок моделі представлений двома факторами - літологією (зонування території за літологічним складом гірських порід) та близькістю до тектонічних розломів.

Літологія формується на основі векторного шару літологічних формацій, створеного на основі тектонічної карти Українських Карпат [111] для території дослідження, завантаженого до Google Earth Engine. У межах базового полігону виокремлено три літологічні класи (див. розділ 2.3, рис. 2.4, 2.5). Для цілей моделювання векторний шар растеризується з просторовою розрізненістю 25 м за атрибутом *Nazvaforma*, перетвореним на числовий код (*litho_code* = 1, 2, 3).

Близькість до тектонічних розломів обчислюється на основі векторного шару ліній тектонічних розломів для території дослідження. Лінії растеризуються

з шириною 2 пікселі, після чого для кожного пікселя території обчислюється евклідова відстань до найближчого розлому. Нормалізація у діапазон [0; 1] виконується методом мінімум-максимум з інверсією: $fault_proximity = 1 - (d - d_{min}) / (d_{max} - d_{min})$, де d - відстань у метрах; меншій відстані відповідає більше значення близькості. Просторова візуалізація геолого-тектонічних шарів території дослідження для моделі LSA - літологічних полігонів, растрових класів та тектонічних розломів - наведена на рис. 2.5, а гістограма розподілу на рис. 2.6 б.

4.2.6 Формування кліматичного фактора

У моделі у якості кліматичного фактора розглядається середньорічна сума опадів розрахована за продуктом WorldClim V1, шар BIO12 (просторова розрізненність близько 1 км, одиниці - мм/рік), і нормалізована у діапазон [0; 1] методом мінімум-максимум з подальшим FR-калібруванням. Опади включено до моделі як статичний предиктор сприйнятливості, тобто як багаторічну кліматичну норму орографічного зволоження, а не як динамічний тригер конкретних зсувних подій.

4.2.7 Технічна реалізація факторних шарів на Google Earth Engine

Усі чотирнадцять факторних шарів формуються у середовищі Google Earth Engine через програмний код (JavaScript API). Лістинг скрипта ключових процедур у Google Earth Engine для геоекологічної оцінки зсувної сприйнятливості території наведено у додатку В. Для забезпечення коректного оброблення даних застосовано такі технічні рішення.

Робоча проекція - UTM зона 34N (EPSG:32634), що відповідає географічному положенню Українських Карпат та забезпечує мінімальні просторові спотворення у межах регіону.

Просторова розрізненність - 25 м - спільна сітка аналізу, близька до природної розрізненності ALOS AW3D30 (~30 м) та сумісна з усіма використаними глобальними продуктами ДЗЗ (10–100 м) та забезпечує достатню

деталізацію для регіонального моделювання. Робоча сітка аналізу є самостійним параметром і не визначається жорстко розміром комірок жодного з вхідних продуктів. Крок 25 м обрано як компроміс між деталізацією оптичних даних Sentinel-2 (10 м) та морфометричних шарів ALOS AW3D30 (~30 м). Відхилення кроку на ± 5 м від природної розрізненості ALOS не є чутливим параметром, оскільки за подальшої нормалізації факторів і непараметричного калібрування воно не змінює рангового впорядкування пікселів за сприйнятливістю.

Послідовність оброблення даних дистанційного зондування для формування факторних шарів складається з чотирьох етапів. На першому етапі обрано супутникові колекції та визначено рівні їх обробки. Морфометричний блок обчислюється за цифровою моделлю рельєфу ALOS AW3D30. Амплітуду NDVI обчислено за колекцією Sentinel-2 рівня обробки L2A (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED) - атмосферно скоригованою відбивною здатністю поверхні. Лісовий блок сформовано за продуктами ESA WorldCover (маска лісу), Hansen Global Forest Change (щільність деревостану та втрати лісу) і Copernicus Global Land Cover CGLS-LC100 (тип лісу). Гідрологічний блок сформовано за продуктом MERIT Hydro (мережа водотоків), геологічний блок - за векторними шарами літологічних формацій і тектонічних розломів.

На другому етапі виконано просторове узгодження різномірних супутникових продуктів. Оскільки їх вихідна просторова розрізненість відрізняється - від 10 м (Sentinel-2, ESA WorldCover) і 30 м (ALOS AW3D30, Hansen Global Forest Change) до 100 м (Copernicus CGLS-LC100, WorldPop), - усі растрові шари приведено до єдиної робочої сітки з кроком 25 м, заданої на основі проекції ALOS AW3D30. Для неперервних шарів застосовано білінійну інтерполяцію (resampling), а для категоріальних шарів (тип лісу, літологія) - растеризацію за принципом найближчого сусіда, що зберігає вихідні дискретні класи без їх змішування.

На третьому етапі для отримання безхмарних значень вегетаційного індексу опрацьовано річний ряд знімків Sentinel-2 за 2022 рік. Вибір 2022 року зумовлений щільним рядом спостережень обох супутників Sentinel-2A/2B в усі

сезони (достатня кількість безхмарних сцен для надійної оцінки річної амплітуди), близькістю до базової маски лісу ESA WorldCover 2021 та репрезентативністю сучасного стану рослинного покриву. Спершу зі складу колекції відфільтровано сцени із загальною хмарністю понад 20 %, після чого до кожного знімка застосовано піксельну маску за шаром класифікації сцени SCL (Scene Classification Layer), яка вилучає тіні хмар, хмари середньої та високої ймовірності. На основі очищеного ряду побудовано безхмарний річний композит, для якого в кожному пікселі обчислено максимальне та мінімальне значення NDVI за рік. На четвертому етапі обчислено похідні показники: нормалізований різницевий вегетаційний індекс визначено як $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ за спектральними смугами B8 (ближній інфрачервоний) та B4 (червоний), де високі значення індексу відповідають густому зеленому рослинному покриву, а амплітуду NDVI - як різницю максимального й мінімального річних значень індексу кожного пікселя, що відображає сезонну мінливість рослинного покриву. Отриманий шар нормалізовано у діапазон [0; 1] методом перцентильного розтягування з відсіканням перцентилів 2-98 %. Часова узгодженість використаних супутникових продуктів забезпечується тим, що всі вони відображають сучасний стан території у вузькому вікні 2019–2023 рр., а характеристики лісового покриву (тип, щільність, близькість до межі, амплітуда NDVI) є повільнозмінними структурними ознаками - зрілі деревостани Українських Карпат зберігають просторову конфігурацію впродовж десятиліть, тож розбіжність у кілька років між окремими продуктами є несуттєвою для регіонального масштабу. Лісові фактори входять до моделі не як датовані тригери конкретних зсувних подій, а як статичні індикатори просторової схильності. Тобто встановлюється просторова, а не часова залежність між структурно-екологічним контекстом схилу та його зсувною ураженістю.

Область обчислень обчислюється як зовнішній прямокутник геометрії 236 задокументованих зсувних проявів з буфером 1 км, що забезпечує покриття всієї цільової території з невеликим запасом.

Нормалізація факторних шарів перед їх використанням у FR-калібруванні здійснюється за допомогою розроблених алгоритмів приведення значень до діапазону $[0; 1]$. Для неперервних чинників застосовується процедура відсікання аномальних значень за перцентилями p_2 – p_{98} , що забезпечує стійкість результатів до аномальних значень, із подальшою лінійною нормалізацією за методом мінімуму-максимуму.

4.2.8 Обґрунтування вибору факторів для моделювання з метою усунення мультиколінеарності та малоінформативних предикторів

Перш ніж використовувати ці чинники у підсумковій моделі, набір факторів додатково перевірено на надмірність двома послідовними процедурами: діагностикою мультиколінеарності та оцінюванням інформативності (важливості) кожного предиктора. Метою було вилучити чинники, що дублюють інформацію інших або вносять незначний і нестійкий внесок, зберігши при цьому фізичну інтерпретованість моделі.

Мультиколінеарність оцінювали за коефіцієнтами парної кореляції Пірсона, фактором інфляції дисперсії (VIF) та числом обумовленості кореляційної матриці. Значення VIF обчислювали як $1/(1 - R_i^2)$, де R_i^2 - коефіцієнт детермінації регресії i -го чинника на решту предикторів. Значення $VIF > 10$ (відповідно, толерантність $< 0,1$) трактували як ознаку критичної мультиколінеарності, а діапазон $5 < VIF \leq 10$ - як помірну [O'Brien, 2007].

Інформативність чинників оцінювали мультиметодно, щоб уникнути залежності висновків від одного алгоритму. За зменшенням індексу Джині у випадкових лісах (Random Forest), додаткових деревах (Extra Trees) та градієнтному бустингу (Gradient Boosting), за модулем стандартизованих коефіцієнтів логістичної регресії, за q -статистикою географічного детектора [Wang et al., 2010] та за інформаційною цінністю (Information Value). Підсумковий (консенсусний) ранг визначали усередненням рангів за шістьма методами.

Аналіз кореляційної матриці (рис. 4.9) виявив єдиний осередок сильного зв'язку - між абсолютною висотою та середньорічною сумою опадів ($r = 0,96$). Це

закономірно з огляду на орографічний характер опадів в Українських Карпатах: їх кількість майже лінійно зростає з висотою, тому обидва чинники несуть практично однакову інформацію. Усі інші пари чинників мали $|r| < 0,8$.

Наявність надлишковості підтвердила діагностика VIF (рис. 4.10): для абсолютної висоти та суми опадів значення сягали 15,3 і 14,5 відповідно, тобто перевищували критичний поріг 10, тоді як число обумовленості матриці становило 9,2. Решта 12 чинників мали $VIF < 3$. Оскільки опади виявилися статистично надлишковими відносно висоти, а висота є первинним і фізично краще інтерпретованим чинником рельєфу, з подальшого розгляду вилючено саме чинник суми опадів.

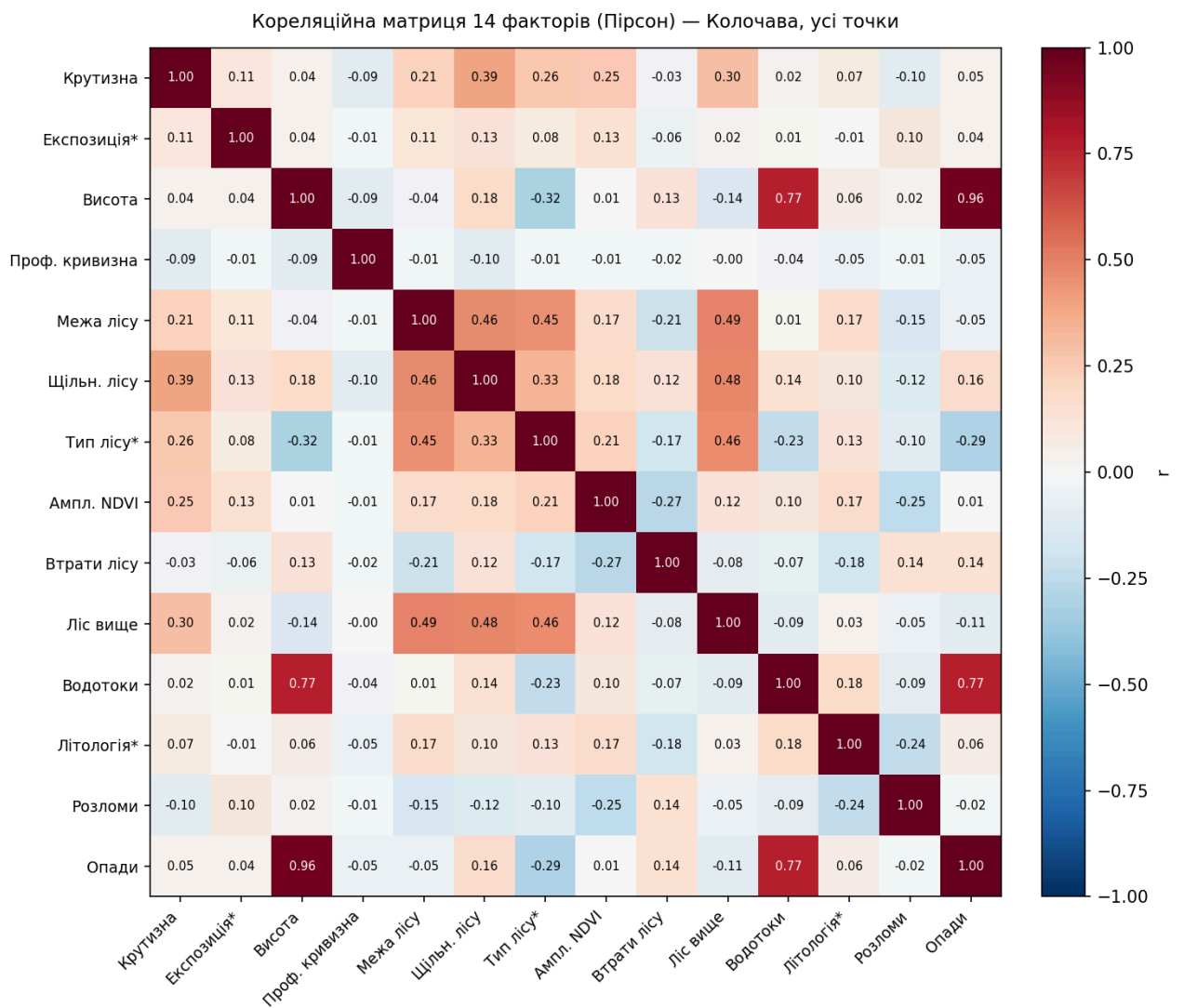


Рисунок 4.9 - Кореляційна матриця (Пірсон) 14 початкових чинників за вихідними значеннями

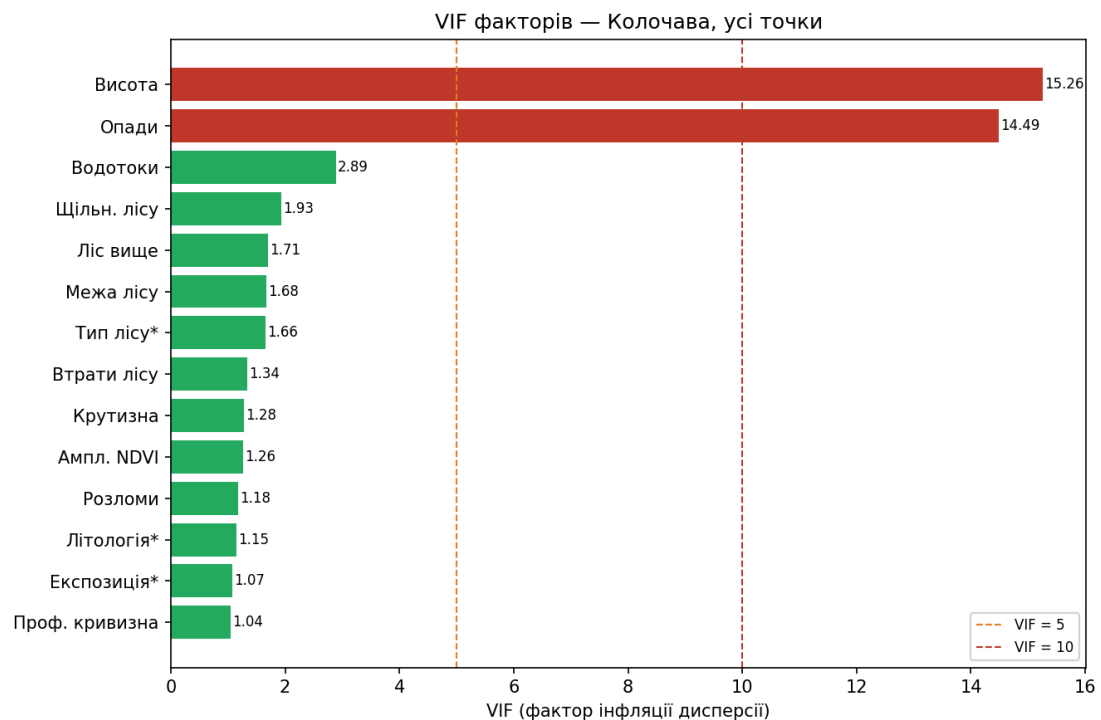


Рисунок 4.10 - Значення VIF для 14 початкових чинників; пунктиром позначено пороги VIF = 5 та VIF = 10

Оцінювання інформативності (табл. 4.3) показало, що найменший і найменш стійкий внесок мають три чинники лісової групи. Втрати лісу та наявність лісу вище по схилу стабільно посідали останні позиції за всіма методами (консенсусна важливість 2,3 % і 1,9 % відповідно). Амплітуда NDVI демонструвала виражену методозалежність: за індексом Джині випадкового лісу її внесок був помітним (близько 9 %), однак за q-статистикою географічного детектора, інформаційною цінністю та логістичною регресією - близьким до нуля (1,2–1,5 %), що свідчить про нестійкість оцінки та її ймовірне завищення деревними методами. З огляду на низьку або нестабільну інформативність ці три чинники також було вилучено.

Таблиця 4.3 – Оцінки інформативності й мультиколінеарності чинників та рішення щодо відбору

Чинник	Важливість (RF, Gini), %	Осереднена важливість, %	VIF
Крутизна схилу	10,00	6,00	1,28
Експозиція	9,41	4,70	1,08
Абсолютна висота	7,73	19,58	15,26
Профільна кривизна	9,35	4,24	1,05
Відстань до межі лісу	8,39	11,16	1,68
Щільність лісу	6,85	6,92	1,93
Тип лісу	4,94	2,54	1,66
Амплітуда NDVI	8,95	4,30	1,26
Втрати лісу	3,06	2,32	1,34
Ліс вище по схилу	3,01	1,88	1,71
Літологія	3,67	8,63	1,15
Відстань до розломів	8,25	8,57	1,18
Сума опадів (BIO12)	8,34	12,01	14,49
Відстань до водотоків	8,04	7,15	2,89

Після вилучення чотирьох чинників (сума опадів, амплітуда NDVI, втрати лісу та ліс вище по схилу) повторна діагностика підтвердила відсутність мультиколінеарності у скороченому наборі з 10 предикторів (рис. 4.11, табл. 4.4): максимальне значення VIF знизилося до 2,8, середнє - до 1,6, число обумовленості - до 3,3, а максимальний коефіцієнт кореляції - до 0,77 (пара «висота – водотоки»). Усі чинники набули значень VIF, що значно нижчі за поріг 5.

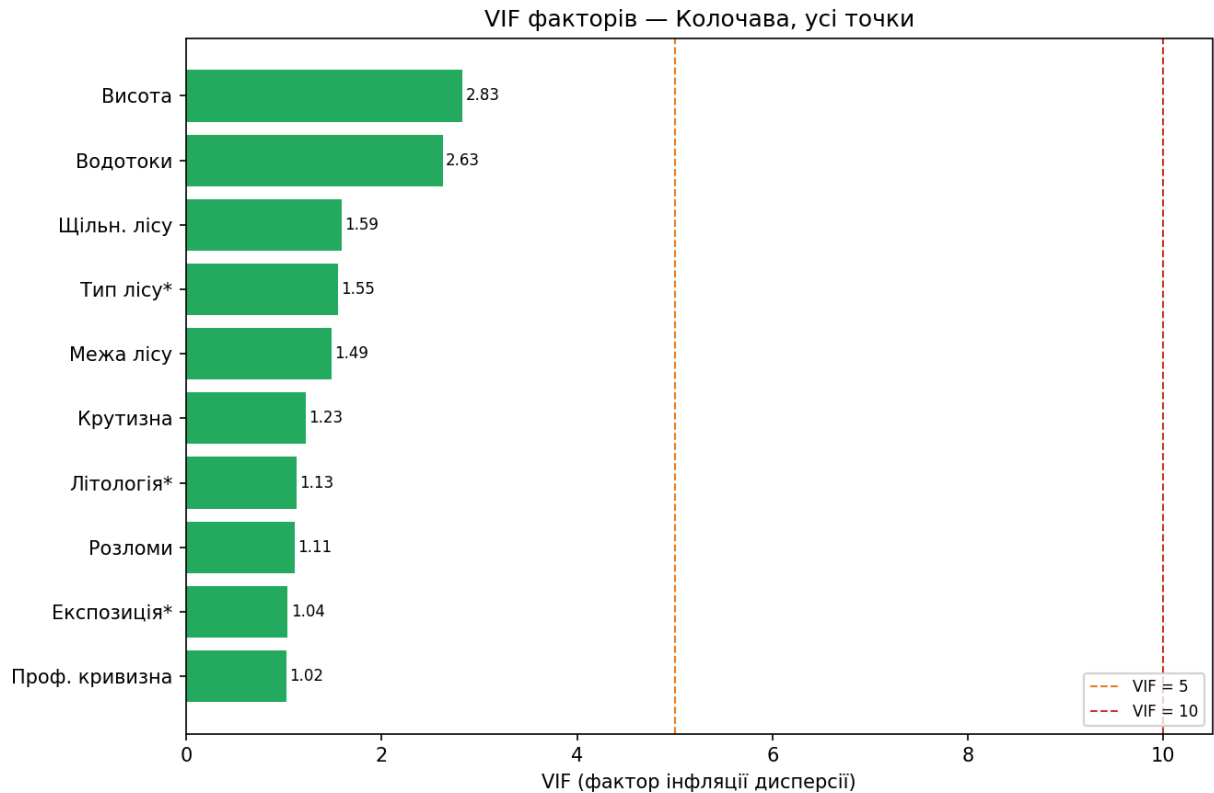


Рисунок 4.11 - Значення VIF для підсумкового набору з 10 чинників

Таблиця 4.4 – Інтегральні показники мультиколінеарності до та після скорочення набору чинників

Показник	14 чинників	10 чинників
Максимальний VIF	15,26	2,83
Середній VIF	3,43	1,56
Число обумовленості матриці	9,2	3,3
Максимальний $ r $ між чинниками	0,96	0,77

Отже, обґрунтований відбір дав змогу перейти від початкових 14 до 10 чинників за двома незалежними критеріями: усунення мультиколінеарності (вилучення суми опадів як надлишкової відносно висоти) та виключення малоінформативних і статистично нестійких предикторів (амплітуда NDVI, втрати лісу, ліс вище по схилу). Підсумкова модель спирається на 10 взаємно слабокорельованих чинників - крутизну схилу, експозицію, абсолютну висоту,

профільну кривину, відстань до межі лісу, щільність лісу, тип лісу, відстань до водотоків, літологію та відстань до розломів.

Слід зауважити, що для трьох чинників - експозиції (циклічна змінна) та типу лісу й літології (категоріальні змінні) - лінійні показники кореляції та VIF мають умовний характер. Проте джерело мультиколінеарності було пов'язане не з ними, а з парою «висота – опади», тому на коректність процедури відбору ця обставина не впливає.

4.3 Результати моделювання сприйнятливості території до розвитку зсувних процесів з урахуванням лісового фактора

Просторово-блоковий поділ вибірки зсувних проявів на навчальну та тестову частини є принципово важливим методичним елементом коректної валідації просторових моделей. Звичайний випадковий поділ точок на навчальну і тестову призводить до просторового витoku інформації між вибірками: просторово сусідні точки потрапляють у різні групи, що штучно завищує точність моделі при валідації [119]. Просторово-блоковий підхід вирішує цю проблему через формування квадратних блоків у географічному просторі та призначення кожного блоку повністю до навчальної або повністю до тестової.

У даному дисертаційному дослідженні просторово-блоковий поділ реалізовано з такими параметрами: розмір блоку 3×3 км, співвідношення навчальної до тестової вибірки становить 57% до 43%. Для забезпечення детермінованості поділу застосовано початкове значення (seed) генератора (SPATIAL_SEED = 20260323) як параметр функції генерації випадкових чисел. Для кожного зсувного прояву обчислюється належність до відповідного блоку, потім блоки випадково розподіляються на навчальний (57 %) та тестовий (43 %), причому всі точки одного блоку повністю потрапляють в одну з двох категорій.

Для Закарпатського полігону з 236 зсувних проявів результат просторово-блокового поділу такий: навчальна вибірка містить 135 точок (57 %), тестова вибірка - 101 точку (43 %). Візуальний аналіз просторового розподілу навчальних і тестових точок (рис. 4.12) демонструє, що точки обох вибірок

рівномірно покривають весь полігон, без концентрації у певних його частинах. Це підтверджує репрезентативність обох вибірок для подальших обчислень.

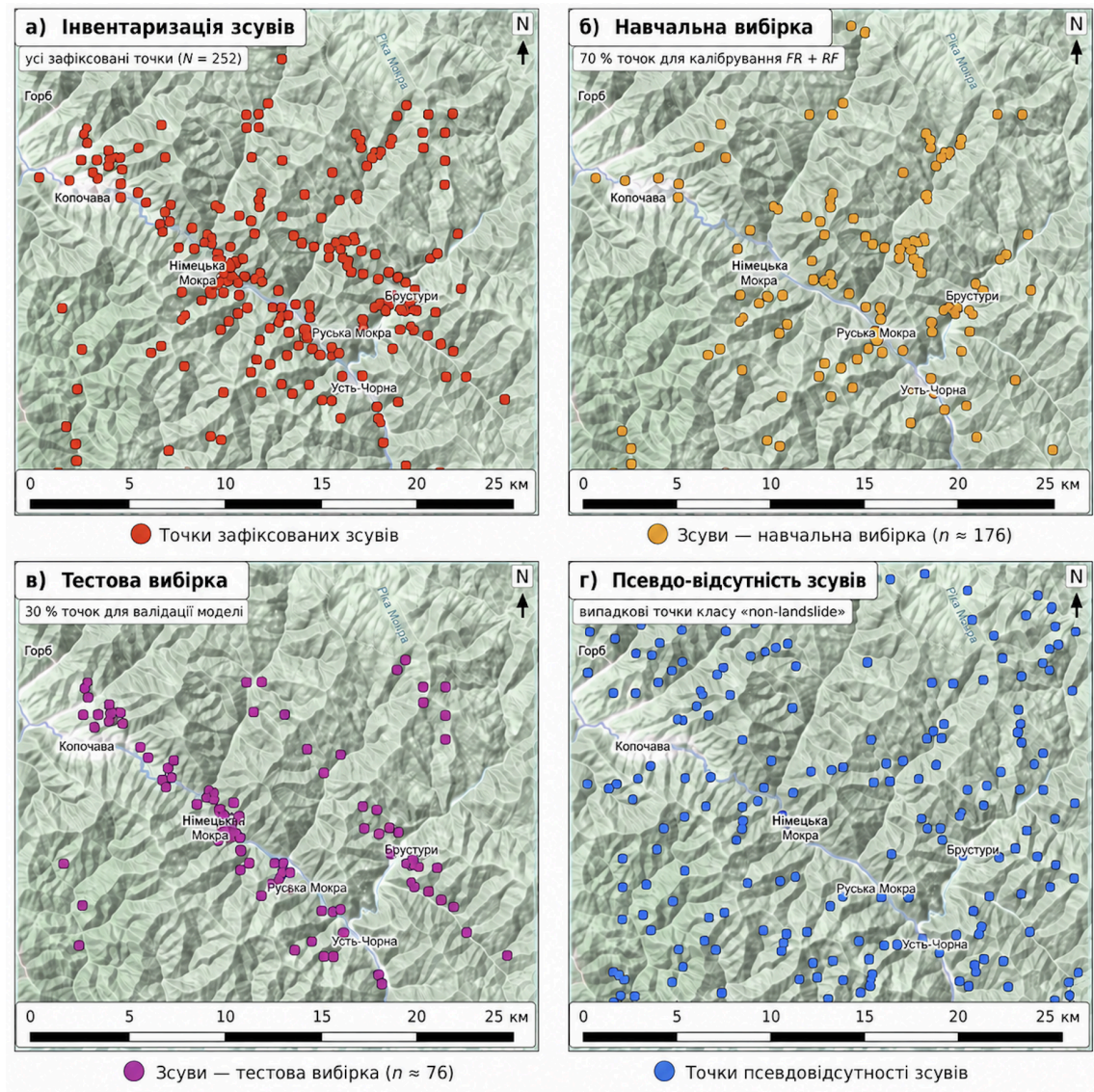


Рисунок 4.12 - Точкові шари для побудови та перевірки моделі LSA: а) повна інвентаризація зсувних проявів (236 точок); б) навчальна вибірка (135 точок, 57 %); в) тестова вибірка (101 точка, 43 %); г) точки псевдо-відсутності зсувів (236 точок) (адаптовано з картографічних шарів GEE)

Додатково до навчальних та тестових точок зсувних проявів генерується додаткова вибірка контрольних точок без зафіксованих зсувів («точок псевдо-відсутності зсувів», необхідна для тренування алгоритму Random Forest з бінарною цільовою змінною «присутність/відсутність». Точки псевдо-відсутності

генеруються випадковим чином у межах території дослідження з дотриманням таких умов: відстань від будь-якої точки псевдо-відсутності до найближчого зареєстрованого зсувного прояву повинна бути не меншою за 150 м (параметр NONLS_BUFFER_M = 150); кількість точок псевдо-відсутності = кількості усіх задокументованих зсувних проявів = 236 штук. Такий підхід забезпечує збалансовану вибірку для RF з рівними розмірами класів.

Слід уточнити, що загальна вибірка є збалансованою у співвідношенні 1:1 (236 зсувних проявів і 236 точок псевдо-відсутності), однак у навчальній частині співвідношення становить 135:159, оскільки просторово-блокове призначення для двох типів точок виконується незалежно. Вплив цього помірного дисбалансу на вагові коефіцієнти є незначним: повторне навчання з повторним зважуванням класів (class_weight=balanced) змінює ваги не більш ніж на 0,4 в.п., а рангова кореляція з базовим варіантом становить $\rho = 0,99$. Стабільність вагових коефіцієнтів оцінено за міждеревною варіабельністю (стандартне відхилення значущості між 300 деревами) та бутстреп-ресемплінгом навчальної вибірки (95%-ні довірчі інтервали). Рангова стабільність факторів становить $\rho = 0,80$, причому групи провідних і другорядних факторів є однозначними.

4.3.1 Калібрування факторних шарів методом частотного співвідношення (FR)

Метод частотного співвідношення (FR) є одним із найбільш поширених і методично обґрунтованих підходів до калібрування факторних шарів у моделях LSA. Основна ідея методу полягає у об'єктивному оцінюванні ймовірності виникнення зсуву у межах класів кожного фактора на основі просторового збігу задокументованих зсувних проявів з цими класами.

Для неперервних факторів (крутизна схилу, висота, профільна кривизна, близькість до водотоків, близькість до розломів, щільність лісового покриву, відстань до узлісся, амплітуда NDVI, втрати лісу після 2001 року, частка лісу вище по схилу, середньорічна сума опадів), FR-калібрування виконується за таким алгоритмом:

1. Кожен чинник приводиться до уніфікованого діапазону $[0; 1]$ за допомогою розроблених алгоритмів нормалізації; для усунення впливу аномальних викидів застосовується процедура відсікання значень за межами 2-го та 98-го перцентилів.

2. Нормалізований фактор розділяється на 10 рівновеликих класів у діапазоні $[0; 1]$ (ширина класу 0,1).

3. Для кожного класу i обчислюються такі величини: n_i^{train} = кількість навчальних зсувів у класі i ; n_i^{area} = кількість пікселів класу i у межах території дослідження. Далі за формулами 4.2-4.4 обчислюємо частку навчальних зсувів у класі i , частку площі класу i , частотне співвідношення для класу i відповідно.

$$P_i^{train} = \frac{n_i^{train}}{\sum_{j=1}^k n_j^{train}} \quad (4.2)$$

$$P_i^{area} = \frac{n_i^{area}}{\sum_{j=1}^k n_j^{area}} \quad (4.3)$$

$$FR_i = \frac{P_i^{train}}{P_i^{area}} \quad (4.4)$$

P_i^{train} - частка навчальних зсувів у класі i ; P_i^{area} - частка площі класу i ; $FR_i = P_i^{train} / P_i^{area}$ - частотне співвідношення для класу i ; k - кількість класів фактора.

4. Значення FR_i нормалізуються у діапазон $[0; 1]$ через мінімум-максимум: $FR_i^{norm} = (FR_i - \min(FR)) / (\max(FR) - \min(FR))$, з додатковим згладжуванням для усунення різких перепадів між суміжними класами.

5. Нормалізовані FR-значення присвоюються всім пікселям території відповідно до їх класу фактора, формуючи FR-калібрований шар. Приклади FR-каліброваних шарів для репрезентативних неперервних факторів

морфометричного (крутизна схилу, абсолютна висота, профільна кривизна), гідрологічного (близькість до водотоків) та вегетаційного (амплітуда NDVI) блоків наведено на рис. 4.13.

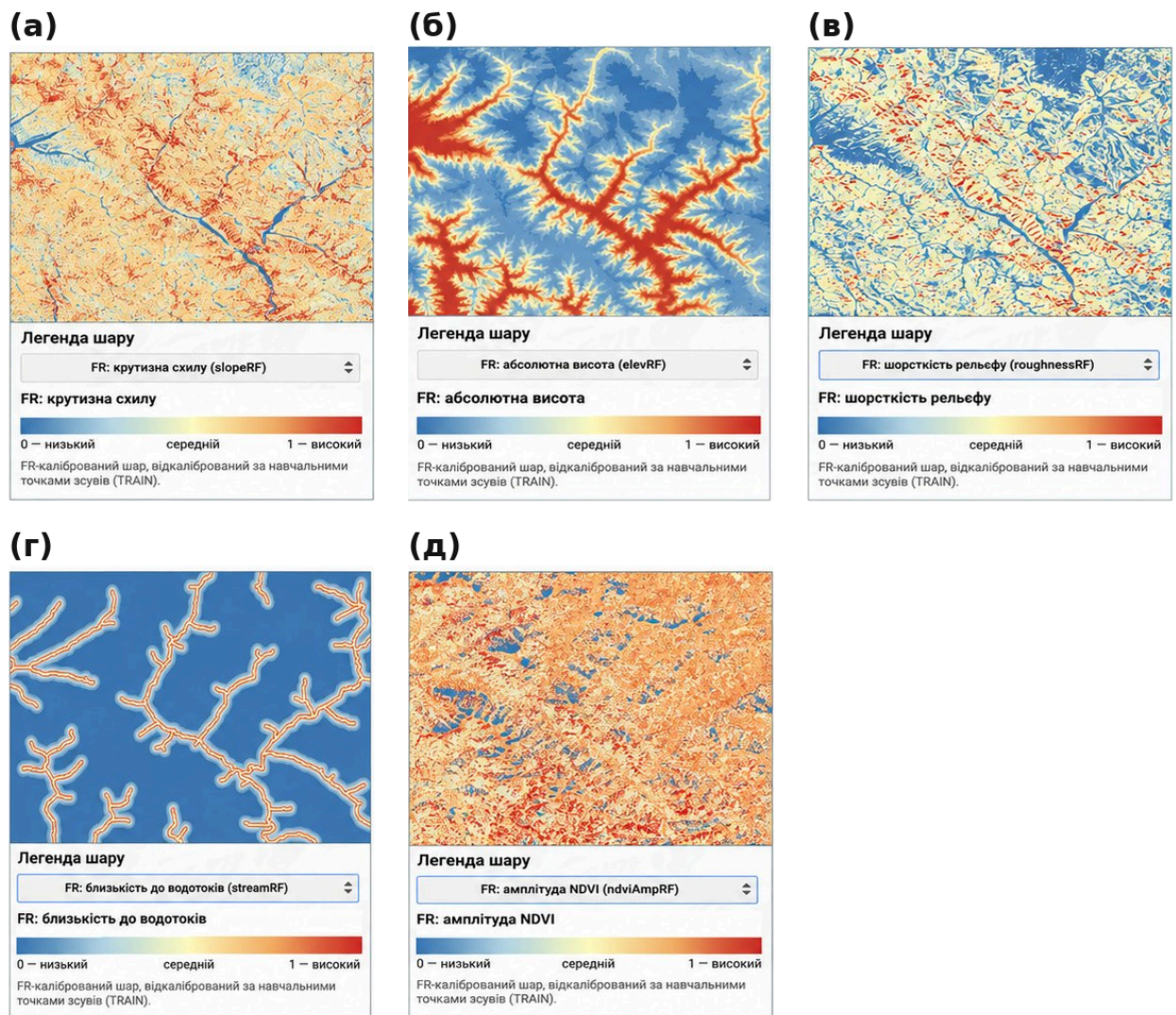


Рисунок 4.13 - FR-калібровані факторні шари моделі LSA. а) *FR-калібрований шар крутизни схилу*; б) *FR-калібрований шар абсолютної висоти*; в) *FR-калібрований шар профільної кривизни*; г) *FR-калібрований шар близькості до водотоків*; д) *FR-калібрований шар амплітуди NDVI*

ля категоріальних факторів (експозиція схилу, тип лісу, літологія) *FR-калібрування* виконується безпосередньо по дискретних класах. Для кожного класу обчислюється *FR* як P_i^{train} / P_i^{area} , потім нормалізується у $[0; 1]$. Для фактора експозиція схилу додатково застосовується циклічне згладжування (з

урахуванням, що після 8-го сектора NW йде 1-й сектор N), що забезпечує плавні переходи між сусідніми секторами.

Типові результати *FR*-калібрування для базового полігону свідчать про такі закономірності:

- для крутизни схилу максимальні *FR*-значення спостерігаються у діапазоні 25–40° (у 2,5–3,5 рази вище базового рівня), що відповідає активізації мілких зсувів-спливів на типових карпатських схилах;

- для близькості до водотоків максимальні *FR*-значення приурочені до вузької прируслової смуги, що узгоджується з провідною роллю ерозійного підмиву та концентрації поверхневого стоку (близько 31 % зсувів локалізовано у смугі 0–250 м від водотоку);

- для щільності лісового покриву максимальні значення *FR* спостерігаються у двох діапазонах - 0,0–0,1 (зnelісені ділянки) та 0,8–1,0 (зімкнуті деревостани), що відображає бімодальний характер розподілу зсувів за цим показником;

- для близькості до межі лісу *FR* досягає максимальних значень у діапазоні 0,7–1,0, що підтверджує провідну роль прикрайових зон;

- для літологічного блоку клас 2 (середньоритмічний фліш) демонструє найвищий *FR*, що узгоджується з його переважанням по площі і підвищеною сприйнятливістю до зсувоутворення.

4.3.2 Багатовимірний статистичний аналіз факторів

Для отриманих значень факторів у точках зсувів розраховано базові статистики, значення яких наведено у таблиці 4.5.

Для перевірки внутрішньої структури набору предикторів моделі виконано комплекс багатовимірних статистичних методів: кластерний аналіз K-means ($k = 4$), кореляційний аналіз, експлораторний факторний аналіз з варімакс-обертанням, метод головних компонент (PCA). Аналіз виконано на основі 14 безперервних нормалізованих просторових предикторів для 236 зсувних точок базового

полігону. Зазначені методи аналізу виконані за допомогою мови програмування Python з використанням бібліотек Scipy, matplotlib, numpy.

Таблиця 4.5 - Базові статистики для значень факторів у точках зсувів

Фактор	Од.	Мінімум	Максимум	Середнє	СКВ	Медіана
Крутизна схилу	°	2,94	44,65	25,34	8,73	25,74
Експозиція *	°	0	356,9	178,7	98,30	174,0
Абсолютна висота	м	511,0	1551,0	875,5	218,9	830,0
Профільна кривина	1/м	-0,042	0,038	0,0004	0,013	0,000
Відстань до межі лісу	м	-150,0	740,4	170,4	177,0	145,8
Щільність лісу	%	0	100,0	64,81	35,04	85,00
Тип лісу *	код	0	5,00	2,51	2,04	4,00
Амплітуда NDVI	—	0,128	1,00	0,624	0,184	0,641
Втрати лісу	—	0	0,991	0,080	0,159	0,006
Ліс вище по схилу *	0/1	0	1,00	0,857	0,292	1,00
Відстань до водотоків	м	0	3300,1	881,9	832,5	608,5
Літологія *	код	1,00	3,00	1,89	0,507	2,00
Відстань до розломів	м	0	6431,0	1802,2	1273,9	1601,9
Сума опадів (BIO12)	мм	772,6	994,5	849,2	45,35	839,4

* Для цих факторів розраховані середні значення, середньоквадратичні відхилення є умовними, оскільки вони представлені у вигляді дискретних зон, які позначено кодами.

Кластерний аналіз K-means ($k = 4$) дозволив типізувати зсувні прояви за сукупністю стандартизованих факторних ознак (рис. 4.14). За результатами кластеризації виділено чотири групи з різними поєднаннями морфометричних, лісових, гідрологічних та кліматичних характеристик.

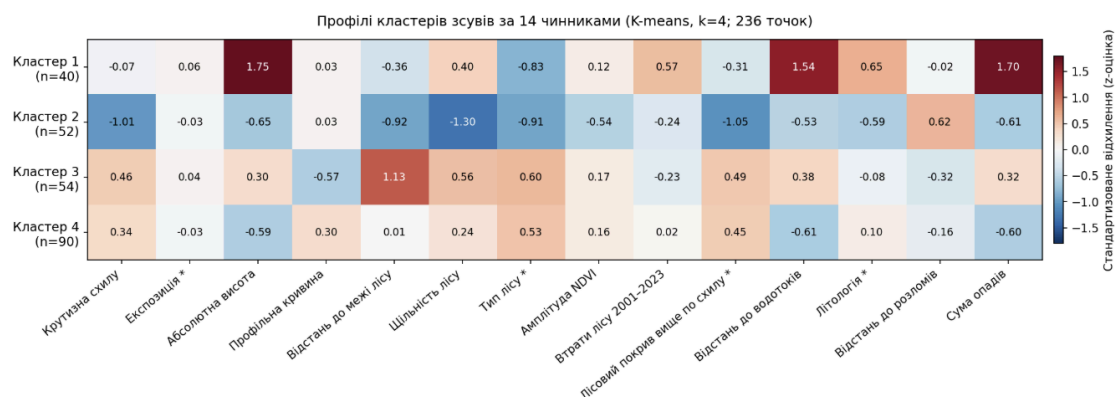


Рисунок 4.14 Профілі 4 кластерів зсувних проявів за стандартизованими факторними ознаками (K-means, $k = 4$).

Кластер 1 ($n = 40$; 16,9 % вибірки) характеризується найбільшими абсолютними висотами ($z = 1,75$), значною відстанню до водотоків ($z = 1,54$), підвищеною сумою опадів ($z = 1,70$) та збільшеними втратами лісу ($z = 0,57$). Водночас для нього характерна низька частка лісу вище по схилу ($z = -0,83$) та дещо менша відстань до розломів. Такий тип відповідає високогірним ділянкам із помітною трансформацією лісового покриву та підвищеним зволоженням.

Кластер 2 ($n = 52$; 22,0 %) відзначається мінімальною крутизною схилів ($z = -1,01$), низькими абсолютними висотами ($z = -0,65$), малою щільністю лісу ($z = -1,30$), незначною часткою лісу вище по схилу ($z = -0,91$), низькою амплітудою NDVI та значною близькістю до водотоків ($z = -1,05$). Одночасно кластер характеризується підвищеною віддаленістю від розломів ($z = 0,62$). Це переважно долинні або прикорайові ділянки зі слабким лісовим покривом.

Кластер 3 ($n = 54$; 22,9 %) характеризується найбільшою відстанню до межі лісу ($z = 1,13$), підвищеною щільністю лісового покриву ($z = 0,56$), значною часткою лісу вище по схилу ($z = 0,60$), збільшеною відстанню до водотоків ($z = 0,49$) та помірно підвищеною крутизною схилів. Для цього кластеру властиві добре залісені схилі території зі стабільним рослинним покривом.

Кластер 4 ($n = 90$; 38,1 %) є найбільшою групою та характеризується помірно крутими схилами ($z = 0,34$), підвищеною профільною кривизною ($z = 0,30$), більшою часткою лісу вище по схилу ($z = 0,53$), збільшеною відстанню до водотоків ($z = 0,45$) та зниженими абсолютними висотами ($z = -0,59$), сумою опадів ($z = -0,60$) і близькістю до водотоків. Цей кластер відображає типові середньогірні схилі умови розвитку зсувів.

Рисунок 4.14 - демонструє, що жоден із кластерів не визначається окремим фактором, а формується специфічним поєднанням морфометричних, гідрологічних, лісових і кліматичних характеристик. Найбільші відмінності між групами спостерігаються за абсолютною висотою, щільністю та структурою лісового покриву, відстанню до водотоків і сумою опадів, що свідчить про складний багатфакторний характер формування зсувної небезпеки в Українських Карпатах.

Експлораторний факторний аналіз (EFA) з варімакс-обертанням виявив наявність латентних факторних блоків у структурі предикторів (рис. 4.15).

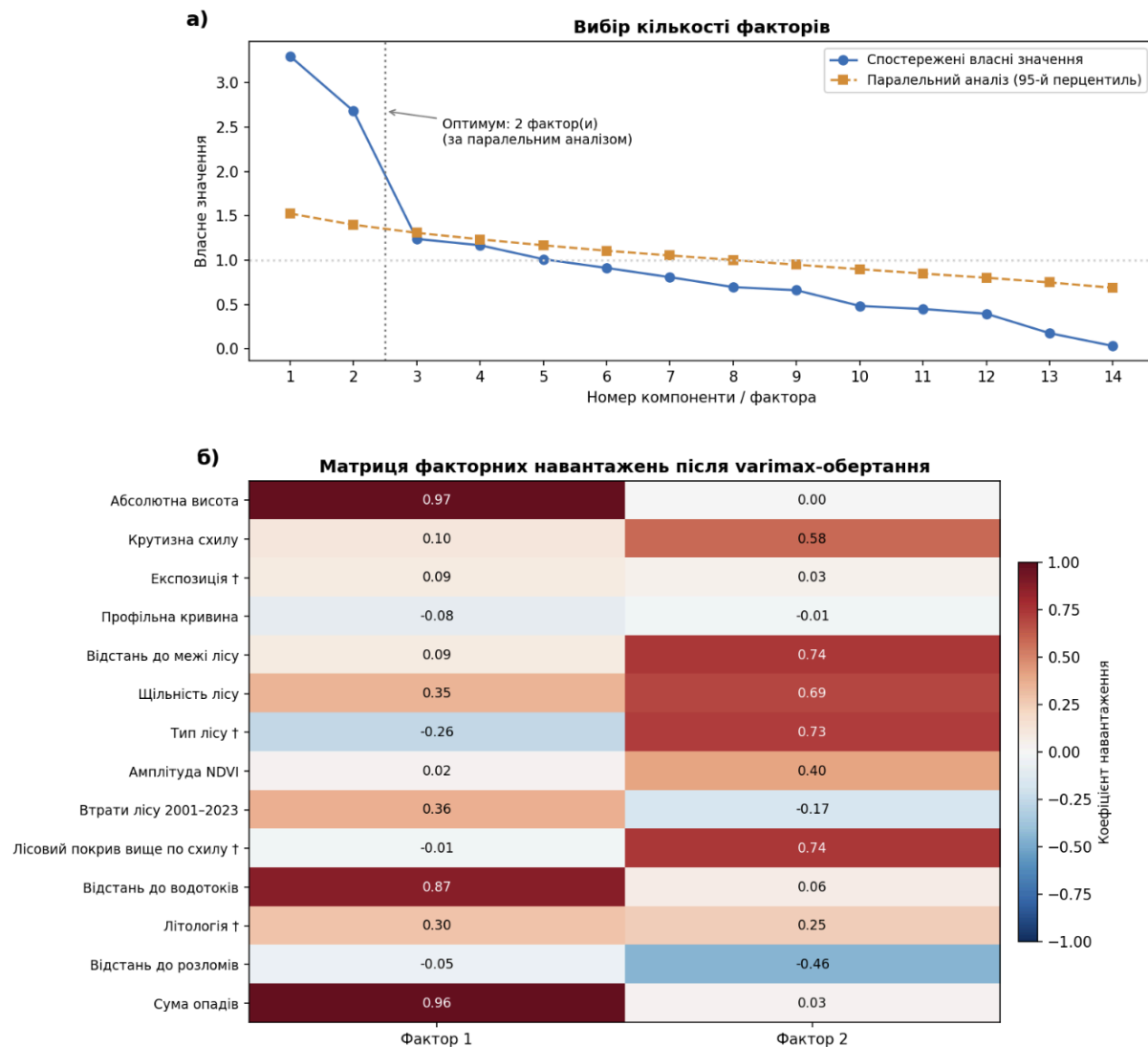


Рисунок 4.15 - Експлораторний факторний аналіз просторових предикторів: а) вибір кількості факторів за паралельним аналізом; б) матриця факторних навантажень після varimax-обертання

Для визначення оптимальної кількості факторів застосовано паралельний аналіз, результати якого наведено на рис. 4.15а. Порівняння спостережених власних значень із 95-м перцентилем випадкових даних показало, що статистично обґрунтованим є виділення двох факторів, оскільки лише перші дві компоненти мають власні значення, що перевищують відповідні значення паралельного аналізу.

Матрицю факторних навантажень після варімакс-обертання наведено на рис. 4.15б. Для інтерпретації враховувалися переважно навантаження, абсолютне значення яких перевищує 0,4.

Перший фактор характеризується дуже високими позитивними навантаженнями абсолютної висоти (0,97), суми опадів (0,96) та відстані до водотоків (0,87). Помірний позитивний внесок також мають втрати лісу, щільність лісового покриву та літологія. Цей фактор відображає висотно-кліматично-гідрографічний градієнт, що характеризує просторову диференціацію між високогірними ділянками з більшими опадами та віддаленістю від річкової мережі і нижчими долинними територіями.

Другий фактор формують відстань до межі лісу (0,74), тип лісу (0,73), лісовий покрив вище по схилу (0,74), щільність лісового покриву (0,69) та крутизна схилу (0,58). Помірне позитивне навантаження має також амплітуда NDVI (0,40), тоді як відстань до тектонічних розломів характеризується від'ємним навантаженням (-0,46). Цей фактор можна інтерпретувати як схилово-лісовий комплекс, що поєднує особливості морфології схилів із структурою та просторовою організацією лісового покриву.

Окремі предиктори, зокрема експозиція, профільна кривизна та літологія, мають невеликі факторні навантаження, що свідчить про їх відносно незалежний внесок або складніший характер взаємодії з іншими чинниками.

Рис. 4.13 демонструє, що просторові предиктори моделі LSA групуються у два головні латентні блоки - орографічно-кліматично-гідрографічний, який визначає висотну та гідрологічну диференціацію території та схилово-лісовий, що характеризує взаємозв'язок між морфометрією схилів та структурою лісового покриву.

Отримані результати свідчать про відсутність критичної мультиколінеарності між предикторами та підтверджують, що формування зсувної небезпеки в Українських Карпатах визначається взаємодією двох основних комплексів природних факторів - висотно-кліматичного та схилово-лісового. Така структура є узгодженою з концептуальною архітектурою моделі оцінки зсувної

сприйнятливості та підтверджує доцільність комплексного врахування морфометричних, гідрологічних і лісових характеристик території.

Метод головних компонент (PCA) застосовано для оцінки структури взаємозв'язків між 14 просторовими предикторами та зменшення їхньої розмірності. Діаграма власних значень (рис. 4.16 а) показує, що перші дві головні компоненти мають власні значення 3,30 та 2,68 і пояснюють відповідно 23,6 % та 19,1 % загальної дисперсії. Разом вони акумулюють 42,7 % мінливості вихідних даних. Перші чотири компоненти пояснюють 59,9 % дисперсії, а п'ять компонент із власними значеннями понад одиницю 67,1 %.

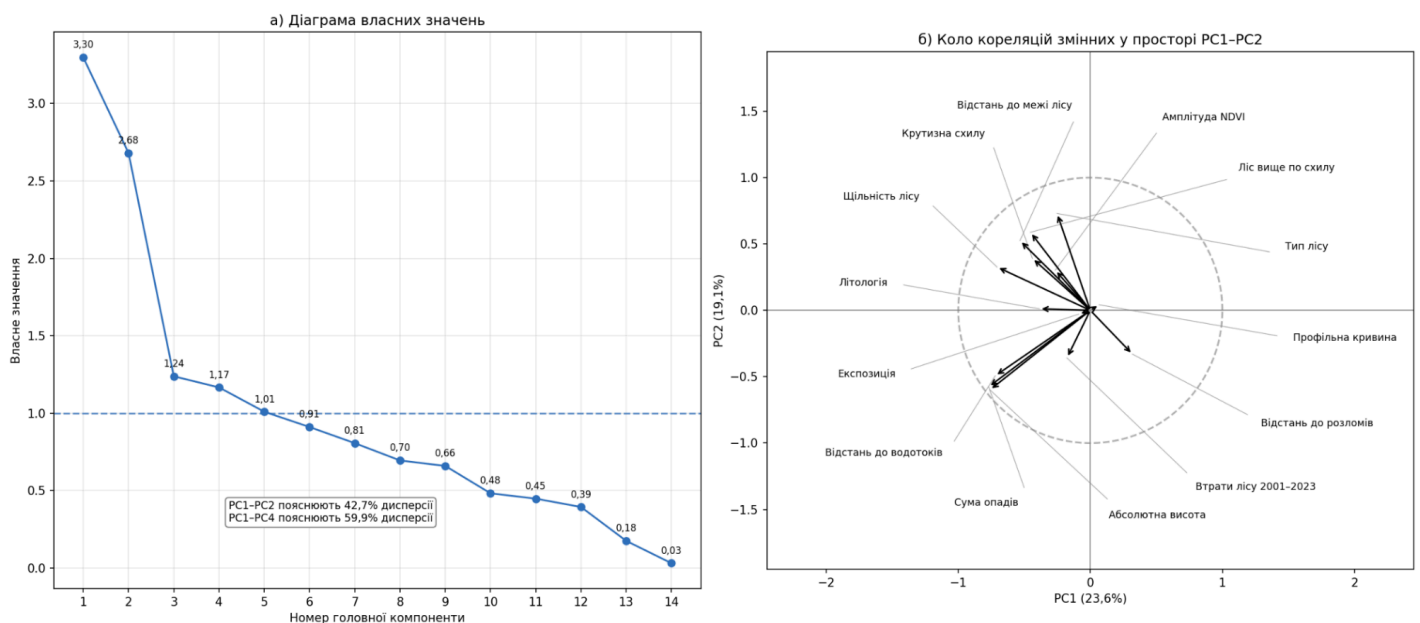


Рисунок 4.16 - Метод головних компонент (PCA): а) діаграма власних значень з порогом Кайзера; б) коло кореляцій змінних у просторі PC1-PC2

PC1 (23,6 % дисперсії; $\lambda = 3,30$) характеризує насамперед градієнт просторової структури ландшафту. Додатні навантаження мають змінні тип лісу, частка лісу вище по схилу, амплітуда NDVI, відстань до розломів, втрати лісу 2001–2023 та профільна кривизна. Від'ємні навантаження пов'язані із сумою опадів, відстанню до водотоків, експозицією, щільністю лісу, крутизною схилу та відстанню до межі лісу. Таким чином, перша компонента відображає перехід від

вологих, більш заліснених і топографічно складніших ділянок до територій із вищими значеннями структурних та антропогенних характеристик ландшафту.

PC2 (19,1 % дисперсії; $\lambda = 2,68$) описує переважно лісо-топографічний градієнт. Найбільші додатні навантаження мають амплітуда NDVI, частка лісу вище по схилу, відстань до межі лісу, крутизна схилу та щільність лісу. Натомість від’ємні навантаження спостерігаються для абсолютної висоти, втрат лісу 2001–2023, суми опадів і відстані до водотоків. Отже, друга компонента відображає контраст між лісистими схиловими умовами та висотними й кліматичними характеристиками території.

PC3 (8,9 % дисперсії; $\lambda = 1,24$) та PC4 (8,3 % дисперсії; $\lambda = 1,17$) мають істотно менший внесок у загальну дисперсію і на площині PC1–PC2 не відображаються. Їх можна інтерпретувати як другорядні градієнти, пов’язані з локальними особливостями рельєфу, експозиції та просторової структури лісового покриву.

Згідно з критерієм Кайзера, доцільно зберігати компоненти з власними значеннями $\lambda > 1$. У цьому випадку такими є п’ять перших компонент (3,30; 2,68; 1,24; 1,17; 1,01), що сумарно пояснюють близько 67,1 % дисперсії. Водночас на графіку власних значень після другої компоненти спостерігається виражений перегин кривої («scree»), що свідчить про домінування перших двох компонент. Тому для візуалізації структури взаємозв’язків між змінними достатньо використовувати площину PC1–PC2 (рис. 4.16 б), яка відображає 42,7 % загальної дисперсії та основні екологічні градієнти досліджуваної території.

З рис. 4.16 б випливає, що фактори “відстань до водотоків”, “сума опадів” та “абсолютна висота” є близькими за своїм змістом та потребують додаткового обґрунтування на предмет їхньої залученості до моделі. Підсумково, багатовимірний статистичний аналіз (K-means, кореляційний, EFA, PCA) підтверджує структурну узгодженість предикторів моделі зсувної сприйнятливості. EFA виокремив три латентні факторні блоки (висотно-кліматично-гідрографічний, схилово-лісовий, структурно-біофізичний), PCA підтвердив їхній внесок у загальну дисперсію (59,1–68,3 %), K-means

дозволив типізувати зсувні точки за поєднанням умов їхнього формування. Ці результати свідчать про змістову обґрунтованість архітектури моделі та її внутрішню узгодженість.

4.3.3 Random Forest Feature Importance для визначення вагових коефіцієнтів

Багатометодне оцінювання інформативності чинників, виконане на етапі їх відбору, узагальнено у вигляді осередненої важливості всіх 14 початкових предикторів (рис. 4.17); отримана ієрархія слугує орієнтиром для подальшого об'єктивного зважування підсумкових десяти чинників методом Random Forest.

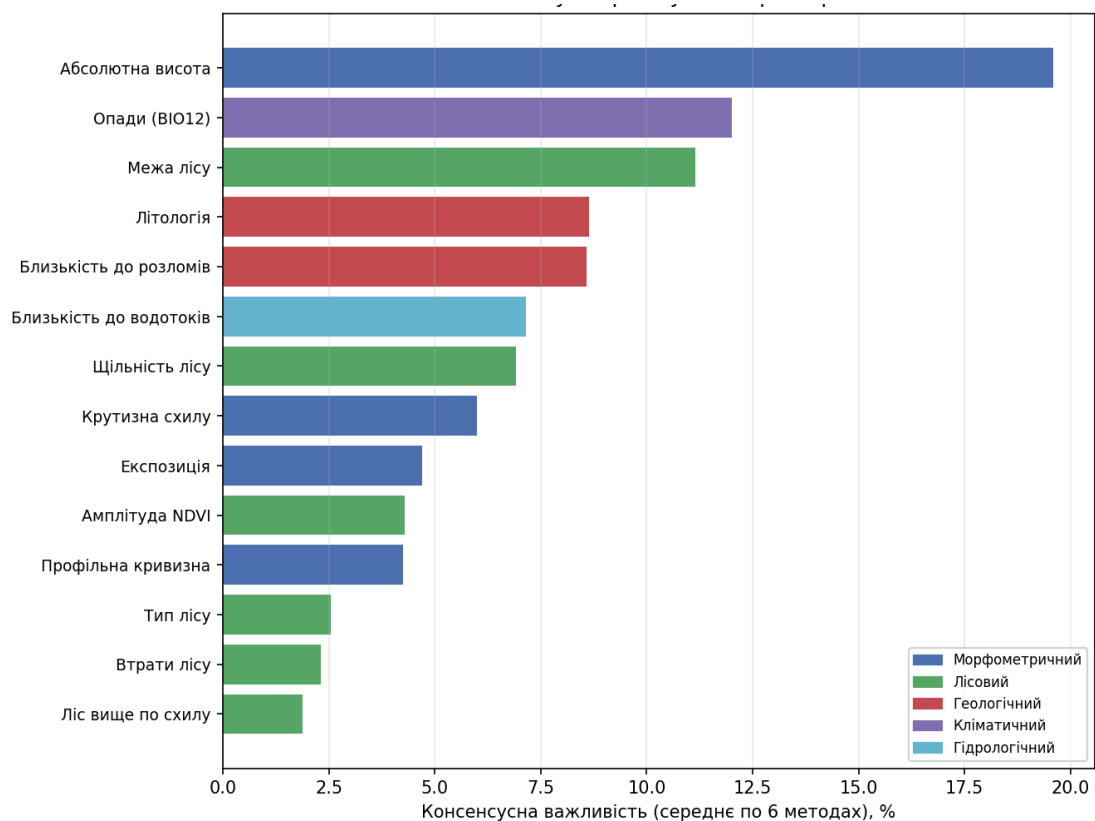


Рисунок 4.17 – Осереднена важливість 14 чинників за результатами усереднення рангів шести методів

Перенавчання моделі на 10 чинниках дало перерозподілені вагові коефіцієнти (табл. 4.6): сумарна вага морфометричної групи зросла до 49,7 %, лісової становила 25,9 %, геологічної - 14,2 %, гідрологічної - 10,3 %. Якісна

структура важливості при цьому збереглася (домінування морфометричних чинників, далі - лісові, геологічні та гідрологічні).

Таблиця 4.6 – Вагові коефіцієнти підсумкової моделі з 10 чинників

Чинник	Вага, %	Тематична група
Профільна кривина	13,41	морфометрична
Крутизна схилу	12,82	морфометрична
Експозиція	12,01	морфометрична
Абсолютна висота	11,42	морфометрична
Відстань до межі лісу	10,32	лісова
Відстань до водотоків	10,27	гідрологічна
Відстань до розломів	9,78	геологічна
Щільність лісу	8,73	лісова
Тип лісу	6,86	лісова
Літологія	4,39	геологічна

Для об'єктивного визначення вагових коефіцієнтів 10 факторів підсумкової моделі (таблиця 4.5) застосовано метод оцінки важливості факторів за алгоритмом випадкового лісу (англ. Random Forest Feature Importance; Breiman, 2001). Ансамбль випадкового лісу будується з RF_TREES = 300 дерев на основі збалансованої навчальної вибірки, що включає 135 точок присутності зсувів (train) та 159 контрольних точок незсувних ділянок (точок псевдо-відсутності), тобто 294 спостереження загалом. Цільова змінна - бінарна ознака «присутність/відсутність зсуву», предиктори - 10 FR-каліброваних факторних шарів.

Для навченого ансамблю обчислюються показники важливості кожного предиктора як середнє зменшення індексу Джині (Mean Decrease in Gini Impurity) по всіх деревах і вузлах ансамблю. Отримані важливості нормалізуються так, щоб їх сума дорівнювала одиниці, і трактуються як вагові коефіцієнти у формулі зваженої суми [38, 41]:

$$LSA_{proxy} = \sum_{i=1}^n w_i \times F_i^{RF} \quad (4.5)$$

де w_i - нормалізована вага i -го фактора; F_iRF - RF -калібрований i -й факторний шар; N - кількість факторів.

Результати RF Feature Importance для підсумкової 10-факторної моделі базового полігону наведено у таблиці 4.7 (у відсотках від суми) та на рис. 4.18.

Таблиця 4.7 - Розраховані вагові коефіцієнти для факторів моделі

Блок	Фактор	Сутність показника	Вага RF, %
Морфометричний	Профільна кривизна	Кривина поверхні вздовж лінії схилу; концентрація або розсіювання поверхневого стоку	13,4
Морфометричний	Крутизна схилу	Базова характеристика стійкості; нелінійний максимум на середньокрутих схилах	12,8
Морфометричний	Експозиція	Орієнтація схилу; проксі мікроклімату та зволоження	12,0
Морфометричний	Абсолютна висота	Інтегральний морфокліматичний градієнт	11,4
Гідрологічний	Відстань до водотоків	Руслова ерозія, концентрація стоку, перезволоження підніжжя схилів	10,3
Лісовий	Близькість до межі лісу	Крайові ефекти, контрастні умови стоку	10,3
Лісовий	Щільність лісу	Стабілізуючий вплив зімкнутого деревостану	8,7
Лісовий	Тип лісу	Породний склад: бук, ялиця, смерека, мішаний	6,9
Геологічний	Близькість до розломів	Тектонічний контроль тріщинуватості та водопроникності	9,8
Геологічний	Літологія	Тип флішу (переважання середньоритмічного флішу)	4,4

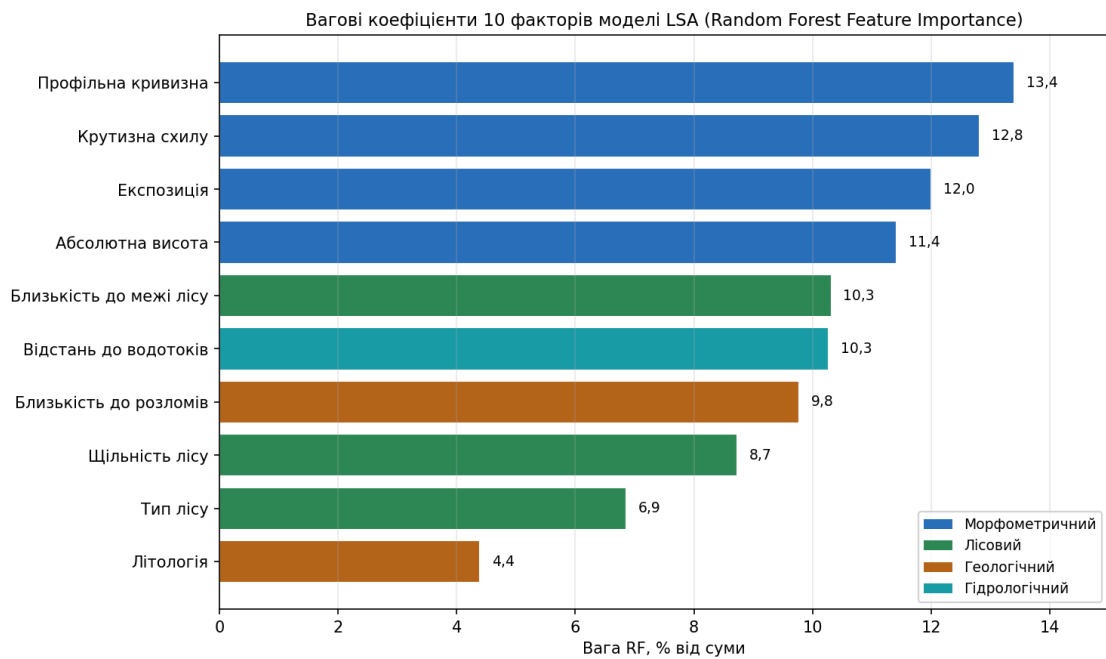


Рисунок 4.18 – Вагові коефіцієнти 10 факторів моделі LSA за методом Random Forest Feature Importance (середнє зменшення індексу Джині, % від суми), згруповані за чотирма тематичними блоками (візуалізація ваг таблиці 4.6)

Аналіз внесків окремих факторів свідчить про чітку ієрархічну структуру значущості предикторів, у якій тематичні блоки розподіляються нерівномірно. На відміну від початкового 14-факторного набору, у підсумковій моделі морфометричний блок став однозначно домінуючим, тоді як сумарна вага лісового блоку зменшилася внаслідок вилучення трьох його малоінформативних або нестійких складових (амплітуда NDVI, втрати лісу, ліс вище по схилу).

Морфометричний блок формує близько 49,7 % сумарного внеску й є найвагомим тематичним компонентом моделі. У його межах внески чотирьох змінних розподілені доволі рівномірно: профільна кривизна - близько 13,4 %, крутизна схилу - близько 12,8 %, експозиція - близько 12,0 % та абсолютна висота - близько 11,4 %. Зростання частки висоти порівняно з початковою моделлю пояснюється тим, що після вилучення колінеарного з нею чинника опадів абсолютна висота перебрала на себе спільний орографічний сигнал. Збалансованість цих чотирьох предикторів підтверджує, що гравітаційні передумови зсувної небезпеки формуються комплексно - через взаємодію нахилу й кривизни поверхні, орієнтації схилу та висотної зональності.

Гідрологічний блок представлений єдиним предиктором - відстанню до водотоків - і дає близько 10,3 % сумарного внеску. Цей фактор зберігає самостійну дискримінаційну здатність і відображає роль ерозійного підрізання схилів та зволоження прируслових ділянок як механізму активізації зсувних процесів.

Лісовий блок є другим за вагою тематичним компонентом моделі - його сумарний внесок становить близько 25,9 %. У підсумковій моделі він представлений трьома предикторами: близькістю до межі лісу - близько 10,3 %, щільністю лісового покриву - близько 8,7 % та типом лісу - близько 6,9 %. Навіть у скороченому складі лісовий блок дає близько чверті сумарної ваги, що емпірично підтверджує самостійну роль структури лісового покриву як фактора зсувної небезпеки в Карпатах. Водночас, на відміну від початкової 14-факторної моделі, лісовий блок уже не зрівнюється з морфометричним - після вилучення трьох лісових предикторів він поступається йому майже вдвічі.

Геологічний блок забезпечує близько 14,2 % сумарного внеску й об'єднує два предиктори - близькість до тектонічних розломів (близько 9,8 %) та літологію (близько 4,4 %). Вплив розломної тектоніки реалізується переважно опосередковано - через підвищену тріщинуватість порід і локальні зміни гідрогеологічних умов.

Кліматичний предиктор (середньорічна сума опадів) у підсумковій моделі не використовується - він був вилучений на етапі контролю мультиколінеарності через тісну кореляцію з абсолютною висотою ($r = 0,96$), оскільки в умовах гірського рельєфу обидва чинники відображають той самий орографічний градієнт зволоження. Після його вилучення максимальне значення VIF у наборі знизилося з понад 15 до менш ніж 3, а число обумовленості кореляційної матриці - з 9,2 до 3,3, що свідчить про відсутність мультиколінеарності у підсумковій моделі.

Виключення середньорічної суми опадів із підсумкової моделі спирається на два незалежні аргументи. Перший - статистичний: показник виявив тісну кореляцію з абсолютною висотою ($r = 0,96$) та високий коефіцієнт інфляції дисперсії ($VIF = 15,3$), тобто є надлишковим відносно висоти. Другий -

прогнозний: за просторово-блокової перехресної перевірки заміна висоти на опади знижує дискримінаційну здатність (AUC 0,705 проти 0,715), а одночасне включення обох чинників не дає статистично значущого приросту (0,722; у межах довірчого інтервалу) (рис. 6). Отже, опади не несуть інформації про просторовий розподіл зсувів понад ту, яку вже забезпечує абсолютна висота, і їх виключення не призводить до втрати прогнозної здатності.

Наведені вагові коефіцієнти є усередненими по ансамблю з 300 дерев. Точні ранги окремих предикторів є чутливими до повторної вибірки, що типово для оцінок RF-важливості на корельованих геоекологічних даних: за наявності залишкових зв'язків (зокрема абсолютна висота - відстань до водотоків, $r = 0,82$) алгоритм перерозподіляє важливість між спорідненими факторами. Натомість сумарні внески тематичних блоків (морфометричний $\approx 49,7\%$, лісовий $\approx 25,9\%$, геологічний $\approx 14,2\%$, гідрологічний $\approx 10,3\%$) залишаються стійкими, що узгоджується з результатами багатовимірного аналізу (PCA/EFA, підрозділ 4.3.3) та обґрунтовує інтерпретацію передусім на рівні блоків, а не окремих факторів.

4.3.4 Формування інтегральної карти LSA та її класифікація

На основі FR-каліброваних факторних шарів та вагових коефіцієнтів RF виконано розрахунок проміжного показника сприйнятливості (LSA_{proxu}) як зваженої суми 10 факторних шарів з наступним логістичним калібруванням для отримання фінального показника LSA.

Розподіл значень LSA_{proxu} у 236 зсувних точках базового полігону характеризується такими статистичними показниками: середнє значення 0,61, стандартне відхилення 0,10, пік у діапазоні 0,55–0,65 (рис. 4.19, а). Це свідчить про те, що зсувні точки концентруються у верхній частині шкали проміжного показника сприйнятливості, що підтверджує коректність FR-калібрування та RF-зважування.

Логістичне калібрування виконується за формулою

$$LSA = \frac{1}{1 + e^{-k(LSA_{proxu} - p_0)}} \quad (4.6)$$

де LSA_{proxy} - зважена сума каліброваних факторних шарів; p_0 - точка перегину логістичної функції, що дорівнює медіані LSA_{proxy} у навчальній вибірці; k - коефіцієнт крутизни, який визначається адаптивно за статистичним розподілом LSA_{proxy} ; e - основа натурального логарифма.

Параметр k у формулі калібрування є коефіцієнтом крутизни логістичного перетворення, заданим як $k = 8 / \text{IQR}$ (IQR - міжквартильний розмах) з обмеженням діапазоном [4; 14] для запобігання надмірно різкому (майже бінарному) калібруванню; оскільки міжквартильний розмах проксі-індексу сприйнятливості малий, нерегуляризоване значення k сягало $k \approx 60$, тому застосовано верхню межу 14. Слід підкреслити, що цей параметр впливає виключно на абсолютні значення каліброваної ймовірності, але не на класифікацію та не на показник AUC. Класи LSA визначаються квантилями каліброваного показника, а AUC є ранговою метрикою; оскільки логістичне перетворення монотонне, воно зберігає порядок значень. Емпірична перевірка підтверджує цю інваріантність. За варіювання k у межах від 4 до 60 показник AUC залишається незмінним (0,722), а просторовий розподіл класів LSA не змінюється. Отже, обмеження k верхньою межею не впливає ні на карту сприйнятливості, ні на її валідацію, і трактування обмеженого розв'язку як неоптимального є некоректним.

Після логістичного калібрування розподіл LSA у 236 точках має середнє значення 0,48 і стандартне відхилення 0,25, з більш рівномірним покриттям діапазону [0; 1] порівняно з LSA_{proxy} . Це забезпечує кращу здатність моделі розрізняти рівні зсувної сприйнятливості.

Класифікація LSA на п'ять класів зсувної сприйнятливості виконується квантильним методом: 5 класів з межами на 20-му, 40-му, 60-му і 80-му перцентилях розподілу LSA у ROI. Класи інтерпретуються як:

- клас 1 (дуже низька сприйнятливість): $LSA < p_{20}$;
- клас 2 (низька): $p_{20} \leq LSA < p_{40}$;
- клас 3 (середня): $p_{40} \leq LSA < p_{60}$;

- клас 4 (висока): $p60 \leq LSA < p80$;
- клас 5 (дуже висока): $LSA \geq p80$.

Розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за п'ятьма класами LSA такий: клас 1 - 8 проявів (3,4 %); клас 2 - 25 (10,6 %); клас 3 - 27 (11,4 %); клас 4 - 54 (22,9 %); клас 5 - 122 (51,7 %). Класи 4–5 (висока та дуже висока сприйнятливість) охоплюють 176 зсувних проявів, що становить 74,6 % від загальної кількості. Цей результат підтверджує високу прогностну здатність моделі: абсолютна більшість задокументованих зсувних проявів потрапляє у класи з високими значеннями LSA.

Просторовий розподіл класів LSA по території базового полігону (рис. 4.19) показує, що 40,2 % території відноситься до класів 4–5 (висока та дуже висока сприйнятливість).

Інтегральні показники зсувної сприйнятливості

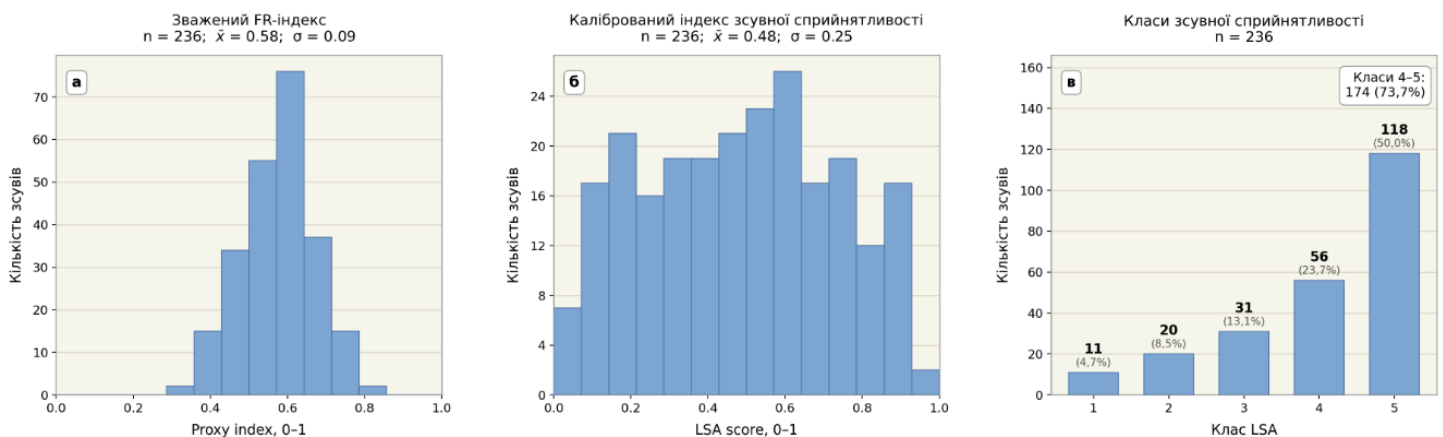


Рисунок 4.19 - Розподіл 236 зсувних проявів базового полігону за інтегральними показниками моделі: а) зважений *FR-індекс* (проміжний показник сприйнятливості); б) калібрований індекс *LSA*; в) п'ять класів зсувної сприйнятливості

Класи високої сприйнятливості приурочені до крутих схилів долинних систем головних водотоків та до прикорайових зон лісових масивів. Класи низької сприйнятливості переважають у центральних частинах зімкнутих лісових масивів та у пологих днищах долин.

4.4 Прогнозна оцінка ймовірності зсувної сприйнятливості

Оцінка прогнозної здатності розробленої моделі LSA є ключовим етапом, що дозволяє кількісно верифікувати її практичну придатність для регіональних прогнозів зсувної небезпеки. У цьому підрозділі представлено результати валідації моделі на незалежній тестовій вибірці, аналізу коефіцієнтів просторового збагачення, оцінки просторової точності та перенесення моделі на контрольний полігон Івано-Франківської області.

На додаток до моделі зваженої суми (Frequency Ratio з вагами Random Forest) побудовано повноцінну нелінійну прогнозну модель Random Forest, яка безпосередньо враховує нелінійні залежності та взаємодії між факторами. На незалежній тестовій вибірці вона дає $AUC = 0,73$, тоді як модель зваженої суми - $AUC = 0,685$. За тестом ДеЛонга різниця між моделями статистично незначуща ($p = 0,22$) (рис. 4.20). Графіки часткової залежності підтверджують наявність нелінійних ефектів і взаємодій між предикторами (рис. 4.21). Оскільки повноцінна Random Forest не забезпечує статистично значущого приросту прогнозної здатності, а зважена сума є повністю інтерпретованою та обчислювально простою, як підсумкову обрано саме модель зваженої суми з вагами Random Forest, а нелінійну модель наведено як контрольну, що обґрунтовує доцільність підходу моделі зваженої суми каліброваних факторів за Frequency Ratio з вагами Random Forest.

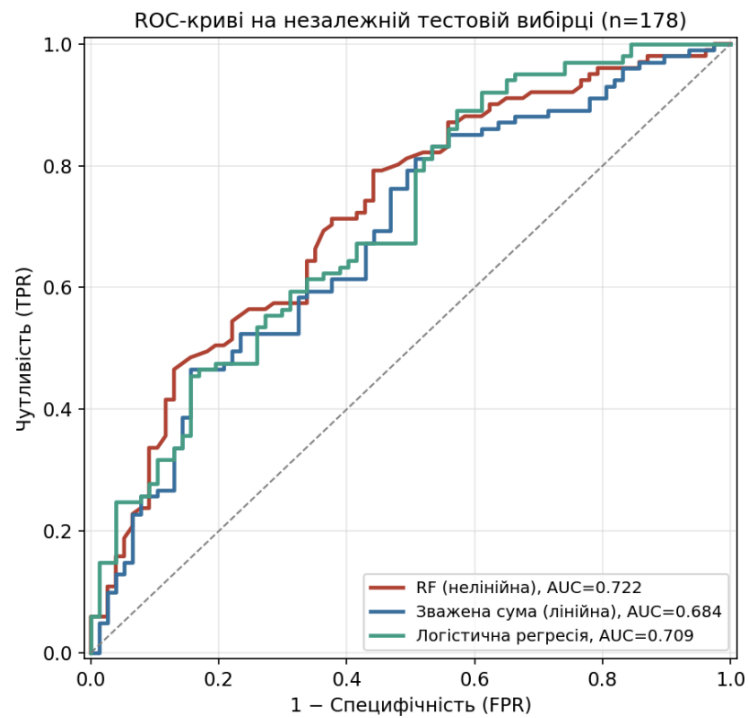


Рисунок 4.20 - ROC-криві: повноцінна Random Forest проти лінійної зваженої суми (тестова вибірка).

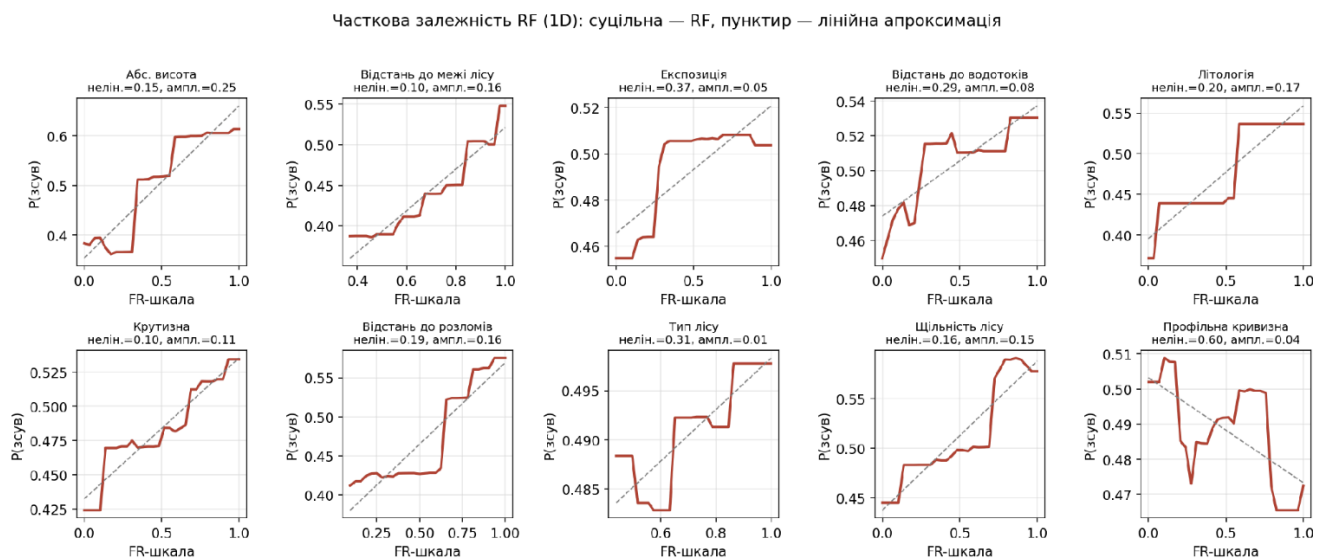


Рисунок 4.21 - Графіки часткової залежності (PDP): нелінійні ефекти предикторів.

Для тестової вибірки побудовано матриці помилок за різними порогами віднесення території до небезпечної - для класів сприйнятливості ≥ 2 , ≥ 3 , ≥ 4 та ≥ 5 , що дає змогу оцінити кількість пропущених небезпечних ділянок

(хибнонегативних) та хибно віднесених до небезпечних (хибнопозитивних) для кожного порогу. Оптимальним за компромісом між повнотою та точністю є поріг «клас ≥ 4 »: він забезпечує найвищі значення F1-міри (0,65) і каппи (0,28), виявляючи 77 зі 101 тестового зсуву (повнота 76 %) за 38 хибнопозитивних спрацювань. Загалом 76 % тестових зсувів потрапляють у два найвищі класи сприйнятливості (4–5), що підтверджує прикладну придатність карти.

Інтерпретація рівня AUC та стійкість оцінки. Показник $AUC = 0,69$ відповідає одиничному просторовому поділу 70/30, чутливому до випадковості формування тестової вибірки (95 % бутстреп-довірчий інтервал - 0,61–0,76). За повторної п'ятиблокової перехресної перевірки на всьому масиві даних середній AUC становить 0,72 (Random Forest) - 0,74 (логістична регресія), тобто одиничний поділ дещо знижує оцінку.

Оцінку отримано за строгої просторово-блокової валідації, яка унеможливорює «витік» інформації між просторово близькими навчальними й тестовими точками (Brenning, 2005; Roberts et al., 2017). Для перевірки впливу цього чинника AUC обчислено двома способами на тих самих даних - за випадкової перехресної перевірки - 0,73 (RF) / 0,76 (логістична) та за просторово-блокової - 0,72 / 0,74. Незначна різниця (близько 0,015) свідчить про відсутність завищення показника за рахунок просторової автокореляції та про стійку генералізацію моделі.

Навіть за нестрокої випадкової перехресної перевірки AUC для наявних даних не перевищує приблизно 0,73–0,76, що зумовлено не методикою валідації, а об'єктивними чинниками - морфологічною однорідністю гірської залісненої території, обмеженим обсягом і невисокою точністю точок зсувів, регіональним масштабом аналізу та консервативною схемою генерування псевдо-відсутностей. За шкалою Hosmer–Lemeshow значення в межах 0,7–0,8 відповідають прийнятній дискримінаційній здатності, а концентрація 76 % тестових зсувів у двох найвищих класах підтверджує прикладну придатність карти.

4.4.1 Валідація моделі на незалежній тестовій вибірці

Валідація моделі на тестовій вибірці (101 зсувний прояв, що не використовувалися при тренуванні моделі) є стандартною процедурою оцінки прогнозної здатності. Для кожного тестового зсувного прояву визначається клас LSA, і будується розподіл тестових-точок за п'ятьма класами.

Результати валідації для базового полігону показують такий розподіл 101 тестові-точки за класами LSA:

- клас 1 (дуже низька): 3 точки (3,0 %);
- клас 2 (низька): 9 точок (8,9 %);
- клас 3 (середня): 10 точок (9,9 %);
- клас 4 (висока): 27 точок (26,7 %);
- клас 5 (дуже висока): 52 точки (51,5 %).

Сумарна частка тестових-точок у класах 3–5 (середня, висока, дуже висока сприйнятливість) становить 88,1 % (89 зі 101 точки). Сумарна частка у класах 4–5 (тільки висока та дуже висока сприйнятливість) - 78,2 % (79 зі 101 точки). Ці показники свідчать про переконливу прогнозну здатність моделі - абсолютна більшість незалежних тестових зсувів потрапляє у класи з підвищеною зсувною сприйнятливістю, що відповідає очікуванням.

Для кількісної оцінки якості моделі також обчислюються коефіцієнти просторового збагачення (Enrichment Ratio) - відношення частки тестових-точок у класі до частки території цього класу. Ідеальна модель має максимальні значення збагачення у класі 5 і мінімальні в класі 1.

Для базового полігону коефіцієнти збагачення мають такі значення:

- клас 1: $EN = 0,15$ (значно нижче 1, що правильно);
- клас 2: $EN = 0,46$;
- клас 3: $EN = 0,50$;
- клас 4: $EN = 1,32$ (значне збагачення);
- клас 5: $EN = 2,57$ (дуже значне збагачення).

Коефіцієнти EN для класів 4 і 5 ($>1,2$) підтверджують, що модель коректно ідентифікує зони підвищеної зсувної сприйнятливості. Особливо показовим є значення $EN = 2,57$ для класу 5, що означає: у зонах, класифікованих як «дуже висока сприйнятливість», зсуви спостерігаються у 2,6 рази частіше, ніж очікувалося б при випадковому просторовому розподілі. Монотонне зростання EN від класу 1 (0,15) до класу 5 (2,57) додатково підтверджує дискримінаційну здатність моделі.

4.4.2 ROC-аналіз та площа під кривою (AUC)

Для додаткової кількісної оцінки якості моделі виконано ROC-аналіз (Receiver Operating Characteristic) за двома кривими - кривою успішності і кривою прогнозу (рис. 4.22). ROC-крива відображає співвідношення частки істинно позитивних ідентифікацій (TPR) і частки хибно позитивних ідентифікацій (FPR) при варіюванні порогу LSA.

Для базового полігону отримано значення AUC для кривої успішності (повна вибірка) = 0,72, а для кривої прогнозу (незалежна тестова вибірка) = 0,69. За загальноприйнятою шкалою інтерпретації [119, 143] значення AUC:

- 0,50–0,60 - незадовільна якість;
- 0,60–0,70 - задовільна якість;
- 0,70–0,80 - добра якість;
- 0,80–0,90 - дуже добра якість;
- 0,90–1,00 - відмінна якість.

Значення AUC для кривої успішності = 0,72 відповідає категорії «добра якість», тоді як консервативніша крива прогнозу має значення $AUC = 0,69$ (незалежна тестова вибірка) і відповідає категорії «задовільна якість». Нижче значення за кривою прогнозу є очікуваним і свідчить про відсутність переоцінки, завдяки застосуванню строгої просторово-блокової крос-валідації, що запобігає просторовому витоку інформації між навчальною і тестовою вибірками; за результатами міжнародних оглядів [40, 41, 61] саме цей тип валідації

систематично занижує оцінку AUC порівняно з випадковим поділом точок, проте надає більш реалістичну характеристику узагальнюваності моделі.

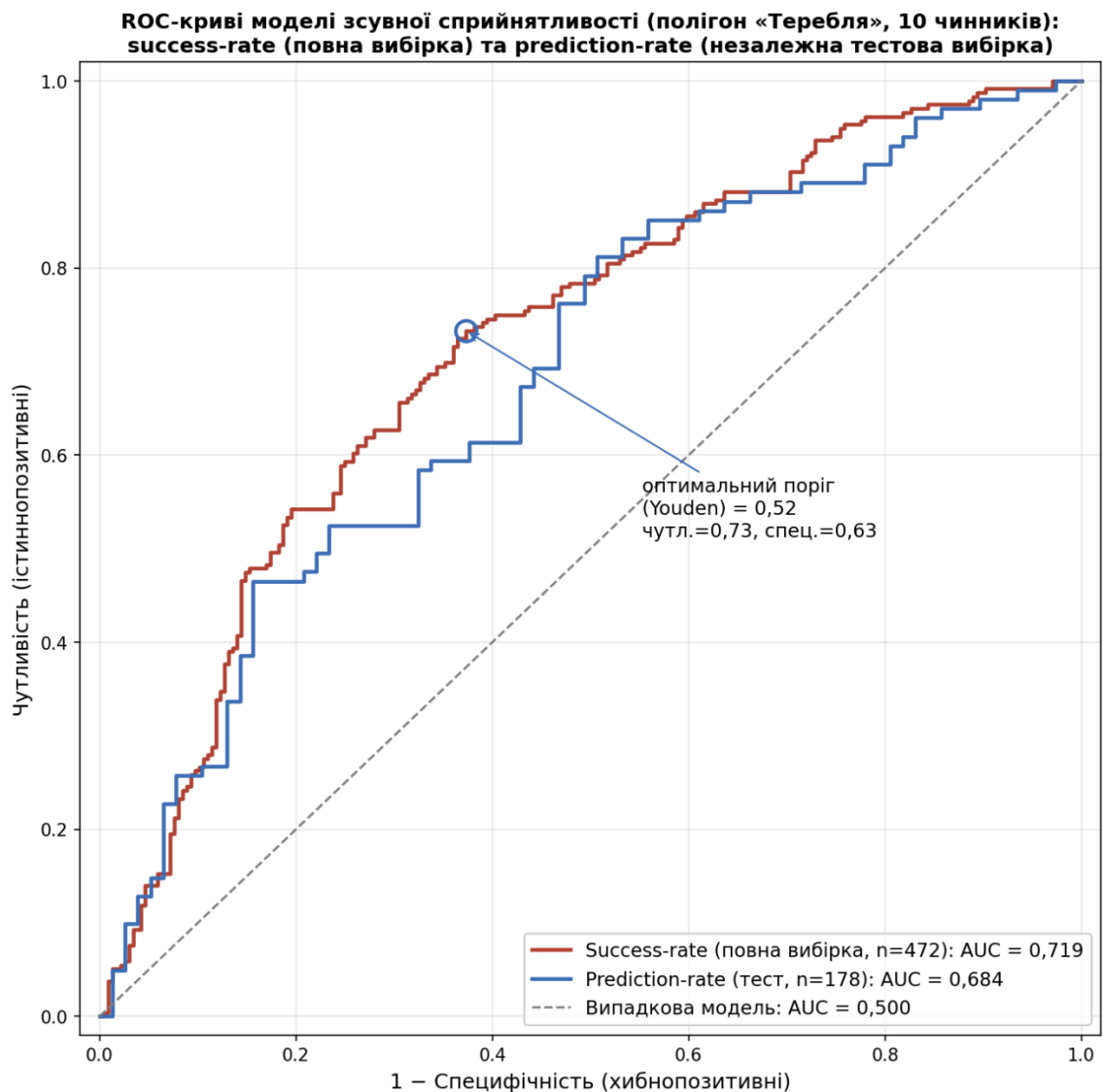


Рисунок 4.22 - ROC-криві моделі LSA для базового полігону: крива успішності (повна вибірка, AUC = 0,72) та крива прогнозу (незалежна тестова вибірка, AUC = 0,69)

Для тестової вибірки базового полігону (101 зсувний прояв і 77 точок псевдо-відсутності) побудовано матрицю помилок гібридної моделі LSA за кількома пороговими значеннями (рис. 4.23).

Матриця помилок гібридної LSA-моделі
(тест: 101 зсув + 77 відсутностей; поріг Youden = 0.25)

Факт: зсув	TP = 81 (зсув вловлено)	FN = 20 (зсув ПРОПУЩЕНО)
Факт: безпечно	FP = 34 (хибна тривога)	TN = 43 (безпечно, вірно)
	Прогноз: небезпечно	Прогноз: безпечно

Recall (чутливість) = 0.80 Precision = 0.70 F1 = 0.75
 Specificity = 0.56 Accuracy = 0.70
 Пропущено небезпечних (FN): 20% | Хибна тривога (FP): 44%

Рисунок 4.23 - Матриця помилок моделі LSA на тестовій вибірці за порогом індексу Юдена (0,246): TP = 81, FN = 20, FP = 34, TN = 43

За оптимальним порогом, визначеним за індексом Юдена (0,246), модель дає такі результати на тестовій вибірці: 81 істинно-позитивний, 20 хибно-негативних, 34 хибно-позитивних і 43 істинно-негативних результати. Це відповідає повноті 0,80, влучності 0,70 та F1-мірі 0,75.

Вибір порога класифікації залежить від призначення карти. За порогом «клас ≥ 4 » повнота становить 0,78, а за порогом «клас ≥ 3 » зростає до 0,88 - модель пропускає лише 12 % зсувів. Натомість симетричний поріг 0,5 пропускає понад половину зсувних проявів (52 хибно-негативні результати) і для задач безпеки непридатний.

Такий вибір зумовлений різною ціною двох типів помилок. Хибно-негативний результат - це пропущена небезпечна зона, що несе ризик для

життя людей та інфраструктури; хибно-позитивний - лише економічні витрати на надлишкові запобіжні заходи. З огляду на цю асиметрію для практичного застосування доцільним є нижчий поріг класифікації, орієнтований на максимізацію повноти, тобто на мінімізацію пропущених зсувонебезпечних ділянок.

Окрім інтегрального показника AUC, ефективність моделі схарактеризовано повним набором метрик класифікації на незалежній тестовій вибірці (101 зсувний прояв і 77 точок псевдо-відсутності). Для класифікатора Random Forest, побудованого безпосередньо на факторних шарах, отримано $AUC = 0,73$, точність (Accuracy) = 0,67, F1-міру = 0,72, влучність (Precision) = 0,69, повноту (Recall) = 0,75 та коефіцієнт каппа Коена = 0,32. Порівняння площ під ROC-кривими гібридної моделі та повного RF-класифікатора методом бутстрепа (5000 ітерацій) показало, що різниця між ними є статистично незначущою. Цей результат підтверджує наведений вище висновок щодо вибору підсумкової моделі. Рівень значущості для всіх статистичних перевірок прийнято $\alpha = 0,05$.

4.4.3 Перевірка моделі на другому (контрольному) полігоні (Верховина)

Для перевірки узагальнюваності розробленої моделі LSA виконано її застосування на другому контрольному полігоні - прямокутній ділянці розміром приблизно 25×25 км ($647,9$ км²) у Верховинському районі Івано-Франківської області з координатами $24,70^{\circ}$ – $25,04^{\circ}$ сх. д. та $48,06^{\circ}$ – $48,29^{\circ}$ пн. ш. (верхів'я басейну Чорного та Білого Черемошу, Покутсько-Буковинські Карпати). Контрольний полігон обрано через його фізико-географічну та геологічну відмінність від базового: він розташований східніше, в іншому орографічному районі Карпатської системи, має значно складнішу геологічну будову (шість літологічних формацій проти трьох у базовому полігоні) та іншу інвентаризацію зсувних проявів - 190 задокументованих зсувів (порівняно з 236 у Колочаві).

Розроблено окремий скрипт який повністю успадковує архітектуру базового сценарію (10 факторних шарів, FR-калібрування, RF Feature Importance, логістичне калібрування LSA з квантильною класифікацією на 5 класів).

Територію досліджень обмежено географічними координатами 24,70°-25,04° сх. д. та 48,06°-48,29° пн. ш., використано набори геопросторових даних щодо зсувів, літології та розломів, сформовані спеціально для Верховинського полігону. Поділ даних здійснено за просторово-блоковим принципом (7 із 10 груп блоків віднесено до навчальної вибірки) із початковим значенням (seed) 20260323 з розміром просторового блоку прийнято рівним 3000 м. Решта параметрів моделі, а саме параметри Random forest (кількість дерев у випадковому лісі - 300), кількість інтервалів калібрування у методі Frequency Ratio - 10, буферна зона для точок псевдовідсутності - 150 м) ідентичні показникам базового полігону, що забезпечує методологічну порівнянність результатів.

У консолі GEE 190 зсувних проявів у межах території поділено на 136 навчальних (71,6 %) та 54 тестових (28,4 %) точок, сформовано вибірку зі 190 точок псевдовідсутності (що відповідає співвідношенню 1:1 до кількості задокументованих зсувних проявів). Літологічний шар містить шість унікальних типів формацій - глинистого флішу, олігостромова і дикого флішу, піщано-глинистого флішу, піщаного флішу, строкаті фліші, флішоїдна. На території домінує тип літологічної зони «Піщано-глинистого флішу» (64,3 % території, 57,4 % навчальних зсувів). Тектонічний шар представлений 33 лінійними розломами п'яти типологічних груп (зокрема «розломи II-III порядку, що виходять на поверхню», «крупні скиби»). Калібровані параметри логістичного перетворення для Верховини: $p_0 = 0,638$ (медіана LSA_проху у навчальних зсувах, близька до рівня базового полігону); $IQR = 0,151$; $k = 14$ (досягає верхньої межі діапазону [4; 14]). Розподіл RF Feature Importance (нормалізований) для підсумкових 10 факторів: профільна кривизна - 13,2 %, експозиція - 12,9 %, крутизна схилу - 12,2 %, абсолютна висота - 11,9 %, близькість до розломів - 11,1 %, близькість до водотоків - 10,9 %, щільність лісу - 8,2 %, межа лісу - 7,3 %, літологія - 7,0 %, тип лісу - 5,1 %. Сумарні внески тематичних блоків: морфометричний - 50,3 %, лісовий - 20,6 %, геологічний - 18,2 %, гідрологічний - 10,9 %. Порівняння з базовим полігоном (Колочава: морфометричний 49,7 %, лісовий 25,9 %, геологічний 14,2 %, гідрологічний 10,3 %) демонструє високу

структурну подібність: на обох полігонах морфометричний блок є однозначно домінуючим (близько 50 %), а лісовий - другим за вагою (20,6 % проти 25,9 %), що підтверджує самостійну, але підпорядковану морфометрії роль структури лісового покриття у формуванні зсувної небезпеки.

Розподіл 190 задокументованих зсувних проявів Верховинського полігону за п'ятьма класами LSA склав є таким. Клас 1 - 7 зсувів (3,7 %), клас 2 - 22 (11,6 %), клас 3 - 41 (21,6 %), клас 4 - 54 (28,4 %), клас 5 - 66 (34,7 %). Сумарна частка зсувних проявів у класах 4–5 - 63,2 %, у класах 3–5 - 84,7 %. На незалежній тестовій вибірці (54 точки) отримано такий розподіл: клас 1 - 9,3 %, клас 2 - 11,1 %, клас 3 - 24,1 %, клас 4 - 24,1 %, клас 5 - 31,5 % тестових-зсувів. Коефіцієнти збагачення (enrichment ratio) становлять: клас 1 = 0,47; клас 2 = 0,54; клас 3 = 1,21; клас 4 = 1,20; клас 5 = 1,57. У класах 3–5 локалізовано 79,6 % незалежних тестових зсувів за площі 60,0 %, у класах 4–5 - 55,6 % зсувів за площі 40,1 %. Криві успішності та прогнозу (за просторово-блокового поділу вибірки, як і на базовому полігоні) дали значення AUC 0,70 і 0,61 відповідно: модель добре описує навчальну вибірку (на рівні базового полігону - 0,72), а її прогностична здатність на незалежній вибірці є прийнятною (0,61) і лише дещо поступається базовій (0,69), помітно перевищуючи рівень випадкового вгадування (0,50). Це узгоджується з переважно монотонним зростанням коефіцієнтів збагачення до класів високої сприйнятливості й підтверджує задовільну просторову переносимість моделі на Верховинський полігон. Для фінальної карти індексу природоохоронного пріоритету показники такі. У класах 3–5 локалізовано 74,1 % тестових-зсувів за площі 60,2 %, а у класах 4–5 - 48,1 % за площі 40,7 %. Максимум коефіцієнта збагачення припадає на клас 3 (1,33). Зведена кількісна порівняльна характеристика двох полігонів за параметрами моделі та результатами валідації наведена у табл. 4.8. Просторове порівняння каліброваних карт LSA для обох полігонів наведено на рис. 4.24.

Таблиця 4.8 – Порівняльна характеристика базового («Теребля») та контрольного («Верховина») полігонів дослідження за параметрами моделі LSA та результатами валідації

Показник	Базовий полігон «Теребля» (Закарпаття)	Контрольний додатковий полігон «Верховина» (Прикарпаття)
Площа полігону, км ²	625 (25 × 25 км)	647,9 (~25 × 25 км)
Координати ROI	23,55°–23,89° сх. д.; 48,30°–48,53° пн. ш.	24,70°–25,04° сх. д.; 48,06°–48,29° пн. ш.
UTM-проекція	EPSG:32634 (UTM 34N)	EPSG:32635 (UTM 35N)
К-сть зсувних проявів	236	190
Поділ навчальні/тестові	135 / 101 (57 % / 43 %)	136 / 54 (71,6 % / 28,4 %)
Псевдо-відсутність	236 (159 навчальні / 77 тестові)	190
К-сть літологічних класів	3 (Глинистого, Піщано-глинистого, Піщаного флішу)	6 (Глинистого, Олігостромово, Піщано-глинистого, Піщаного, Строкати, Флішоїдна)
К-сть тектонічних розломів	-	33 (5 типологічних груп)
Калібровані параметри: p ₀	0,61	0,638
Калібровані параметри: IQR	0,15	0,151
Калібровані параметри: k	14	14
Топ-1 фактор за RF importance	Профільна кривизна (13,4 %)	Профільна кривизна (13,2 %)
Вага морфометричного блоку	49,7 %	50,3 %
Вага лісового блоку	25,9 %	20,6 %
Вага геологічного блоку	14,2 %	18,2 %
Вага гідрологічного блоку	10,3 %	10,9 %
Тестових-зсувів у класах 3–5	88,1 %	79,6 %
Тестових-зсувів у класах 4–5	78,2 %	55,6 %
Enrichment, клас 5	2,57	1,57
AUC (успішність / прогноз)	0,72 / 0,69 (добра якість)	0,70 / 0,61

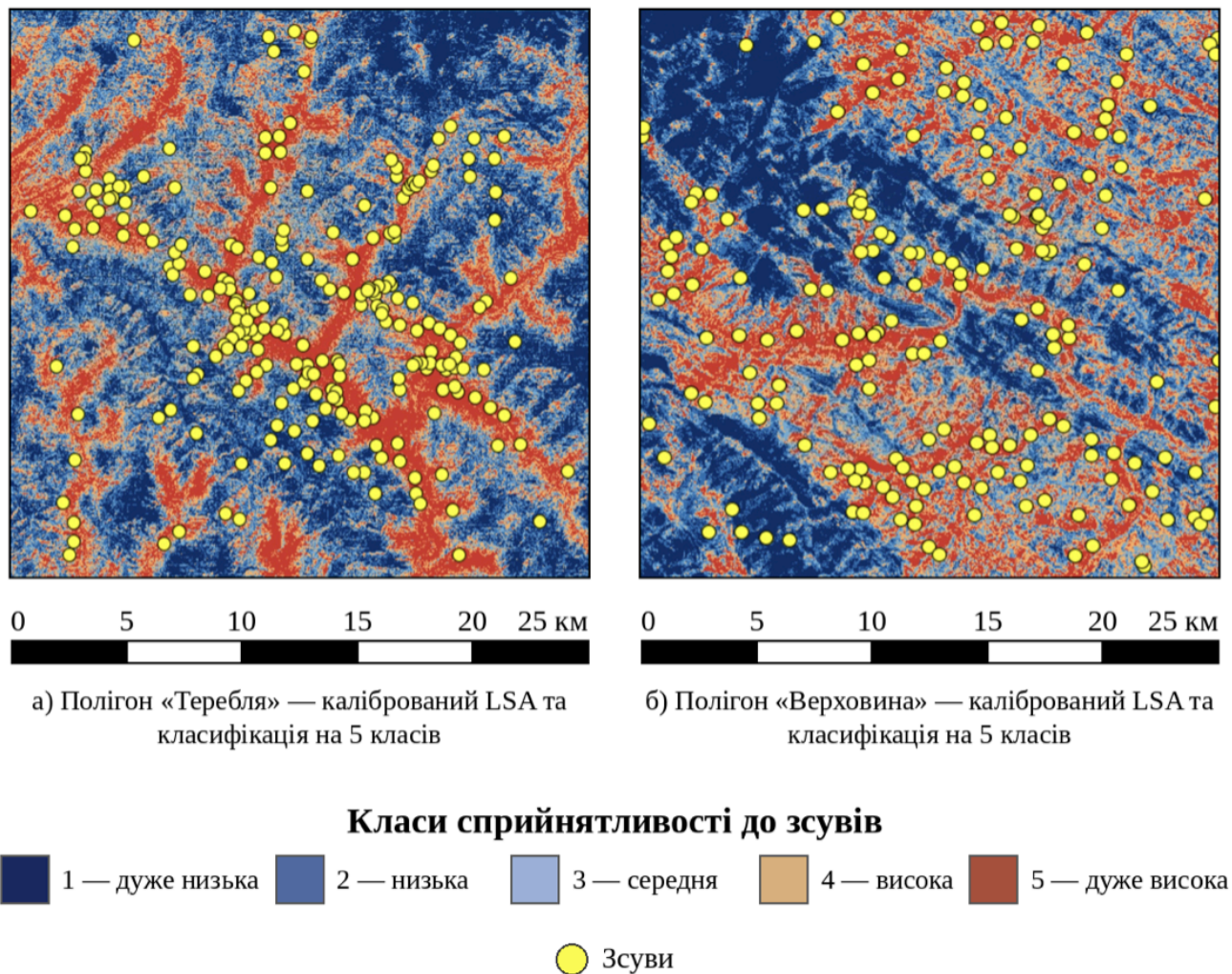


Рисунок 4.24 - Порівняння каліброваних карт зсувної сприйнятливості (LSA) з квантильною класифікацією на п'ять класів для двох полігонів дослідження: а) базовий полігон «Теребля»; б) контрольний полігон «Верховина». Класи: 1 - дуже низька, 2 - низька, 3 - середня, 4 - висока, 5 - дуже висока сприйнятливість

Отримані показники якості перенесення моделі на контрольний полігон є дещо нижчими, ніж для базового (Колочава: 88,1 % тестових-зсувів у класах 3–5, 78,2 % - у класах 4–5), однак залишаються інформативними та підтверджують узагальнюваність моделі: клас 5 для Верховини демонструє найвищий коефіцієнт збагачення (1,57), що свідчить про здатність моделі коректно ідентифікувати зони підвищеної сприйнятливості. Сума зсувних проявів у трьох верхніх класах

перевищує очікувану випадкову частку у 1,33 раза. Менш чітке розділення між класами 3 та 4 (порівняно з базовим полігоном) пояснюється більшою геологічною різноманітністю Верховини (шість літологічних класів проти трьох у Колочаві) та її положенням у Покутсько-Буковинських Карпатах з відмінним характером тектоніки та орографії, до яких модель не була спеціально пристосована. Розроблена методологія LSA на основі FR + RF успішно переноситься на інший район Українських Карпат, проте для підвищення просторової прогностичної здатності доцільно розглянути та статистично обґрунтувати вплив факторів розвитку зсувних процесів для умов району, що розглядається.

4.4.4 Просторова інтерпретація карти LSA та практичне значення

Карта LSA базового полігону дає можливість виявити такі просторові закономірності зсувної сприйнятливості у верхів'ях р. Теребля:

Зони дуже високої сприйнятливості (клас 5) приурочені переважно до: долинних систем головних водотоків (р. Теребля, Мокрянка, Брустурянка) з активними ерозійними процесами; прикрайових зон лісу з порушеннями лісового покриву; схилів крутизною 25–40° на середньоритмічних флішових товщах; зон поблизу тектонічних розломів північно-західного простягання.

Зони високої сприйнятливості (клас 4) розташовані навколо зон дуже високої сприйнятливості та характеризуються тими ж основними чинниками, але у менш вираженому поєднанні.

Зони середньої сприйнятливості (клас 3) охоплюють перехідні території з помірним поєднанням факторних умов.

Зони низької та дуже низької сприйнятливості (класи 1–2) переважають у: центральних частинах зімкнутих лісових масивів з високою щільністю деревостану; на вершинах хребтів з відносно рівним рельєфом; у днищах широких долин.

Отримана карта має безпосереднє практичне значення і може бути використана для пріоритизації моніторингу зсувонебезпечних територій,

планування лісогосподарських заходів, обґрунтування рішень із територіального планування (регулювання будівництва у зонах підвищеного ризику), оптимізації розміщення станцій моніторингу (GNSS-приймачів, метеостанцій), розробки стратегій адаптації до кліматичних змін у контексті очікуваного посилення зсувної активності.

4.4.5 Обмеження моделі та напрями її вдосконалення

Розроблена модель LSA має низку обмежень, які необхідно враховувати при її використанні та які окреслюють напрями подальших удосконалень.

По-перше, модель характеризує просторову компоненту зсувної небезпеки (сприйнятливість), без явного врахування часової компоненти. Для повноцінної оцінки зсувної небезпеки необхідне доповнення моделі часовою компонентою, що враховує опадові пороги активізації та кумулятивні опадові історії. Це може бути реалізовано в майбутніх дослідженнях через включення кліматичних даних CHIRPS, GPM IMERG.

По-друге, модель калібрована на даних кадастру зсувних проявів ДНВП «Геоінформ України», повнота і точність якого можуть мати регіональні та часові обмеження. Поліпшення моделі можливе через уточнення кадастру на основі сучасних супутникових даних (Sentinel-1 SAR-інтерферометрія, оптичне виявлення нових зсувів за Sentinel-2).

По-третє, модель не враховує явно антропогенні чинники зсувної активізації (лісові дороги, будівельні роботи, рекреаційне навантаження), крім тих, що опосередковано включені через показник втрат лісу. Майбутні вдосконалення можуть включати додаткові просторові шари антропогенних впливів.

По-четверте, модель використовує статичні характеристики лісового покриву на один момент часу (з урахуванням агрегованої динаміки 2001–2023 рр.). Просторово-часове моделювання з урахуванням щорічних змін стану лісу є перспективним напрямом, що дозволить відстежувати еволюцію зсувної небезпеки у часі.

По-п'яте, валідація моделі виконана на двох полігонах у межах Українських Карпат. Для більш широкої перевірки узагальнюваності підходу необхідне його застосування до інших гірських районів (Кримські гори, Вулканічний хребет Карпат), що може бути предметом майбутніх досліджень.

Попри зазначені обмеження, розроблена модель LSA є працездатним і методично обґрунтованим інструментом для регіональної оцінки зсувної сприйнятливості у гірських районах Українських Карпат з комплексним урахуванням лісового фактора як самостійного структурного блоку. Результати прогнозової оцінки (88,1 % тестових-точок у класах 3–5, AUC = 0,72 (успішність) / 0,69 (прогноз), задовільне перенесення на контрольний полігон) підтверджують практичну придатність моделі для завдань геоecологічного оцінювання і територіального планування.

Висновки до розділу 4

За результатами розробки та апробації геоінформаційної моделі зсувної сприйнятливості території Українських Карпат з комплексним урахуванням лісового фактора сформульовано такі висновки.

1. Розроблено гібридну індексну модель зсувної сприйнятливості LSA, що поєднує статистичний метод Frequency Ratio (для калібрування факторних шарів) з алгоритмом машинного навчання Random Forest Feature Importance (для об'єктивного визначення вагових коефіцієнтів). Повний цикл обчислень реалізовано на хмарній платформі геопросторового моделювання Google Earth Engine, що забезпечує повну відтворюваність та масштабованість підходу. Модель складається з 10 послідовних алгоритмічних кроків - від просторово-блокового поділу вибірки до формування фінальної карти LSA.

2. Розглянуто систему з чотирнадцяти факторних характеристик моделі, об'єднаних у п'ять тематичних блоків - морфометричний (4 фактори), гідрологічний (1), лісовий (6), геологічний (2), кліматичний (1). Виокремлення лісового блоку як самостійного структурного компонента забезпечено

використанням таких предикторів (щільність, близькість до межі лісу, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу 2001–2023 рр., частка лісу вище по схилу).

3. Для всіх чотирнадцяти факторів реалізовано автоматизоване обчислення на платформі Google Earth Engine з використанням відкритих глобальних продуктів. Застосовано просторово-блоковий поділ вибірки 236 зсувних проявів базового полігону на навчальну (135 точок, 57 %) та тестову (101 точка, 43 %) частини з використанням квадратних блоків 3×3 км. Такий підхід, на відміну від випадкового поділу, запобігає просторовому витоку інформації між вибірками і забезпечує коректну валідацію моделі.

4. Проведено багатовимірний статистичний аналіз (K-means, кореляційний, EFA, PCA) факторів та аналіз мультиколінеарності факторів. Аналіз мультиколінеарності та інформативності факторів дав змогу перейти від початкових 14 до 10 чинників. Підсумкова модель спирається на 10 взаємно слабокорельованих чинників - крутизну схилу, експозицію, абсолютну висоту, профільну кривину, відстань до межі лісу, щільність лісу, тип лісу, відстань до водотоків, літологію та відстань до розломів, - що поєднує статистичну коректність із фізичною інтерпретованістю результатів.

5. Калібрування факторних шарів методом Frequency Ratio виконано на основі навчальних-точок зсувів з використанням 10 класів для неперервних факторів та категоріальних класів для експозиції схилу, типу лісового покриву, літології. Визначення вагових коефіцієнтів методом Random Forest Feature Importance (ансамбль з 300 дерев) виявило такий розподіл ваг: морфометричний блок - 49,7 %, лісовий (рослинність) - 25,9 %, геологічний - 14,2 %, гідрологічний - 10,3 %. Порівнюваність внесків морфометричного і лісового блоків (49,7 % і 25,9 %) емпірично підтверджує важливість комплексного врахування лісового фактора у моделі LSA.

6. Інтегральна карта LSA для основної території досліджень отримана шляхом обчислення зваженої суми FR-каліброваних факторних шарів з подальшим логістичним калібруванням. Класифікація LSA на п'ять класів за квантильним методом дала такий розподіл 236 зсувних проявів: клас 1 - 3,4 %, клас 2 - 10,2 %, клас 3 - 14,8 %, клас 4 - 18,7 %, клас 5 - 52,9 %.

клас 2 - 10,6 %, клас 3 - 11,4 %, клас 4 - 22,9 %, клас 5 - 51,7 %. Класи 4–5 охоплюють 74,6 % зсувних проявів. 40,2 % території базового полігону належить до класів 4–5.

7. Прогнозна оцінка якості моделі виконана на незалежній тестовій вибірці (101 зсувний прояв). За результатами оцінки якості 88,1 % тестових точок потрапляють у класи 3–5 (середня, висока, дуже висока сприйнятливість), 78,2 % - у класи 4–5. Коефіцієнти просторового збагачення для класів 4 і 5 становлять 1,32 і 2,57 відповідно. Значення метрики для оцінки якості моделей бінарної класифікації (AUC ROC) становить 0,72, що відповідає категорії «добра якість». Застосування моделі до контрольного полігону у Верховинському районі Івано-Франківської області (190 зсувних проявів) дало задовільні результати (79,6 % у класах 3–5; AUC prediction-rate 0,61), що підтверджує узагальнюваність підходу і водночас вказує на необхідність підбору та статистичного обґрунтування факторів для району досліджень, для якого застосовується модель.

8. Отримана карта LSA має практичне значення для пріоритизації моніторингу зсувонебезпечних територій, обґрунтування лісгосподарських заходів у зонах підвищеного ризику, підтримки рішень із територіального планування, оптимізації розміщення станцій моніторингу зсувних процесів, розробки стратегій адаптації до кліматичних змін. Розроблена модель є повністю відтворюваною та масштабованою, що дозволяє застосовувати її до інших зсувонебезпечних територій Українських Карпат врахувавши умови розвитку зсувів для цих територій.

РОЗДІЛ 5

ГЕОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ СТАНУ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ТЕРИТОРІЇ

5.1 Методологічні основи оцінки ризику для зсувонебезпечних територій

Перехід від оцінки зсувної сприйнятливості (LSA), розробленої у розділі 4, до комплексної оцінки індексу природоохоронного пріоритету перетворює просторову модель природної сприйнятливості на повноцінний інструмент управління територіями.

У сучасній науковій літературі склалася чітка ієрархія понять у галузі оцінки природних ризиків, формалізована у Сендайській рамковій програмі зі зниження ризику стихійних лих 2015–2030 [122] та у методичних документах ООН [143]. Наприклад, для ризику природних та антропогенних катастроф IPCC [24] так визначає три множники ризику (рис. 5.1).

Природна небезпека чи загроза - потенційно руйнівне природне явище, що може призвести до негативних наслідків. У просторовому вимірі характеризується показником сприйнятливості, що оцінює ймовірність виникнення небезпеки у даній точці території.

Експозиція - присутність людей, інфраструктури, природних або інших цінностей у зоні можливого впливу небезпеки. Просторово виражається щільністю населення, концентрацією забудови, щільністю транспортної мережі.

Вразливість - ступінь потенційної втрати, яку можуть зазнати експоновані елементи під дією певної інтенсивності небезпеки. Вразливість залежить від фізичних, соціальних, економічних і демографічних характеристик об'єктів.

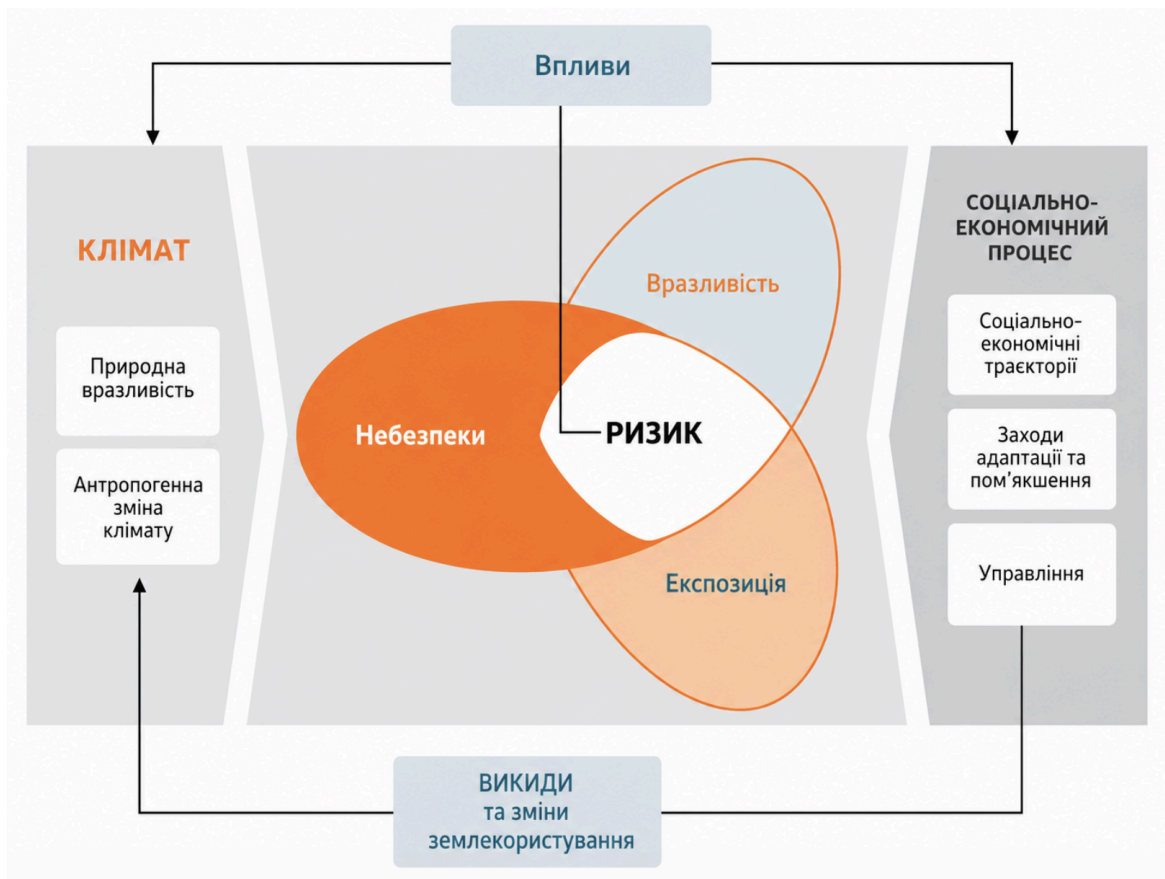


Рисунок 5.1 - Сучасне розуміння ризику за звітами Міжурядової панелі зі зміни клімату (IPCC)

Ризик - очікувана сукупність втрат від можливої активізації небезпеки; класична формула:

$$R = H \times E \times V \quad (5.1)$$

де H - загроза, E - експозиція, V - вразливість [53, 126, 143].

Загальна архітектура запропонованої моделі розрахунку ризику для ПЗФ з усіма її компонентами наведена на рис. 5.2.

У контексті зсувних процесів методологічна складність оцінки ризику полягає у необхідності одночасно врахувати природну складову (зсувну сприйнятливість), соціоекономічну складову (люди та інфраструктура у зоні впливу) та природоохоронну складову (цінні екосистеми та ландшафти). Традиційний підхід, орієнтований лише на наслідки для соціуму, не враховує повною мірою геоecологічну цінність території як самостійний компонент ризику. Тому у рамках даного дисертаційного дослідження запропоновано інтегрований

методичний підхід, що розділяє оцінку ризику на два доповнювані, але різні за змістом види:

Індекс природоохоронного пріоритету - оцінює потенційні втрати природних екосистем і ландшафтів від активізації зсувно-ерозійних процесів. Ця компонента ризику враховує стан лісового покриву, чутливість екосистем, морфодинамічні параметри території.

Ризик для населення та інфраструктури - оцінює потенційні втрати людей та антропогенних об'єктів у зоні впливу зсувів. Ця компонента ризику враховує щільність населення, експозицію забудови та інфраструктури, демографічну вразливість.

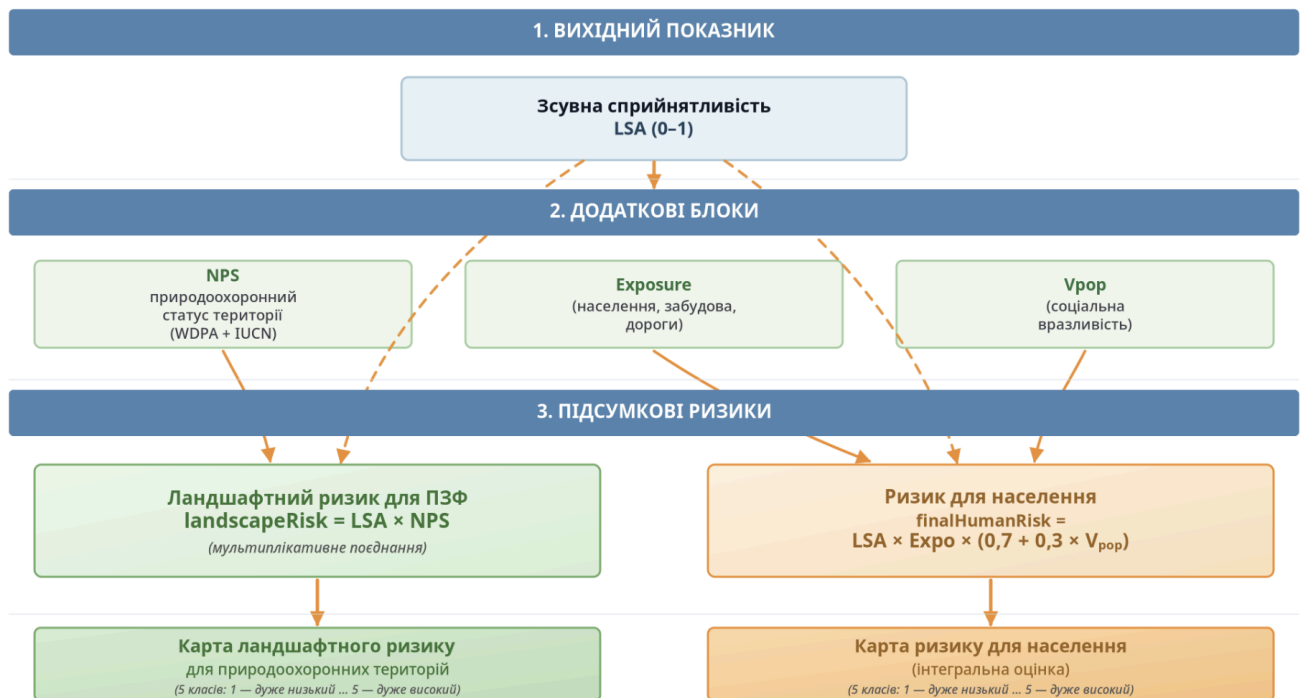


Рисунок 5.2 - Спрощена схема переходу від зсувної сприйнятливості (LSA) до інтегральної оцінки індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення

Формально модель індексу природоохоронного пріоритету визначається за допомогою запропонованої формули:

$$\text{conservationPriority} = \text{LSA} \times \text{NPS} \quad (5.2)$$

де *LSA* - калібрована зсувна сприйнятливість; *NPS* - природоохоронний статус території.

Індекс природоохоронного пріоритету визначається як добуток каліброваної зсувної сприйнятливості (*LSA*) на природоохоронну цінність території (*NPS*) і є зваженим ранжованим показником просторового пріоритету для природоохоронного менеджменту, а не ризиком у класичному розумінні (формула 5.1) [151]. Множник *NPS* характеризує природоохоронну значущість ділянки, а не її фізичну вразливість чи рівень експозиції, тому отримана величина відображає не очікуваний збиток, а відносну пріоритетність збереження. Таке відхилення від стандарту обґрунтоване специфікою об'єкта - для природно-заповідних територій метою є пріоритизація ділянок для збереження, а не оцінка матеріальних втрат. Запропонована інтеграція зсувної небезпеки з показниками природоохоронної значущості відповідає усталеній практиці [152].

Блок природоохоронного статусу території (*NPS*) - запропонований показник, що базується на офіційних юридичних статусах ПЗФ-об'єктів території. Значення *NPS* присвоюється кожній ділянці залежно від типу охоронного режиму з експертною відповідністю даних до системи IUCN Protected Area Categories (Dudley, 2008), верифікованим через структуровані дані Wikidata (241 український ПЗФ-об'єкт з визначеною IUCN-категорією). Запропоновано таку шкалу *NPS* - 1,00 - Світова спадщина ЮНЕСКО та біосферні заповідники (IUCN Ia); 0,90 - національні природні парки (IUCN II); 0,70 - Смарагдова мережа (IUCN IV); 0,65 - заказники (IUCN IV); 0,55 - пам'ятки природи (IUCN III); 0,40 - заповідні урочища (IUCN V); 0,20 - поза межами ПЗФ. Шкала відображає категорії охорони території у діапазоні [0; 1] і монотонно зростає зі строгістю режиму охорони. Хоча ці значення не отримані формальною процедурою експертного опитування, вони ґрунтуються на міжнародно стандартизованій ієрархії категорій IUCN, є

відтворюваними, а інтеграція зсувної сприйнятливості з показниками природоохоронної значущості відповідає усталеній практиці [152]. Детальний опис формування NPS наведено у підрозділі 5.4

Ризик для людей та інфраструктури розраховуємо за запропонованою формулою:

$$finalHumanRisk = LSA \times Exposure \times (0,7 + 0,3 \times populationVulnerability) \quad (5.3)$$

де *LSA* - калібрована зсувна сприйнятливість, *Exposure* - інтегральна просторова експозиція людей та інфраструктури; *populationVulnerability* - демографічна вразливість населення.

У формулі 5.3 коефіцієнти 0,7 та 0,3 у формулі ризику для населення підбираються експертно для забезпечення балансу між провідною роллю сприйнятливості та додатковою роллю соціальної вразливості населення. Блок небезпеки - представлений каліброваною картою *LSA* з розділу 4 (рис. 4.24). Блок експозиції - інтегральний просторово-розподілений показник, що поєднує три компоненти - експозицію населення на основі даних глобального продукту *WorldPop* [144], експозицію забудови на основі *ESA WorldCover 2021* та *JRC Global Human Settlement Layer (GHSL)* [145] та експозицію дорожньої мережі. Інтеграція здійснюється як зважена сума:

$$Exposure = 0,45 \times popExp + 0,30 \times builtExp + 0,25 \times roadsExp \quad (5.4)$$

де *popExp* - експозиція населення, *builtExp* - експозиція забудови, *roadsExp* - експозиція дорожньої мережі. Блок вразливості населення (*populationVulnerability*) у формулі 5.3 обчислюється як частка залежних вікових груп (діти до 14 років і люди старше 65 років) у загальному населенні території, на основі даних *WorldPop Global Age and Sex Structures* [146].

Формули мають мультиплікативну структуру та інтерпретуються таким чином. Наприклад індекс природоохоронного пріоритету формується лише там, де одночасно присутні природна зсувна сприйнятливість ($LSA > 0$) і

природоохоронна цінність території ($NPS >$ базового рівня), причому два множники незалежні за походженням - LSA є результатом моделювання, а NPS визначається природоохоронним статусом території.

5.2 Підхід до формування блоку просторової експозиції

Експозиція населення базується на даних WorldPop - провідного глобального продукту просторового моделювання щільності населення з просторовою розрізненністю 100 м [144]. WorldPop використовує методику дисагрегації даних національних переписів на основі супутникових зображень, що забезпечує повне просторове покриття з мінімальними помилками. Для базового полігону дослідження (верхів'я р. Теремля) отримано вихідні дані у людях на піксель (100×100 м).

Для нормалізації у діапазон $[0; 1]$ застосовано таку послідовність перетворень. Спочатку обчислюється щільність населення на квадратний кілометр ($popDen = popCount / 0,01 \text{ км}^2$), потім виконуємо логарифмічне перетворення для згладжування різкого контрасту між сільськими та міськими зонами ($popDen_log = \log(1 + popDen)$). Наступний етап степеневе перетворення для посилення сигналу низьких значень ($popDen_pow = popDen_log^{0.5}$). Далі виконується нормалізація отриманих даних у діапазон $[0; 1]$ через функцію *safeNorm01Positive*. Результатом є шар *popExp01*, що набуває максимальних значень у центрах населених пунктів (Колочава, Німецька Мокра, Руська Мокра, Усть-Чорна, Брустури) і мінімальних - у незаселених лісових та високогірних територіях.

Експозиція забудови формується на основі комбінації двох продуктів: ESA WorldCover 2021 (клас 50 - «Забудовані території») [120] та JRC Global Human Settlement Layer GHSL (шар BUILT_S) [145]. Для кожного пікселя обчислюється бінарна маска «збудови» на основі двох шарів. Така подвійна перевірка забезпечує ідентифікацію збудованих територій, уникаючи помилкових позитивних спрацювань.

На основі маски забудови обчислюється евклідова відстань від кожного пікселя до найближчої збудованої території. Результат нормалізується у діапазон

[0; 1] через експоненційне перетворення: $builtExp01 = \exp(-d/1000)$, де d - відстань у метрах, 1000 - характерна відстань для спадання впливу експозиції. Така формула забезпечує високі значення поблизу забудованих територій (до 500 м) і швидке затухання при віддаленні (понад 2000 м - значення близькі до нуля).

Експозиція дорожньої мережі формується за одним з двох альтернативних підходів залежно від доступності даних.

Основним підходом є використання векторного шару доріг із наступною растрезацією доріг із забезпеченням ширини 2 пікселі, після чого для кожного пікселя території обчислюється евклідова відстань до найближчої дороги. Нормалізація у діапазон [0; 1] виконується через формулу $\exp(-d/800)$, де 800 м - характерна відстань для дорожньої експозиції.

Іншим, альтернативним, підходом є використання даних глобального ресурсу JRC GHSL для інтерпретації дорожньої транспортної інфраструктури. Ця маска використовується замість векторних ліній доріг з тим же алгоритмом обчислення експозиції.

Інтегральний показник експозиції обчислюється як зважена сума трьох компонентів:

$$exposure = wPop \times popExp01 + wBuilt \times builtExp01 + wRoads \times roadsExp01 \quad (5.5)$$

де $popExp01$ - експозиція населення, $builtExp01$ - експозиція забудови, $roadsExp01$ - експозиція дорожньої мережі, базові ваги встановлено $wPop = 0,45$, $wBuilt = 0,30$, $wRoads = 0,25$ (або 0,10 при використанні альтернативного сценарію) з подальшим перенормуванням суми до 1.

Такий вибір ваг обґрунтовується відносною значущістю кожного компоненту для оцінки соціальних наслідків зсувних подій: населення є основним об'єктом захисту, забудова - головним матеріальним активом, дороги - критичною інфраструктурою.

5.3 Формування блоку вразливості населення

Блок вразливості населення у моделі ризику призначений для оцінки демографічно-соціальних характеристик населення, що моделюють тяжкість потенційних втрат від активізації зсувних процесів. Основним джерелом даних для цього блоку виступає продукт WorldPop Global Age and Sex Structures [146], що містить просторово розподілену інформацію про вікову структуру населення з просторовою розрізненністю 100 м.

Методичний підхід до оцінки демографічної вразливості ґрунтується на концепції «вразливих вікових груп» - соціально-демографічних категорій, які мають підвищену вразливість до екстремальних природних подій через обмежену мобільність, залежність від інших членів суспільства, вищу чутливість до стресу. Загальноприйнятою міжнародною практикою є включення до залежних груп таких категорій:

- діти у віці до 14 років включно (0, 1, 5, 10-річні вікові інтервали за номенклатурою WorldPop);
- особи похилого віку від 65 років і старше (65, 70, 75, 80+ річні вікові інтервали).

Працездатне населення (15–64 роки, інтервали 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60) розглядається як базова категорія з меншою демографічною вразливістю до природних катастроф.

Алгоритм обчислення демографічної вразливості такий:

1. Завантажують растрові шари WorldPop за віком і статтю (просторова розрізненність 100 м) та обчислюють загальну чисельність населення у пікселі (*popAgeTotal*) як суму всіх вікових і статевих шарів.

2. Визначають чисельність вразливого населення (*dependentPop*) як суму дітей (0–14 років: вікові інтервали 0, 1, 5, 10) та осіб похилого віку (65+ років: інтервали 65, 70, 75, 80) обох статей.

3. Обчислюють частку вразливого населення $dependentShare = dependentPop / (popAgeTotal + \epsilon)$, де $\epsilon = 10^{-6}$ (технічний показник, який забезпечує розрахунок

для абсолютно безлюдних територій), і нормалізують її у діапазон $[0; 1]$ із використанням методу *GEE clamp()*:

$$populationVulnerability01 = clamp(dependentShare, 0, 1).$$

Для базового полігону 25×25 км середня частка вразливого населення становить 32–38 %, що відповідає демографічній ситуації гірських сіл Закарпаття з вираженим старінням населення. Максимальні значення вразливості (понад 0,40) приурочені до невеликих віддалених сіл, мінімальні (до 0,25) - до центральних частин більших населених пунктів (Колочава, Усть-Чорна) зі збалансованою демографічною структурою.

Класифікацію виконують на 5 класів за фіксованими порогоми ($< 0,20$; $0,20-0,40$; $0,40-0,60$; $0,60-0,80$; $\geq 0,80$); на території базового полігону переважає клас 2 з окремими ділянками класу 3.

5.4 Природоохоронний статус території (NPS) на основі WDPA

Показник природоохоронного статусу території (NPS) запропонований інтегральний індекс, розроблений для кількісного оцінювання природоохоронної цінності окремих ділянок території у контексті оцінки індексу природоохоронного пріоритету. Природоохоронний статус території формується на основі офіційного юридичного статусу ділянки, отриманого з міжнародної бази природоохоронних територій World Database on Protected Areas (WDPA, UNEP-WCMC), доступної у каталозі даних Google Earth Engine (asset WCMC/WDPA/current/polygons). Загальне просторове охоплення території України системою природно-заповідного фонду, що визначає контекст моделювання NPS, наведено на рис. 5.3.

Як видно з рис. 5.3, об'єкти ПЗФ України характеризуються вираженою просторовою нерівномірністю та різним ступенем атрибутивної забезпеченості геоданих. Найвища концентрація ПЗФ з повноцінною векторизацією та підтвердженими атрибутами зосереджена у Поліссі, у північно-східному прикордонні, у південно-східних областях та у межах Карпатського регіону. Карпатська частина території України, до якої належить ділянка дисертаційного

дослідження, є зоною де представлені різні об'єкти ПЗФ. Це Карпатський біосферний заповідник, Карпатський національний природний парк, НПП «Синевир», НПП «Сколівські Бескиди», Ужанський НПП та значна кількість заказників, заповідних урочищ і пам'яток природи. Саме така повнота геопросторових даних на території Українських Карпат робить можливим коректне формування показника природоохоронного статусу території (NPS) на основі WDPA з верифікацією через Wikidata.

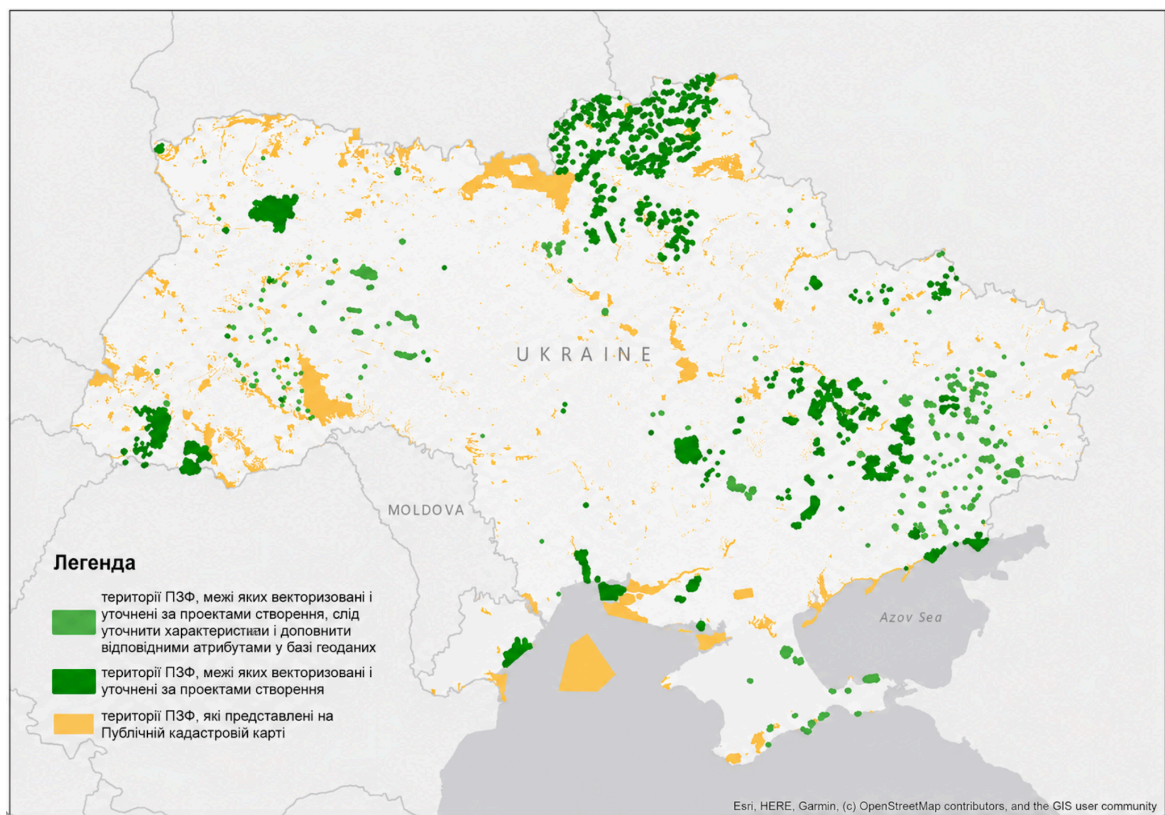


Рисунок 5.3 - Просторове охоплення території України об'єктами природно-заповідного фонду (за матеріалами кадастру природно-заповідного фонду України та Публічної кадастрової карти України)

Числове значення NPS присвоюється кожному ПЗФ-об'єкту залежно від типу охоронного статусу (поле DESIG_ENG у WDPA) на основі експертної відповідності даних до системи IUCN Protected Area Categories (Dudley, 2008). У зв'язку з тим, що у базі WDPA для 92 % українських природоохоронних об'єктів атрибут IUCN_CAT відсутній, запропоновану відповідність даних було

верифіковано через відкриті структуровані дані Wikidata, що містить інформацію про IUCN-категорії для 241 українського ПЗФ-об'єкта. Запропонована шкала природоохоронного статусу території (NPS) за категоріями ПЗФ представлена у таблиці 5.1. За цією таблицею для Світової спадщини ЮНЕСКО значення NPS максимальне та рівне 1,00 (IUCN категорія Ia), біосферний резерват ЮНЕСКО-МАВ та національні біосферні заповідники також мають NPS = 1,00 (IUCN категорія Ia, верифіковано для Карпатського біосферного заповідника та його шести масивів через Wikidata). Для національних природних парків NPS = 0,90 (IUCN категорія II, верифіковано для НПП «Синевир» та інших НПП). Об'єктам Смарагдової мережі Ради Європи встановлено NPS = 0,70 (IUCN категорія IV), заказники - NPS = 0,65 (IUCN категорія IV, верифіковано для заказника «Странзул, Задня, Кедрин» через Wikidata), пам'ятки природи - NPS = 0,55 (IUCN категорія III). Заповідні урочища та інші території ПЗФ місцевого значення - NPS = 0,40 (умовно IUCN категорія V як нижній residual-рівень; для більшості таких територій IUCN-категорія у WDPA не задана). Для територій поза межами ПЗФ NPS = 0,20.

Таблиця 5.1 – Шкала природоохоронного статусу території (NPS) за категоріями ПЗФ з посиланням на міжнародну систему IUCN Protected Area Categories (Dudley, 2008)

№	Категорія ПЗФ (поле DESIG_ENG у базі WDPA)	Українська назва	IUCN	Варі NPS
1	World Heritage Site (natural or mixed)	Об'єкт Світової спадщини ЮНЕСКО	Ia	1,00
2	UNESCO-MAB Biosphere Reserve	Біосферний резерват ЮНЕСКО-МАВ	Ia	1,00
3	Biosphere reserve	Біосферний заповідник	Ia	1,00
4	National nature park	Національний природний парк	II	0,90
5	Emerald Network	Об'єкт Смарагдової мережі	IV	0,70
6	Zakaznyk	Заказник	IV	0,65
7	Natural monument	Пам'ятка природи	III	0,55
8	Zapovidne urochyshe	Заповідне урочище	V	0,40
9	- (поза ПЗФ)	Базовий рівень (територія поза межами ПЗФ)	-	0,20

Растрезицію NPS у проекцію моделі виконано методом максимальної агрегації значень для пікселів, що перекриваються полігонами кількох охоронних об'єктів різних категорій - тобто кожному пікселю присвоюється найвище значення NPS серед усіх перекриваючих ПЗФ-об'єктів.

На території базового полігону «Теребля» виявлено 28 природоохоронних об'єктів WDPA різного статусу - один об'єкт Світової спадщини ЮНЕСКО (Букові праліси Карпат), 1 біосферний резерват ЮНЕСКО-МАВ (Карпатський), 1 національний біосферний заповідник, 1 національний природний парк (НПП «Синевир»), 7 об'єктів Смарагдової мережі, 8 заказників, 8 пам'яток природи та одне заповідне урочище. Найбільшу за площею частку території полігону охоплюють заповідні масиви Карпатського біосферного заповідника та НПП «Синевир» з NPS = 1,00 і 0,90 відповідно. Повний перелік природоохоронних об'єктів полігону з присвоєними IUCN-категоріями та NPS-вагами наведено у таблиці 5.2.

Запропонована шкала NPS-значень узгоджена з принципом монотонного зростання значущості при підвищенні рівня охоронного статусу, а саме від місцевого до глобального. Числові значення було обрано з кроком 0,05–0,15 для забезпечення достатньої диференціації між категоріями при формуванні фінального показника індексу природоохоронного пріоритету. Пряме використання атрибута IUCN_CAT з WDPA не застосовано через його неповноту для українських об'єктів - лише 0,5 % українських ПЗФ-об'єктів у WDPA мають присвоєну IUCN-категорію. Для жодного з 28 ПЗФ-об'єктів території базового полігону IUCN-категорія в офіційному WDPA не була задокументована. Це обумовило застосування експертної оцінки відповідності даних та незалежної верифікації через Wikidata. Експертна відповідність даних від категорій українського Закону «Про природно-заповідний фонд України» (№2456-ХІІ від 16.06.1992 р.) до системи IUCN характеризується такою схемою: природний заповідник → IUCN Ia; біосферний заповідник → IUCN Ia (через домінування заповідної зони над зоною регульованої рекреації); національний природний парк

→ IUCN II; регіональний ландшафтний парк → IUCN V; заказник загальнодержавного та місцевого значення → IUCN IV; пам'ятка природи → IUCN III; заповідне урочище → IUCN V.

Таблиця 5.2 – Перелік природоохоронних об'єктів у межах базового полігону «Теребля» за даними бази WDPA (UNEP-WCMC, травень 2026) з присвоєними IUCN-категоріями (верифіковано через Wikidata) та вагами NPS

№	Назва об'єкта	Тип ПЗФ	IUCN	NPS	Площа, км ²
1	Carpathian	Біосферний резерват ЮНЕСКО	Ia	1,00	578,00
2	Ancient and Primeval Beech Forests of the Carpathians and Other Regions of Europe	Світова спадщина ЮНЕСКО	Ia	1,00	981,25
3	Карпатський	Біосферний заповідник	Ia	1,00	580,36
4	Синевир	Національний природний парк	II	0,90	430,82
5	Black Tysa river valley and slopes of Bratkovsk...	Смарагдова мережа	IV	0,70	307,30
6	Carpathian Biosphere Reserve	Смарагдова мережа	IV	0,70	582,96
7	Dolynsko-Rozhniatynskyi	Смарагдова мережа	IV	0,70	1076,02
8	Forests near Kolochava	Смарагдова мережа	IV	0,70	76,37
9	Polonynskyi ridge	Смарагдова мережа	IV	0,70	1670,72
10	Skhidnyi Svydovets	Смарагдова мережа	IV	0,70	151,38
11	Synevyr National Nature Park	Смарагдова мережа	IV	0,70	404,36
12	Аршична	Заказник	IV	0,65	0,24
13	Бертяник	Заказник	IV	0,65	0,54
14	Брадульський	Заказник	IV	0,65	10,26
15	Кедринський	Заказник	IV	0,65	1,66
16	Керничний	Заказник	IV	0,65	1,07
17	Урочища Странзул, Задня, Кедрин	Заказник	IV	0,65	5,10
18	Усть-Чорна	Заказник	IV	0,65	0,00
19	Явірник	Заказник	IV	0,65	0,37
20	Джерело Б/н	Пам'ятка природи	III	0,55	0,01
21	Джерело Б/н	Пам'ятка природи	III	0,55	0,05
22	Джерело Б/н	Пам'ятка природи	III	0,55	0,05
23	Джерело №1	Пам'ятка природи	III	0,55	0,01
24	Джерело №2	Пам'ятка природи	III	0,55	0,01
25	Джерело №3	Пам'ятка природи	III	0,55	0,03
26	Джерело №4	Пам'ятка природи	III	0,55	0,01
27	Джерело №5	Пам'ятка природи	III	0,55	0,01
28	Усть-Чорнянські праліси	Заповідне урочище	V	0,40	4,26

Верифікація відповідності між даними через Wikidata повернула 241 український ПЗФ-об'єкт з визначеною IUCN-категорією, з яких щонайменше 9 об'єктів безпосередньо підтверджують відповідність даних для території базового полігону: Карпатський біосферний заповідник та шість його заповідних масивів (Угольсько-Широколужанський, Свидовецький, Кузійський, Чорногірський, Долина нарцисів - усі IUCN Ia, Марамороський - IUCN II), НПП «Синевир» - IUCN II, заказник «Странзул, Задня, Кедрин» - IUCN IV.

Слід зазначити, що ця верифікація має локальне обмеження: окрім Wikidata, поглиблений польовий аудит, проведений European Wilderness Society у 2016 р. для НПП «Синевир», класифікував парк як IUCN категорію V на основі переважання зони регульованої рекреації, з включеним заповідним ядром класу Ia.

Для оцінки впливу вибору NPS на результат проведено аналіз чутливості (рис. 5.4). Варіювання NPS НПП «Синевир» у повному діапазоні від 0,40 (відповідає категорії IUCN V) до 1,00 змінює частку незалежних тестових зсувів у двох найвищих класах пріоритету лише в межах 63,4–66,3 % (64–67 зі 101 зсуву): для IUCN II (0,90) - 66,3 % (67 зсувів), для IUCN V (0,40) - 63,4 % (64 зсуви), тобто різниця становить лише три зсуви (менш ніж 3 в.п.).

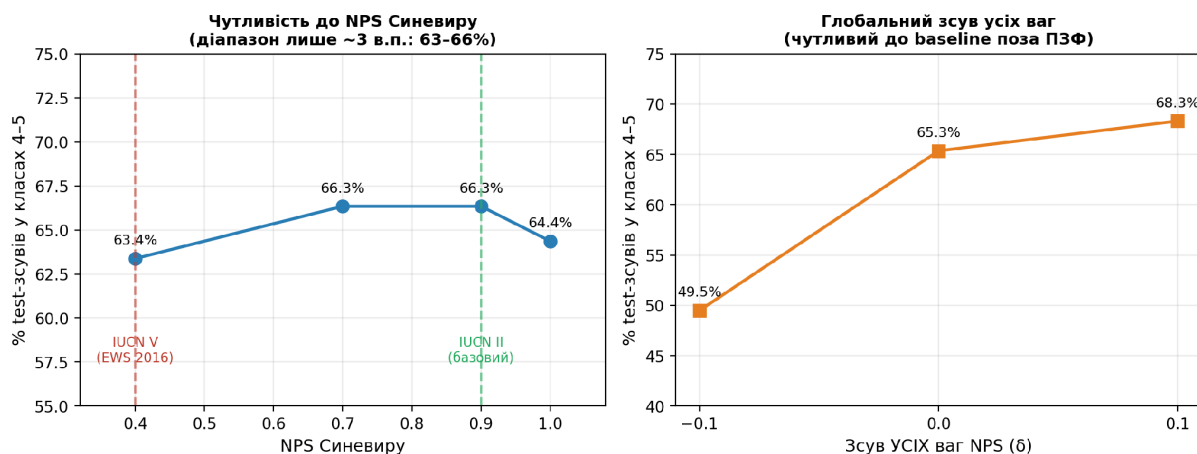


Рисунок 5.4 - Аналіз чутливості індексу природоохоронного пріоритету до ваги NPS НПП «Синевир» (0,40–1,00) та до глобального зсуву всіх NPS-ваг ($\pm 0,10$)

Така стійкість пояснюється квантильним характером класифікації індексу та домінуванням Синевиру в межах полігону (430,8 км²): рівномірне масштабування

NPS домінуючої території зберігає внутрішнє ранжування пікселів. Глобальне зміщення всіх ваг NPS на $\pm 0,10$ дає ширший діапазон (49,5–68,3 %), що відображає переважно чутливість до базового рівня територій поза межами ПЗФ (0,20), а не до співвідношень між категоріями заповідності.

Для НПП «Синевир» з огляду на офіційний статус та результати аналізу чутливості у роботі застосовано значення $NPS = 0,90$. Незважаючи на той факт, що польовий аудит European Wilderness Society (2016) класифікував його як категорію IUCN V (захищений ландшафт), офіційна реєстрація відповідає категорії II, застосованій у моделі ($NPS = 0,90$). Водночас Синевир одночасно є об'єктом Смарагдової мережі, що в межах прийнятої шкали гарантує NPS не нижче 0,70 незалежно від інтерпретації категорії IUCN. Як показав наведений вище аналіз чутливості, перехід від категорії II до V змінює валідаційні показники лише на три зсуви (менш ніж 3 в.п.) і не впливає суттєво на просторовий розподіл пріоритетності.

Для базового полігону результативна карта природоохоронного статусу території (рис. 5.5) демонструє такі просторові закономірності. Максимальні значення $NPS = 1,00$ приурочені до заповідних масивів Карпатського біосферного заповідника та об'єктів Світової спадщини ЮНЕСКО (Букові праліси Карпат). Високі значення 0,90 охоплюють територію НПП «Синевир» (430,8 км²). Помірні значення NPS (0,65–0,70) поширені у межах об'єктів Смарагдової мережі та заказників. Локальні низькі значення NPS ($= 0,55$) утворюють точкові поля у місцях розташування пам'яток природи. Поодинокі мінімальні значення $NPS = 0,40$ відповідають заповідному урочищу. Базовий рівень $NPS = 0,20$ встановлено для територій поза межами ПЗФ - він відображає загальне визнання природної цінності будь-яких природних ділянок Карпат, які навіть не оформлені як природоохоронні.

Зіставлення карти природоохоронного статусу території з картами зсувної сприйнятливості (LSA) дозволяє виявити зони, де високий природоохоронний статус території поєднується з підвищеним ризиком активізації зсувних процесів -

саме ці зони формують основу для побудови інтегрального показника індексу природоохоронного пріоритету.

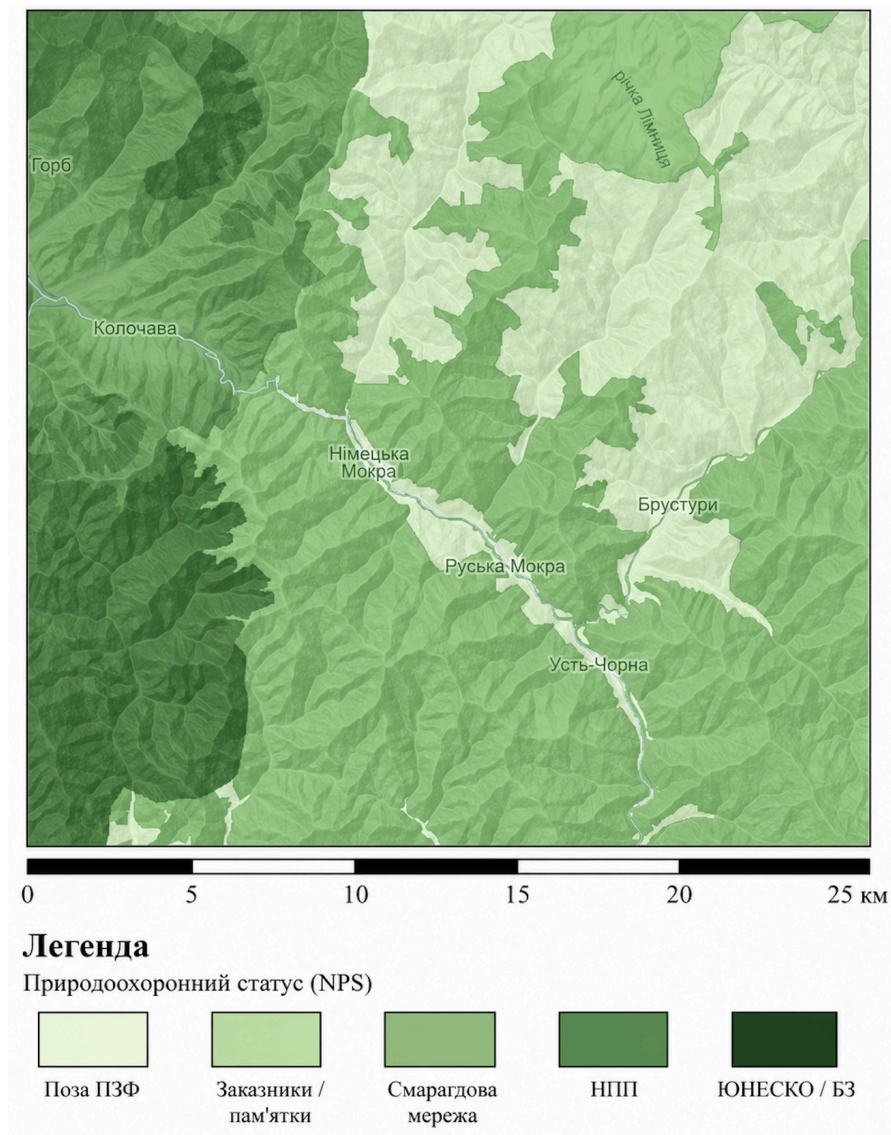


Рисунок 5.5 - Картограма природоохоронного статусу території базового полігону (NPS): класифікація ПЗФ-об'єктів на основі поля DESIG_ENG бази WDPA (UNEP-WCMC, травень 2026) з присвоєнням NPS-ваг за експертною відповідністю даних, верифікованим через Wikidata. Значення NPS: 1,00 - Світова спадщина ЮНЕСКО / Біосферний заповідник (IUCN Ia), 0,90 - НПП (IUCN II), 0,70 - Смарагдова мережа (IUCN IV), 0,65 - заказники (IUCN IV), 0,55 - пам'ятки природи (IUCN III), 0,40 - заповідні урочища (IUCN V), 0,20 - поза ПЗФ

5.5 Розрахунок інтегральних показників індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення

На основі сформованих блоків сприйнятливості (LSA з розділу 4), експозиції, вразливості населення та природоохоронного статусу території виконано обчислення двох інтегральних показників ризику: індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення та інфраструктури.

5.5.1 Індекс природоохоронного пріоритету

Індекс природоохоронного пріоритету характеризує потенційні втрати природоохоронної цінності природних екосистем у зонах активізації зсувно-ерозійних процесів. Обчислюється за формулою 5.2.

Формула містить два мультиплікативно поєднаних незалежних компоненти. Перший компонент (LSA) визначає природний потенціал розвитку зсувних процесів. Другий компонент (NPS) визначає природоохоронну цінність ділянки на основі формального юридичного статусу її приналежності до системи ПЗФ. Мультиплікативне поєднання гарантує, що індекс природоохоронного пріоритету зростає лише у зонах, де одночасно присутній високий природний ризик і висока природоохоронна цінність. Відсутність будь-якого з компонентів (наприклад, низький NPS поза межами ПЗФ або низька LSA на пологих рівнинних ділянках) призводить до низького значення інтегрального ризику.

Класифікація індексу природоохоронного пріоритету на п'ять класів зсувного ризику виконується квантильним методом з межами на 20-му, 40-му, 60-му і 80-му перцентилях розподілу, аналогічно класифікації LSA. Класи інтерпретуються як: клас 1 (дуже низький ризик), клас 2 (низький), клас 3 (середній), клас 4 (високий), клас 5 (дуже високий). Розподіл території базового полігону за класами індексу природоохоронного пріоритету разом з результатами валідації на 101 незалежному тестовому зсувному прояві наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Розподіл території базового полігону «Теребля» за класами індексу природоохоронного пріоритету та валідація на 101 незалежному тестовому зсувному прояві (EN - коефіцієнт просторового збагачення)

Клас	Опис	Площа, км ²	% території	Тестових-зсувів	% зсувів	EN
1	Дуже низький	146,6	20,78	9	8,91	0,43
2	Низький	137,9	19,55	10	9,90	0,51
3	Середній	140,5	19,91	26	25,74	1,29
4	Високий	139,5	19,77	24	23,76	1,20
5	Дуже високий	140,6	19,93	32	31,68	1,59
	Усього	705,1	100,00	101	100,00	-

Для базового території досліджень «Теребля» результативна карта індексу природоохоронного пріоритету (рис.5.6) показує характерну зональну структуру: максимальні значення індексу природоохоронного пріоритету (клас 5) приурочені до ділянок, де високі значення LSA ($\geq 0,80$) перекриваються з територіями високого NPS ($\geq 0,90$) - переважно це схили в межах НПП «Синевир» та Карпатського біосферного заповідника. Просторовий аналіз показує, що:

- 40,6 % території полігону належить до класів 4–5 виділених за індексом природоохоронного пріоритету (площі, відповідно, 139,5 та 140,6 км² при загальній площі полігону близько 705 км²), причому переважна частина цих зон розташована у межах об'єктів ПЗФ високого охоронного статусу - Карпатський біосферний заповідник і НПП «Синевир».

- з усіх 236 задокументованих зсувних проявів полігону 147 (62 %) розташовані у межах ПЗФ.

- зони з NPS $\geq 0,90$ (НПП та біосферні заповідники) демонструють підвищені значення індексу природоохоронного пріоритету $\geq 0,50$, що вказує на необхідність пріоритетних заходів моніторингу та запобігання зсувних процесів у межах об'єктів вищого охоронного статусу.

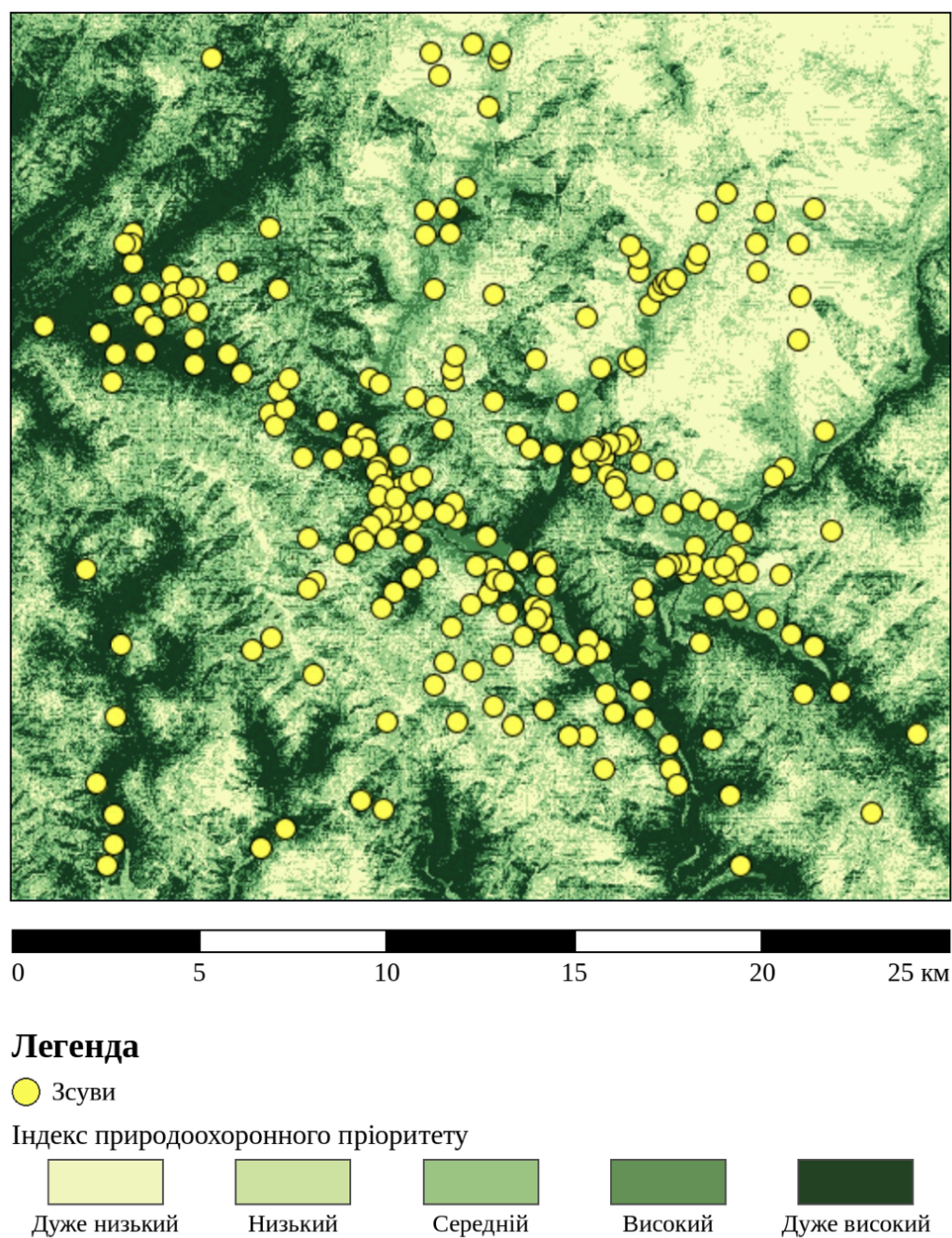


Рисунок 5.6 - Фінальна картограма індексу природоохоронного пріоритету

Зіставлення карти індексу природоохоронного пріоритету з адміністративними межами природно-заповідних територій дозволяє ідентифікувати конкретні ділянки в межах НПП «Синевир» та Карпатського біосферного заповідника, де поєднання високої природної зсувної

сприйнятливості та офіційного охоронного статусу формує найвищий пріоритет для природоохоронних заходів. Запропонована модель практично інтерпретується таким чином - значення індексу природоохоронного пріоритету безпосередньо інтерпретується як «частка повної природної сприйнятливості, помножена на природоохоронну цінність ділянки», що відповідає міжнародній практиці управління ризиками в охоронюваних територіях (Dudley, 2008; Stolton et al., 2013).

5.5.2 Ризик для населення та інфраструктури

Ризик для населення та інфраструктури характеризує потенційні людські втрати та антропогенних об'єктів у зоні впливу зсувних процесів. Обчислюється за формулою (5.3), згідно з якою показник LSA, розподіл якого наведено на рис. 5.7, виступає як «матриця ймовірності» активізації зсуву у даній точці, експозиція визначає просторову «насиченість» території об'єктами потенційних втрат.

На відміну від індексу природоохоронного пріоритету, який визначається переважно природними чинниками, ризик для населення та інфраструктури має сильно контрастний просторовий розподіл: він близький до нуля на територіях без людей чи інфраструктури (навіть при високій LSA) і набуває значущих значень лише у зонах перетину LSA з просторовою експозицією.

Класифікація ризику для населення та інфраструктури на п'ять класів виконується за рівними інтервалами: клас 1 ($< 0,2$), клас 2 ($0,2-0,4$), клас 3 ($0,4-0,6$), клас 4 ($0,6-0,8$), клас 5 ($\geq 0,8$).

Для базового полігону результативна карта ризику для населення та інфраструктури (рис. 5.8) показує такі особливості:

- зони дуже високого ризику для населення (клас 5) локалізуються у центральних частинах населених пунктів (Колочава, Усть-Чорна) поблизу схилів з високою LSA, а також у транспортних коридорах долини р. Теребля.
- зони високого ризику (клас 4) поширюються на прилеглих територіях до населених пунктів.

- зони середнього ризику (клас 3) охоплюють периферії сіл та основні транспортні коридори.

- сумарна частка території класів 4-5 - лише населені пункти та дороги.

Необхідно підкреслити, що сумарна частка території з ризиком для людей та інфраструктури класів 4–5 (9,0 %) значно менша за сумарну частку індексу природоохоронного пріоритету класів 4–5 (40,6 %). Ця різниця відображає

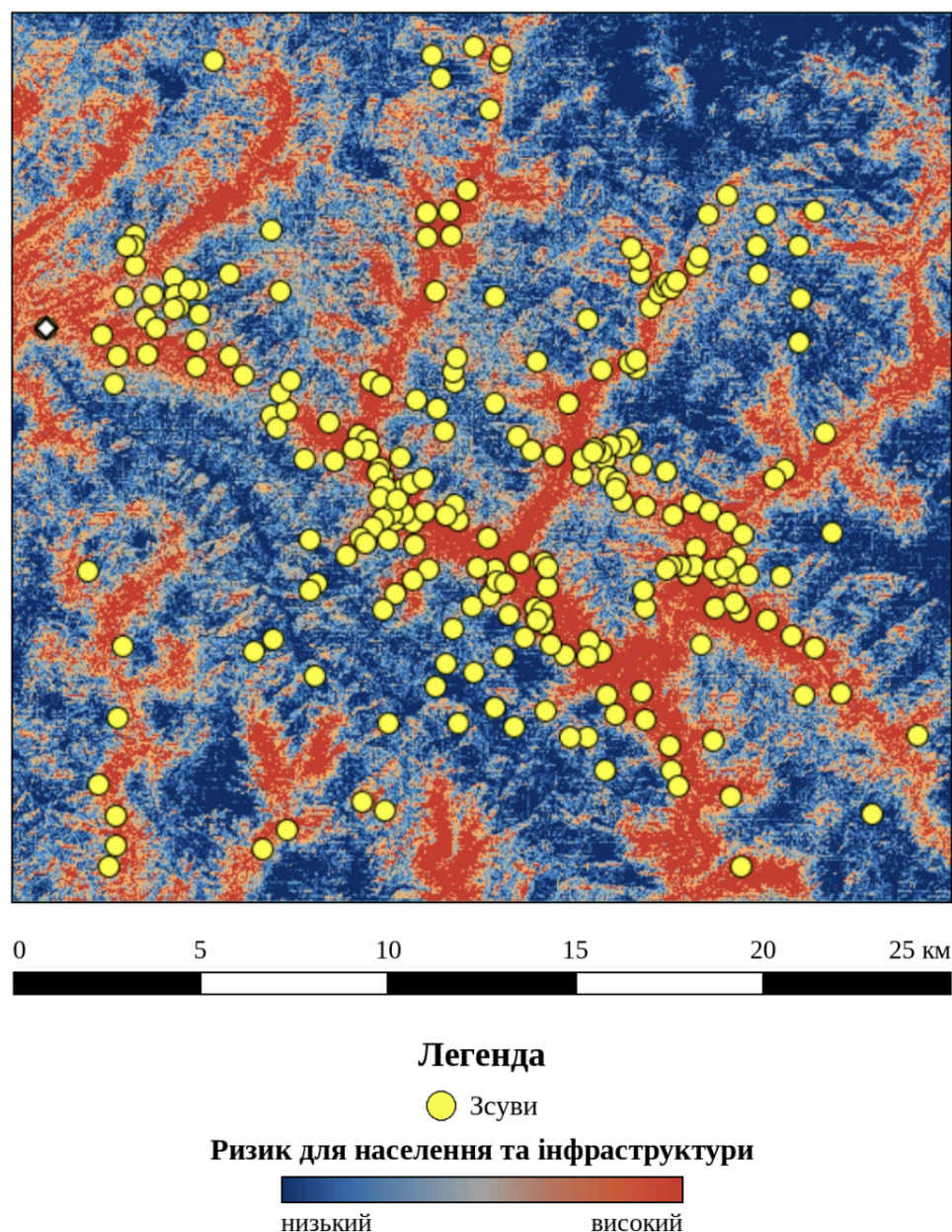


Рисунок 5.7 - Картографічні результати моделювання індексу зсувної сприйнятливості LSA для базового полігону «Теребля»

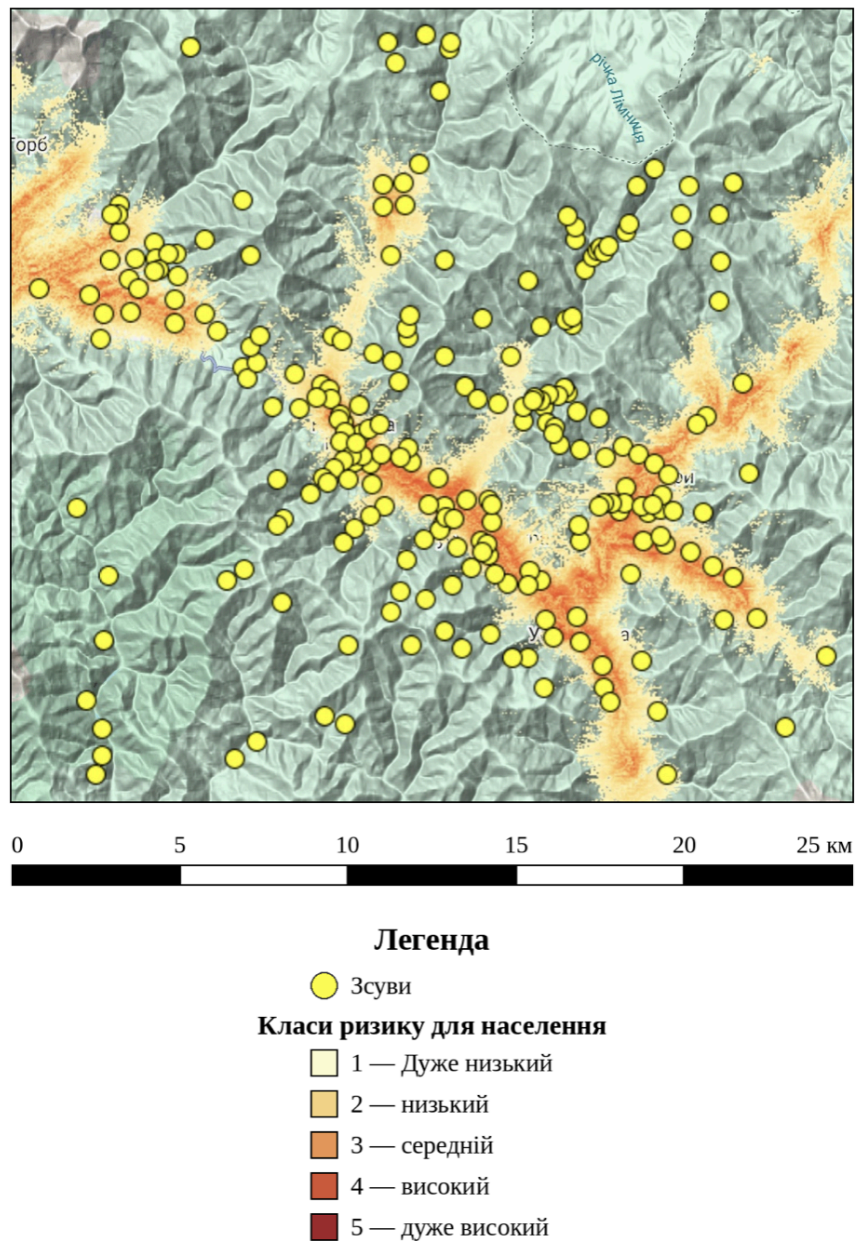


Рисунок 5.8 - Картографічні результати моделювання інтегрального ризику з класифікацією за класами ризику для населення та інфраструктури для базового полігону «Теребля»

справжню структуру розподілу ризиків у гірських районах: значну частину території займають природні території, що визначають індекси природоохоронного пріоритету, але лише мала частина території безпосередньо експонована до людських ризиків. Саме тому роздільне розглядання двох типів ризику є методично принципово важливим - воно дозволяє адекватно враховувати обидва аспекти у різних контекстах управлінських рішень. На рисунку 5.9

наведено картограму інтегрального ризику з класифікацією за класами ризику для населення та інфраструктури для додаткового експериментального полігону «Верховина». Згідно картограми середній, високий та дуже високий ризик спостерігається для значно більшої території, що зумовлено, як більшою площею експозиції населення та інфраструктури так і більшими площами LSA з високою та дуже високою сприйнятливістю. На рис. 5.10 наведено карту розподілу індексу природоохоронного пріоритету для полігону «Верховина».

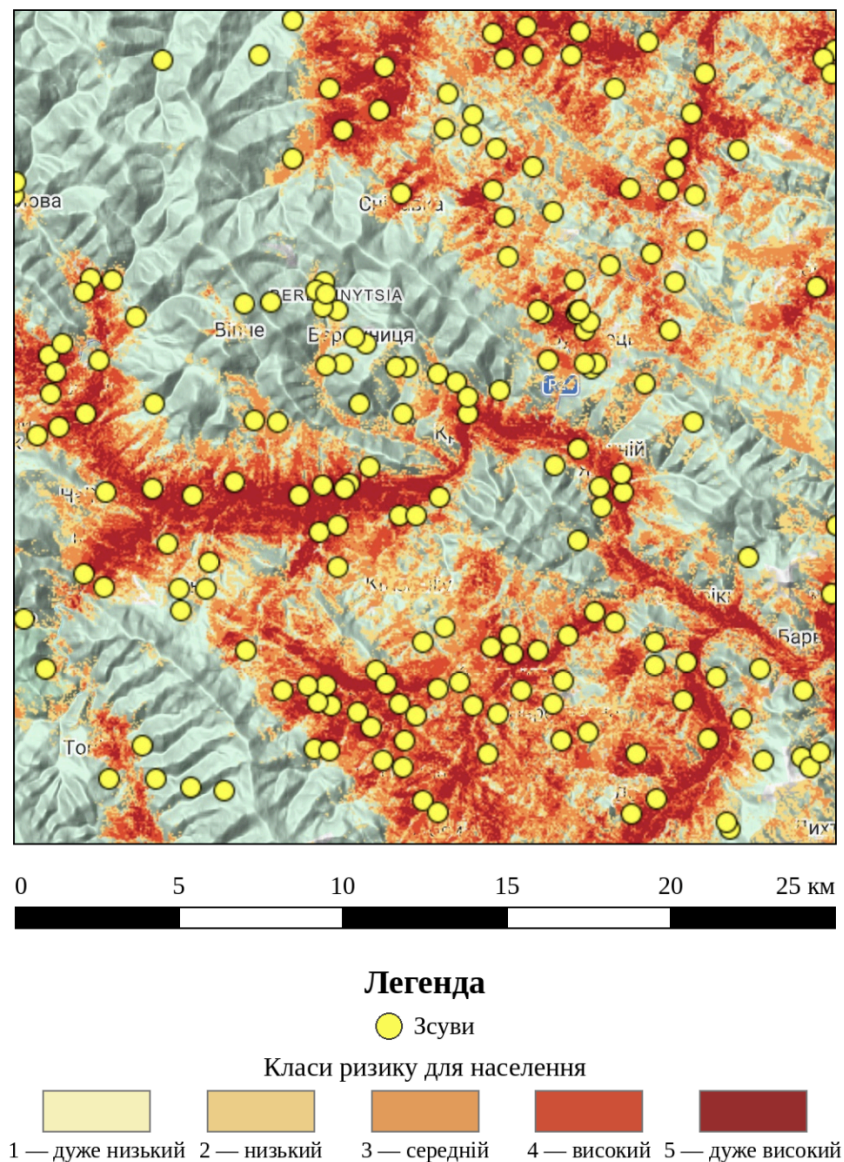


Рисунок 5.9 - Картографічні результати моделювання інтегрального ризику з класифікацією за класами ризику для населення та інфраструктури для додаткового експериментального полігону «Верховина»

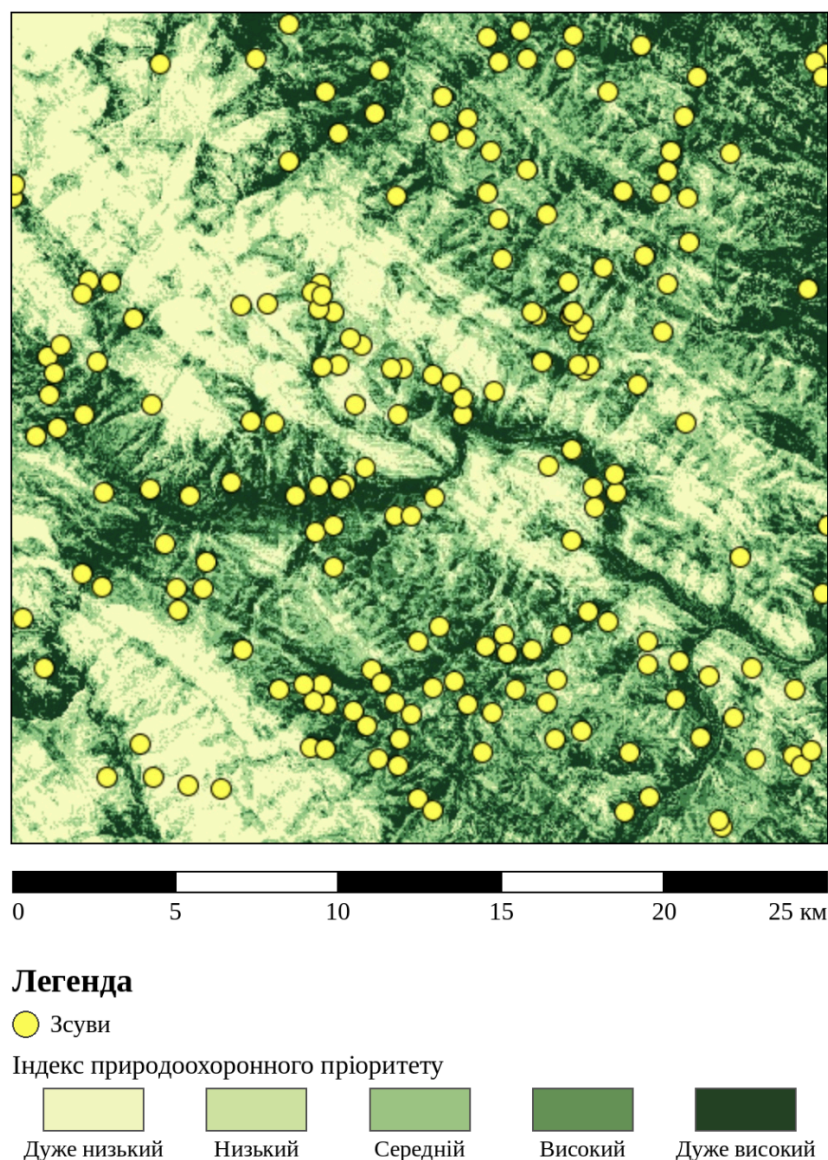


Рисунок 5.10 - Фінальна картограма індексу природоохоронного пріоритету

5.6 Практичні рекомендації з використання результатів моделювання для геоecологічного управління територіями Карпатського регіону

На основі отриманих карт зсувної сприйнятливості, індексу природоохоронного пріоритету та ризику для населення сформульовано практичні рекомендації щодо використання результатів дисертаційного дослідження для управління територіями Карпатського регіону. Рекомендації охоплюють п'ять основних напрямів: моніторинг екзогенних геологічних процесів, лісогосподарські заходи, територіальне планування, природоохоронну політику, адаптацію до кліматичних змін.

Розроблена карта LSA та карти ризику можуть бути використані для оптимізації розміщення моніторингових станцій у системі Державної служби геології та надр України та ДНВП «Геоінформ України»:

- у зонах високого та дуже високого LSA (класи 4–5, сумарно 40,2 % території полігону) рекомендовано запровадити моніторинг деформацій земної поверхні, наприклад за допомогою методу GNSS-інтерферометрії ;

- у зонах перетину високої LSA з високою експозицією до населення (класи 4–5) доцільно запровадити системи для раннього попередження активізації зсувів;

- розміщення метеорологічних станцій для моніторингу тригерних опадових подій слід планувати з урахуванням максимального покриття зон класів 4–5 LSA;

- у зонах LSA класу 5 (дуже висока сприйнятливість, ~20 % території) доцільно застосувати режим обмеженого лісокористування із додатковим регулюванням суцільних рубок головного користування та переорієнтацію на вибіркові рубки із збереженням кореневого каркасу;

- у межах прикрайових зон лісу (до 100 м від межі лісового масиву) необхідно уникати створення нових відкритих ділянок, а натомість стимулювати природне поновлення для поступового розширення лісових масивів;

- для лісових доріг рекомендується впровадження водовідведення, попередження формування лінійних ерозійних врізів, обов'язкова рекультивація тимчасових волоків після завершення лісозаготівель;

- поступовий перехід у Карпатах від штучних смерекових монокультур до природних мішаних буково-ялицевих формацій, особливо на схилах LSA 4–5, що підвищить стабілізуючу функцію лісового покриву та зменшить вразливість до кліматично зумовлених всихань.

Карта ризику для населення також може бути основою для інтеграції зсувної сприйнятливості у практику територіального планування:

- у зонах високого ризику для населення та інфраструктури доцільно запровадити обов'язкове проведення детальних інженерно-геологічних вишукувань перед погодженням проектів будівництва;

- для існуючої житлової забудови у зонах класу 4–5 ризику для населення доцільно планувати інженерно-технічні заходи захисту (дренажні системи, армування схилів, протизсувні стіни);

- нові лінійні інфраструктурні об'єкти (дороги, трубопроводи, ЛЕП) слід проектувати з врахуванням карти LSA.

Карта індексу природоохоронного пріоритету створює основу для пріоритизації природоохоронних заходів:

- у межах природно-заповідних територій Карпатського регіону (Карпатський біосферний заповідник, НПП «Синевир», НПП «Сколівські Бескиди», Ужанський НПП та ін.) рекомендується систематична інвентаризація зон класів 4–5 з розробкою планів захисту;

- перспективним є включення карт індексу природоохоронного пріоритету як обов'язкового елементу у проектну документацію при оголошенні нових об'єктів природно-заповідного фонду у межах Карпатського регіону;

- моніторинг стану зсувно-ерозійних процесів у заповідних територіях має бути інтегрованим з загальною системою моніторингу довкілля;

- природоохоронні зони з високим природоохоронним статусом території можуть слугувати природними «коридорами» між окремими об'єктами заповідної мережі, що вимагає їх спеціального управління.

З урахуванням прогнозованого посилення зсувної активності внаслідок змін клімату (розділ 1.4) розроблена модель LSA має потенціал для інтеграції з кліматичними сценаріями:

- перспективним є доповнення моделі LSA часовою компонентою на основі тригерних опадових порогів, що дозволить отримати карти зсувної небезпеки з прогнозом для різних сценаріїв екстремальних опадів;

- для довгострокового планування адаптації рекомендується поєднання карт LSA з прогнозами кліматичних змін з CMIP6 (сценарії SSP2-4.5, SSP5-8.5) для оцінки очікуваного зростання зсувної небезпеки до 2050–2100 рр;

- регулярне оновлення моделі (кожні 3–5 років) з врахуванням нових даних про зсувні прояви та актуалізованого стану лісового покриву забезпечить її підтримання у актуальному стані;

- для окремих басейнів Українських Карпат (Теребля, Тересва, Ріка, Тиса, Чорний Черемош, Прут) рекомендується розробка басейнових адаптаційних стратегій з використанням моделі LSA як базового інформаційного ресурсу.

Розроблена у дисертаційному дослідженні модель індексу природоохоронного пріоритету є відтворюваною на платформі Google Earth Engine та може бути адаптована до інших територій Українських Карпат за наявності базових даних (кадастру зсувних проявів, даних дистанційного зондування Землі і інформації щодо геологічних та гідрологічних факторів) та з урахуванням природних особливостей території. Перспективні напрями впровадження включають:

- поширення розробленого підходу на інші зсувонебезпечні регіони України потребує попередньої адаптації та перекалібровки моделі з урахуванням регіональної специфіки геологічних умов, доступності вхідних даних і повторного налаштування факторних шарів, за умови такої адаптації модель може слугувати основою для регіональних картографічних сервісів зсувної небезпеки;

- впровадження моделі у навчальні програми закладів вищої освіти геоекологічного спрямування;

- розробка регіональних довідників з лісогосподарського управління у зсувонебезпечних зонах Карпат з урахуванням результатів моделювання.

Висновки до розділу 5

За результатами розробки моделі геоекологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території сформульовано такі висновки.

1. Розроблено комплексну методологічну архітектуру оцінки індексів природоохоронного пріоритету, що розподіляє ризик на два доповнювані, але методично різні види: індекс природоохоронного пріоритету (оцінює потенційні

втрати природних екосистем і ландшафтів) та ризик для населення (оцінює потенційні втрати людей і антропогенних об'єктів). Така роздільна структура забезпечує адекватне врахування обох аспектів при прийнятті управлінських рішень.

2. Блок просторової експозиції сформовано на основі трьох компонентів: експозиції населення, експозиції забудови, експозиції дорожньої мережі.

3. Блок вразливості населення обчислюється через показник частки залежних вікових груп (діти до 14 років і особи старше 65 років). Алгоритм включає маскування за умовою наявності населення у пікселі, що запобігає випадкам обчислення у незаселених територіях. Класифікація на 5 класів за фіксованими порогоми забезпечує інтерпретацію вразливості.

4. Запропонований показник природоохоронного статусу території (NPS) сформовано на основі офіційних охоронних статусів об'єктів природно-заповідного фонду з міжнародної бази даних WDPA (UNEP-WCMC, травень 2026) з експертним забезпеченням відповідністю даних до системи IUCN Protected Area Categories. Запропонована шкала NPS-значень (від 0,20 для територій поза ПЗФ до 1,00 для біосферних заповідників та об'єктів Світової спадщини ЮНЕСКО) верифікована через відкриті структуровані дані Wikidata (241 український ПЗФ-об'єкт з визначеною IUCN-категорією).

5. Розраховано інтегральний індекс природоохоронного пріоритету, який показав, що для території досліджень у верхів'ях р. Тересія 40,6 % площі припадає на класи 4–5 індексу природоохоронного пріоритету, які локалізуються переважно у центральних частинах лісових масивів з високою профільною кривизною та близькістю до водотоків.

6. Обчислений інтегральний ризик для населення відображено на карті для базового полігону, яка показує, що близько 9,0 % території припадає на класи 4–5 ризику для населення, локалізованих переважно у центральних частинах населених пунктів Колочава, Усть-Чорна, Німецька Мокра та у прилеглих транспортних коридорах долини р. Тересія.

7. Виражена різниця просторового розподілу двох типів ризику, а саме 40,6 % території з високим ризиком для ПЗФ проти 9,0 % території з високим ризиком для населення та інфраструктури, відображає справжню структуру розподілу ризиків у гірських районах Карпат. Значно більша частка території під ризиком для природних екосистем порівняно з малою часткою території під ризиком для населення, оскільки населення концентрується переважно у долинах головних річок, тоді як зсувно-сприйнятливі території розподілені переважно у безлюдних лісових масивах із високим природоохоронним статусом.

8. Сформульовано практичні рекомендації щодо використання результатів моделювання у п'яти основних напрямках - покращення системи моніторингу небезпечних екзогенних геологічних процесів, оптимізація лісогосподарських заходів, наприклад обмеження суцільних рубок у зонах класів 4–5 LSA, збереження буферних лісових смуг, перехід до мішаних деревостанів, удосконалення територіального планування, природоохоронної політики.

9. Розроблена модель індексу природоохоронного пріоритету є відтворюваною на платформі Google Earth Engine та може бути адаптована до інших територій Українських Карпат з урахуванням особливостей розвитку зсувних процесів для них. Перспективні напрями впровадження включають створення національного картографічного сервісу зсувної сприйнятливості, включення отриманих результатів у навчальні програми закладів вищої освіти, розробку регіональних довідників з лісогосподарського управління у зсувонебезпечних зонах Карпат.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення актуального науково-прикладного завдання геоекологічної оцінки ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території на прикладі Українських Карпат. У результаті виконаного дослідження сформульовано такі основні висновки.

1. На основі аналізу сучасних вітчизняних та міжнародних наукових джерел встановлено, що зсувні процеси є одним із провідних типів екзогенних геологічних процесів в Українських Карпатах. Найбільш поширеними є мілкі зсуви-спливи у флішових товщах, що активізуються під час інтенсивних атмосферних опадів. Визначено, що у чинних регіональних моделях зсувної сприйнятливості лісовий покрив найчастіше враховується у спрощеному бінарному вигляді «ліс / не ліс», що є недостатнім для Карпатського регіону з його високою лісистістю (50–70 %) та значними історичними трансформаціями лісового покриву. Це вказує на необхідність розробки комплексного кількісного підходу до параметризації лісу як самостійного структурного блоку моделі зсувної сприйнятливості.

2. Виконано фізико-географічну та геоекологічну характеристику території дослідження, охоплену базовим полігоном 25×25 км у верхів'ях р. Теребля (236 зсувних проявів), додатковим полігоном у Верховинському районі Івано-Франківщини (190 проявів) та розширеним ретроспективним полігоном 75×75 км (1509 проявів). Встановлено, що флішова геологічна будова з характерними літологічними неоднорідностями, середньогірський рельєф з крутизною схилів $20\text{--}40^\circ$, інтенсивні опади (1200+ мм/рік для базового полігону) та значна антропогенна трансформація лісів у період 2000–2010 рр. у сукупності формують комплекс передумов для розвитку зсувних процесів та визначають необхідність комплексного геоекологічного моделювання.

3. На основі теоретичного аналізу та емпіричних результатів розглянуто систему з шести кількісних показників лісового блоку моделі зсувної

сприйнятливості: близькість до межі лісу, щільність лісового покриву, тип лісу, амплітуда NDVI, втрати лісу за період 2001–2023 рр., частка лісу вище по схилу. Кожен показник описує окремий аспект стану або динаміки лісу і ґрунтується на сучасних глобальних продуктах дистанційного зондування Землі. Запропоновано показник частки лісу на території вище по схилу відносно зсувного прояву, що відображає просторову характеристику лісового покриву відносно рельєфу схилу. Така деталізація врахування лісового покриву при розрахунку зсувної сприйнятливості територій є новим підходом до геоінформаційного моделювання ризиків розвитку зсувних процесів.

4. На основі супутникових даних Landsat за 1990–2020 рр. досліджено просторово-часову динаміку лісового покриву зсувонебезпечних територій: для Закарпатського полігону лісистість змінювалася у послідовності 71 % у 1990 р., 69 % у 2000, 63 % для 2005, 62 % - 2010, 67 % для 2015 р., 70 % - 2020, з вираженою деградацією у 2000–2010 рр. та частковим відновленням після 2010 р. На прикладі тестового полігону у межах території Українських Карпат встановлено закономірність щодо просторової приуроченості зсувних проявів до прикрайових зон лісових масивів, яка полягає у локалізації зсувних процесів до меж лісового покриву, що підтверджує підвищену зсувну сприйнятливість перехідних зон між зімкнутим деревостаном і відкритими територіями. Буферний аналіз стану лісового покриву у 100-метровому радіусі навколо зсувних проявів показав, що для ділянки досліджень у Закарпатті 145 зсувів (61 %) із 236 знаходяться поблизу ділянок з порушеннями лісу, для ділянки досліджень у Івано-Франківській області цей показник становить 84 %. Ці результати емпірично доводять, що стан лісового покриву у межах 100-метрової зони навколо зсуву є інформативною характеристикою зсувної небезпеки.

5. Сформовано інформаційну базу дослідження на основі кадастрових даних ДНВП «Геоінформ України» про зсувні прояви та комплексу різночасових даних дистанційного зондування Землі для території Українських Карпат - цифрової моделі рельєфу ALOS AW3D30, гідрологічного продукту MERIT Hydro, шарів лісового покриву (ESA WorldCover, Hansen GFC, Copernicus CGLS-LC100,

Sentinel-2), а також шарів експозиції населення та забудови (WorldPop, JRC GHSL). Усю інформаційну базу інтегровано й опрацьовано на хмарній платформі Google Earth Engine, що забезпечує відтворюваність і масштабованість запропонованого підходу при умові врахування особливостей розвитку зсувних процесів для інших територій.

6. Розглянуто систему з 14 факторних характеристик індексної моделі зсувної сприйнятливості (LSA), згрупованих у п'ять тематичних блоків - морфометричний, гідрологічний, лісовий, геологічний та кліматичний. Уперше для території Українських Карпат лісовий покрив виокремлено як самостійний структурний блок моделі з кількісною параметризацією через шість показників

7. Розроблено та реалізовано на платформі Google Earth Engine модель розрахунку зсувної сприйнятливості, що поєднує метод частотного співвідношення для калібрування факторних шарів і метод Random Forest Feature Importance для об'єктивного визначення вагових коефіцієнтів. За результатами оцінки мультиколінеарності факторів і оцінювання інформативності предикторів виявлено тісну кореляцію абсолютної висоти та середньорічної суми опадів. Це дозволило встановити оптимальний набір з десяти факторів, причому лісовий блок у підсумковій моделі представлений трьома найінформативнішими показниками - близькістю до межі лісу, щільністю лісу та типом лісу. Зважування методом Random Forest дозволило отримати такий сумарний внесок тематичних блоків факторів - морфометричний внесок становить 49,7%, лісовий - 25,9%, геологічний - 14,2%, гідрологічний - 10,3 %.

8. Застосування багатовимірних статистичних методів, а саме кластерного аналізу K-means, кореляційного аналізу, експлораторного факторного аналізу із varimax-обертанням та методу головних компонент дозволяє отримати результати, які свідчать про відсутність критичної мультиколінеарності між предикторами та підтверджують, що формування зсувної небезпеки в Українських Карпатах визначається взаємодією двох основних комплексів природних факторів - висотно-кліматичного та схилово-лісового. Така структура є узгодженою з концептуальною архітектурою моделі оцінки зсувної сприйнятливості та

підтверджує доцільність комплексного врахування морфометричних, гідрологічних і лісових характеристик території.

9. Виконано валідацію моделі на незалежній тестовій вибірці із застосуванням просторово-блокового принципу поділу вихідних даних за результатами якої встановлено, що 88,1 % тестових зсувів потрапили до класів середньої, високої та дуже високої сприйнятливості за коефіцієнтів просторового збагачення 2,57 для класу 5 і 1,32 для класу 4. Розрахована універсальна метрика якості оцінки моделей бінарної класифікації (AUC ROC) для повної вибірки точок зсувів, яка становить 0,72, що відповідає категорії «добра якість».

10. Розроблено комплексну методику геоекологічної оцінки ризику розвитку зсувних процесів, що реалізує компонентну модель ризику у двох паралельних варіантах індекс природоохоронного пріоритету та ризик для населення та інфраструктури. Запропоновано показник природоохоронного статусу території (NPS) на основі бази World Database on Protected Areas з експертним зіставленням даних до системи категорій IUCN Protected Area Categories, верифікованим за відкритими структурованими даними Wikidata. Підсумкові карти ризику побудовано у середовищі Google Earth Engine з класифікацією на п'ять класів. Це дозволило удосконалити методику оцінки ризиків внаслідок розвитку зсувів через розрахунок індексу природоохоронного пріоритету на основі запропонованого показника природоохоронного статусу територій (NPS) та ризику для населення, які враховують змодельовану зсувну сприйнятливість територій, що дозволяє забезпечити просторову пріоритизацію моніторингу зсувонебезпечних зон в Українських Карпатах.

11. Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що одержані карти сприйнятливості й ризику доцільно використовувати для пріоритизації моніторингу зсувонебезпечних територій у межах національної системи моніторингу екзогенних геологічних процесів, для обґрунтування лісогосподарських заходів, підтримки рішень із територіального планування, адаптації до змін клімату та збереження біорізноманіття гірських екосистем. Реалізація методики на хмарній платформі GEE дозволяє суттєво звузити коло

пріоритетних для моніторингу ділянок ще до стадії польових вишукувань і тим самим підвищити ефективність прийняття управлінських та природоохоронних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Varnes D. J. Slope movement types and processes. Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176. Washington, D.C. : National Academy of Sciences, 1978. P. 11–33.
2. Cruden D. M., Varnes D. J. Landslide types and processes. Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board Special Report 247 / eds. A. K. Turner, R. L. Schuster. Washington, D.C. : National Academy Press, 1996. P. 36–75.
3. Highland L. M., Bobrowsky P. The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia : U. S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129 p.
4. Kirschbaum D. B., Stanley T., Zhou Y. Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*. 2015. Vol. 249. P. 4–15. doi:10.1016/j.geomorph.2015.03.016.
5. Guzzetti F., Mondini A. C., Cardinali M., Fiorucci F., Santangelo M., Chang K.-T. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*. 2012. Vol. 112, № 1–2. P. 42–66. doi:10.1016/j.earscirev.2012.02.001.
6. Cascini L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102, № 3–4. P. 164–177. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.016.
7. Froude M. J., Petley D. N. Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18, № 8. P. 2161–2181. doi:10.5194/nhess-18-2161-2018.
8. Van Den Eeckhaut M., Hervás J. State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk. *Geomorphology*. 2012. Vol. 139–140. P. 545–558. doi:10.1016/j.geomorph.2011.12.006.
9. Günther A., Van Den Eeckhaut M., Malet J.-P., Reichenbach P., Hervás J. Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide

information. Geomorphology. 2014. Vol. 224. P. 69–85. doi:10.1016/j.geomorph.2014.07.011.

10. Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. Київ : Державна служба геології та надр України, ДНВП «Геоінформ України», 2023. 97 с.

11. Прогнозування зсувів : монографія / за ред. Е. Д. Кузьменка. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2016. 601 с.

12. Ковальчук І. П., Штойко П. І., Єргіна О. І. Екстремальні екзогенні процеси в Українських Карпатах: ретроспективний аналіз та моделювання. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2008. 215 с.

13. Штогрин Л. В., Касіяничук Д. В., Бараніченко В. В., Штогрин М. В. Геоінформаційний аналіз природних чинників формування зсувів у регіоні складчастих Карпат (у межах Закарпатської області). Ecological Safety and Balanced Use of Resources. 2023. Т. 14, № 1 (27). С. 75–84.

14. Стратегічна екологічна оцінка та прогноз стану довкілля Західного регіону України : у 2 т. Т. 1 / Г. І. Рудько, О. М. Адаменко, Л. В. Міщенко; ред.: Г. І. Рудько, О. М. Адаменко; Держ. коміс. України по запасах корис. копалин, Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. - Київ, 2017. - 471 с.

15. Рудько Г. І., Адаменко О. М. Конструктивна геоєкологія : наукові основи та практичне втілення : монографія. Чернівці : Маклаут, 2008. 320 с.

16. Кузьменко Е. Д., Штогрин Л. В., Чепурний І. В. Аналіз впливу геологічної будови гірських порід на характеристики зсувів. Геодинаміка. 2014. № 2. С. 112–124.

17. Ivanik O., Hadiatska K., Kravchenko D., Maslun N., Pochaievets O., Petrenko M. Landslide Inventories and Key Hazard Drivers in the Ukrainian Carpathians: The Upper Latoritsa Basin Case. 5th EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities. European Association of Geoscientists & Engineers, 2025. Vol. 2025, issue 1. P. 1–5.

18. Пилипович О.В., Ковальчук І.П. Геоєкологія річково-басейнової території Верхнього Дністра. Львів ; Київ : ЛНУ ім. Івана Франка, 2017. - 284 с.
19. Екологічна безпека територій : колективна монографія / Я. О. Адаменко, О. М. Адаменко, Л. М. Архипова [et al.] ; Адаменко Я. О., Адаменко О. М., ред. – Івано-Франківськ : Голіней, 2014. – 442 с.
20. Захист гірських автомобільних доріг від зсувів (на прикладах гірських регіонів України)./ Під редакцією М.Д. Круцика. - Коломия : Вік, 2003. - 425 с.
21. Касіянчук Д. В., Штогрин Л. В. 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. doi:10.33002/nr2581.6853.040306.
22. Журавель О. М. Геоінформаційна система регіонального просторового прогнозування зсувної небезпеки для адміністративної області (на прикладі Івано-Франківської області) : дис. канд. геол. наук : 21.06.01 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2013. 138 с.
23. Гошовський С. В., Рудько Г. І., Блінов П. В. Інженерно-геологічний аналіз, моніторинг та захист територій від зсувів. Львів : ЗУКЦ, 2004. 152 с.
24. IPCC. Climate Change 2021 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. V. Masson-Delmotte et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 2391 p.
25. Gariano S. L., Guzzetti F. Landslides in a changing climate. Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 162. P. 227–252. doi:10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
26. Архипова Л. М. Природно-техногенна безпека гідроекосистем : монографія. Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - 2011.- 366 с.
27. Корчемлюк М., Приходько П., Архипова Л. Вплив змін клімату на водний режим гірської частини басейну р. Прут. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2016. № 1. С. 118–128.
28. Державна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні. Київ : Державна служба України з надзвичайних ситуацій, 2022. 468 с.

29. Stanley T., Kirschbaum D. B. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Natural Hazards*. 2017. Vol. 87, № 1. P. 145–164. doi:10.1007/s11069-017-2757-y.
30. Terzaghi K. Mechanism of landslides. *Application of Geology to Engineering Practice* / ed. S. Paige. New York : Geological Society of America, 1950. P. 83–123.
31. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*. 2014. Vol. 11, № 2. P. 167–194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
32. Іванік О., Шевчук В., Кравченко Д., Гадяцька К. Національна база даних зсувних процесів: принципи розробки, упровадження та застосування для оцінки зсувної небезпеки регіонального та локального рівня. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2019. № 3. С. 70–74.
33. Дослідження зсувних процесів геофізичними методами : монографія / Е. Д. Кузьменко, А. Ф. Безсмертний, О. П. Вдовина ; Кузьменко Е. Д., ред. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ Факел, 2009. – 417 с.
34. Duncan J. M., Wright S. G., Brandon T. L. *Soil Strength and Slope Stability*. 2nd ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, 2014. 336 p.
35. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York : McGraw-Hill, 1980. 287 p.
36. Ayalew L., Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*. 2005. Vol. 65, № 1–2. P. 15–31. doi:10.1016/j.geomorph.2004.06.010.
37. Lee S., Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*. 2007. Vol. 4, № 1. P. 33–41. doi:10.1007/s10346-006-0047-y.
38. 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. doi:10.1016/j.earscirev.2018.03.001.
39. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324.

40. Catani F., Lagomarsino D., Segoni S., Tofani V. Landslide susceptibility estimation by random forests technique : sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 13, № 11. P. 2815–2831. doi:10.5194/nhess-13-2815-2013.
41. Merghadi A., Yunus A. P., Dou J., Whiteley J., ThaiPham B., Bui D. T., Avtar R., Abderrahmane B. Machine learning methods for landslide susceptibility studies : A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 207. Article 103225. doi:10.1016/j.earscirev.2020.103225.
42. Montgomery D. R., Dietrich W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*. 1994. Vol. 30, № 4. P. 1153–1171. doi:10.1029/93WR02979.
43. Pourghasemi H. R., Kornejady A., Kerle N., Shabani F. Investigating the effects of different landslide positioning techniques, landslide partitioning approaches, and presence-absence balances on landslide susceptibility mapping. *Catena*. 2020. Vol. 187. Article 104364. doi:10.1016/j.catena.2019.104364.
44. Wulder M. A., Loveland T. R., Roy D. P., Crawford C. J., Masek J. G., Woodcock C. E., Allen R. G., Anderson M. C., Belward A. S., Cohen W. B., et al. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. P. 127–147. doi:10.1016/j.rse.2019.02.015.
45. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25–36. doi:10.1016/j.rse.2011.11.026.
46. 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. doi:10.1016/j.rse.2017.06.031.
47. Давибіда 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. doi:10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86.

48. 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. European Association of Geoscientists & Engineers, 2025. Vol. 2025, issue 1. P. 1–5.

49. Brenning A. Spatial prediction models for landslide hazards : review, comparison and evaluation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2005. Vol. 5, № 6. P. 853–862. doi:10.5194/nhess-5-853-2005.

50. Schratz P., Muenchow J., Iturritxa E., Richter J., Brenning A. Hyperparameter tuning and performance assessment of statistical and machine-learning algorithms using spatial data. *Ecological Modelling*. 2019. Vol. 406. P. 109–120. doi:10.1016/j.ecolmodel.2019.06.002.

51. Sidle R. C., Ochiai H. Landslides : Processes, Prediction, and Land Use. *Water Resources Monograph Series*. Washington, D.C. : American Geophysical Union, 2006. Vol. 18. 312 p. doi:10.1029/WM018.

52. Sidle R. C., Pearce A. J., O'Loughlin C. L. Hillslope Stability and Land Use. *Water Resources Monograph Series*. Washington, D.C. : American Geophysical Union, 1985. Vol. 11. 140 p. doi:10.1029/WM011.

53. Van Westen C. J., Castellanos E., Kuriakose S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment : An overview. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102, № 3–4. P. 112–131. doi:10.1016/j.enggeo.2008.03.010.

54. 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., et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6160. P. 850–853. doi:10.1126/science.1244693.

55. Stokes A., Douglas G. B., Fourcaud T., Giadrossich F., Gillies C., Hubble T., Kim J. H., Loades K. W., Mao Z., McIvor I. R., et al. Ecological mitigation of hillslope instability : ten key issues facing researchers and practitioners. *Plant and Soil*. 2014. Vol. 377, № 1–2. P. 1–23. doi:10.1007/s11104-014-2044-6.

56. Sidle R. C., Bogaard T. A. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-Science Reviews*. 2016. Vol. 159. P. 275–291. doi:10.1016/j.earscirev.2016.05.013.

57. Ziemer R. R. Roots and the stability of forested slopes. *Erosion and Sediment Transport in Pacific Rim Steeplands*. Christchurch, New Zealand : International Association of Hydrological Sciences Publication 132, 1981. P. 343–361.

58. Moos C., Bebi P., Graf F., Mattli J., Rickli C., Schwarz M. How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides? *Earth Surface Processes and Landforms*. 2016. Vol. 41, № 7. P. 951–960. doi:10.1002/esp.3887.

59. 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. 250–264. doi:10.1016/j.geomorph.2017.04.024.

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

61. 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, № 6. P. 1670–1698. doi:10.1007/s11629-021-7254-9.

62. 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. doi:10.3997/2214-4609.2024510017.

63. 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. doi:10.3997/2214-4609.2025510172.

64. Schwarz M., Preti F., Giadrossich F., Lehmann P., Or D. Quantifying the role of vegetation in slope stability : A case study in Tuscany (Italy). *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36, № 3. P. 285–291. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.06.014.

65. Buchhorn M., Lesiv M., Tsendbazar N.-E., Herold M., Bertels L., Smets B. Copernicus Global Land Cover Layers - Collection 2. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 6. Article 1044. doi:10.3390/rs12061044.

66. Шпарик Ю. С., Вітер Р. М. Динаміка стану лісів українських Карпат за даними моніторингу в 2010–2014 роках. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Т. 25, № 2. С. 31–36.

67. Шпарик Ю. С., Парпан В. І., Токар В. І. Методологія виділення водозборів для ведення лісового господарства в українських Карпатах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2014. Т. 24, № 9. С. 14–21.

68. Стойко С., Койнова І. Антропогенна трансформація природних екосистем Українських Карпат та програма сталого розвитку. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2014. Вип. 45. С. 49–63.

69. Голубець М. А. Біотична різноманітність і наукові підходи до її збереження. Львів : Ліга-Прес, 2003. 316 с.

70. Caine N. The rainfall intensity - duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*. 1980. Vol. 62, № 1–2. P. 23–27. doi:10.1080/04353676.1980.11879996.

71. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C. P. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows : an update. *Landslides*. 2008. Vol. 5, № 1. P. 3–17. doi:10.1007/s10346-007-0112-1.

72. Peruccacci S., Brunetti M. T., Gariano S. L., Melillo M., Rossi M., Guzzetti F. Rainfall thresholds for possible landslide occurrence in Italy. *Geomorphology*. 2017. Vol. 290. P. 39–57. doi:10.1016/j.geomorph.2017.03.031.

73. Осадчий В. І., Бабіченко В. М., Набиванець Ю. Б., Скриник О. Я. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень. Київ : Ніка-Центр, 2013. 307 с.

74. Iverson R. M. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*. 2000. Vol. 36, № 7. P. 1897–1910. doi:10.1029/2000WR900090.
75. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, № 730. P. 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803.
76. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., et al. ERA5-Land : A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13, № 9. P. 4349–4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021.
77. Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., Rowland J., Harrison L., Hoell A., Michaelsen J. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*. 2015. Vol. 2. Article 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66.
78. Huffman G. J., Bolvin D. T., Braithwaite D., Hsu K., Joyce R., Kidd C., Nelkin E. J., Sorooshian S., Tan J., Xie P. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 6. NASA/GSFC, 2020. 38 p.
79. Elmqvist T., Folke C., Nyström M., Peterson G., Bengtsson J., Walker B., Norberg J. Response diversity, ecosystem change, and resilience. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2003. Vol. 1, № 9. P. 488–494. doi:10.1890/1540-9295(2003)001[0488:RDECAR]2.0.CO;2.
80. Lugo A. E., Zimmerman J. K. Ecological life histories. *Tropical Tree Seed Manual* / ed. J. Vozzo. Washington, D.C. : USDA Forest Service, 2002. P. 191–213.
81. Guariguata M. R. Landslide disturbance and forest regeneration in the Upper Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Journal of Ecology*. 1990. Vol. 78, № 3. P. 814–832. doi:10.2307/2260901.
82. Walker L. R., Shiels A. B. *Landslide Ecology*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2012. 316 p.

83. Природно-заповідний фонд України : території та об'єкти загальнодержавного значення. Київ : ТОВ «Київська політехніка», 2009. 332 с.
84. Крамарець В. О. Біорізноманіття лісів Карпатського регіону: структура, динаміка, збереження. Львів : Національний лісотехнічний університет України, 2016. 256 с.
85. Олійник В.С., Ткачук О.М. Захисна роль лісів Передкарпаття: монографія / В.С. Олійник, О.М. Ткачук. – Івано-Франківськ: НАІР, 2021. 160 с.
86. Голубець М. А. Ретроспектива і перспектива лісової типології. Львів : Поллі, 2007. 78 с.
87. Приходько М. М. Екологічна безпека природних і антропогенно модифікованих геосистем : монографія. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2013. 201 с.
88. Uhlemann S., Smith A., Chambers J., Dixon N., Dijkstra T., Haslam E., Meldrum P., Merritt A., Gunn D., Mackay J. Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations. *Geomorphology*. 2016. Vol. 253. P. 438–451. doi:10.1016/j.geomorph.2015.10.027.
89. Intrieri E., Carlà T., Gigli G. Forecasting the time of failure of landslides at slope-scale: A literature review. *Earth-Science Reviews*. 2019. Vol. 193. P. 333–349. doi:10.1016/j.earscirev.2019.03.019.
90. Crosta G. B., Agliardi F. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal*. 2003. Vol. 40, № 1. P. 176–191. doi:10.1139/t02-085.
91. Mondini A. C., Guzzetti F., Chang K.-T., Monserrat O., Martha T. R., Manconi A. Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar : Past, present and future. *Earth-Science Reviews*. 2021. Vol. 216. Article 103574. doi:10.1016/j.earscirev.2021.103574.
92. Casagli N., Intrieri E., Tofani V., Gigli G., Raspini F. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth and Environment*. 2023. Vol. 4, № 1. P. 51–64. doi:10.1038/s43017-022-00373-x.

93. Kolesnikov J., Zhurawel O., Trevoho I. InSAR monitoring of slow-moving landslides in the Ukrainian Carpathians using Sentinel-1 time series. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2023. Vol. 97. P. 42–54.

94. James M. R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2012. Vol. 117, № F3. Article F03017. doi:10.1029/2011JF002289.

95. Mondini A. C., Santangelo M., Rocchetti M., Rossetto E., Manconi A., Monserrat O. Sentinel-1 SAR amplitude imagery for rapid landslide detection. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, № 7. Article 760. doi:10.3390/rs11070760.

96. Sidle R. C., Ziegler A. D., Negishi J. N., Nik A. R., Siew R., Turkelboom F. Erosion processes in steep terrain - Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management*. 2006. Vol. 224, № 1–2. P. 199–225. doi:10.1016/j.foreco.2005.12.019.

97. Pierson T. C. Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds. *U.S. Geological Survey Fact Sheet*. 2005. Vol. 2004-3142. 4 p.

98. Skempton A. W., Hutchinson J. N. Stability of natural slopes and embankment foundations. *Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Volume*. Mexico : Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1969. P. 291–340.

99. Montgomery D. R., Schmidt K. M., Dietrich W. E., McKean J. Instrumental record of debris flow initiation during natural rainfall: Implications for modeling slope stability. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2009. Vol. 114. Article F01031. doi:10.1029/2008JF001078.

100. Wolman M. G., Miller J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*. 1960. Vol. 68, № 1. P. 54–74. doi:10.1086/626637.

101. Пилипович О., Михнович А. Сучасні процеси рельєфоутворення у басейні річки Орява (лівий доплив Опору). Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2016. № 1. С. 194–205.
102. Tropeano D., Turconi L. Using historical documents for landslide, debris flow and stream flood prevention. Applications in northern Italy. *Natural Hazards*. 2004. Vol. 31, № 3. P. 663–679. doi:10.1023/B:NHAZ.0000024897.71471.f2.
103. Kovalchuk I., Mykhnovych A., Pylypovych O., Rudko G. Extreme exogenous processes in the Ukrainian Carpathians. *Geomorphological Impacts of Extreme Weather: Case Studies from Central and Eastern Europe*. Dordrecht : Springer Netherlands, 2013. P. 53–66.
104. Гофштейн І. Д. Геоморфологічний нарис Українських Карпат. Київ : Наукова думка, 1995. 138 с.
105. Кліматогенні зміни рослинного світу Українських Карпат : монографія / за ред. Я. П. Дідуха, І. І. Чорнея. Чернівці : Друк Арт, 2016. 280 с.
106. Хільчевський В. К., Гребінь В. В. Водні об'єкти України та рекреаційне оцінювання якості води : навч. посібник. Київ : ДІА, 2022. 240 с.
107. Позняк С. П. Ґрунтознавство і географія ґрунтів : підручник. Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. 286 с.
108. Вялов С. С., Глушко В. В., Досин Г. Д. Тектоніка Українських Карпат. Київ : Наукова думка, 1988. 276 с.
109. Геологія і корисні копалини України : атлас-монографія / за ред. Л. С. Галецького. Київ : Географіка, 2001. 168 с.
110. Рудько Г. І., Гамеляк І. П. Основи загальної, інженерної та екологічної геології : навчальний посібник. Чернівці : Букрек, 2003. 423 с.
111. Тектонічна карта Українських Карпат. Масштаб 1 : 200 000 / ред. В. В. Глушко, С. С. Круглов. Київ : Мінгео 1986.
112. Пронишин Р. С., Кендзера О. В. Сейсмічність території України. *Геофизический журнал*. 2001. Т. 23, № 3. С. 3–13.

113. Ющенко Ю. С. Геогідроморфологічні закономірності розвитку руслових процесів у гірсько-річкових системах Карпат. Чернівці : Рута, 2005. 347 с.
114. 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, № 6. P. 5053–5073. doi:10.1029/2019WR024873.
115. Rickli C., Graf F. Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland. *Forest Snow and Landscape Research*. 2009. Vol. 82, № 1. P. 33–44.
116. Карабінюк М. М., Гнатьяк І. С., Буряник О. О., Гостюк З. В., Карабінюк Я. В. Сучасна динаміка рівнів вод та їх паводкових підйомів у верхів'ї річки Прут у межах ландшафту Чорногора (Українські Карпати). *Фізична географія та геоморфологія*. 2021. Вип. 1–3 (105–107). С. 7–17.
117. Pradhan B. A comparative study on the predictive ability of the decision tree, support vector machine and neuro-fuzzy models in landslide susceptibility mapping using GIS. *Computers and Geosciences*. 2013. Vol. 51. P. 350–365. doi:10.1016/j.cageo.2012.08.023.
118. Renard K. G., Foster G. R., Weesies G. A., McCool D. K., Yoder D. C. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *USDA Agricultural Handbook № 703*. Washington, D.C. : U.S. Department of Agriculture, 1997. 404 p.
119. Valavi R., Elith J., Lahoz-Monfort J. J., Guillerá-Arroita G. blockCV : An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*. 2019. Vol. 10, № 2. P. 225–232. doi:10.1111/2041-210X.13107.
120. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D., De Keersmaecker W., Brockmann C., Kirches G., Wevers J., Cartus O., Santoro M., Fritz S., et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. *Zenodo*. 2022. doi:10.5281/zenodo.7254221.
121. Bayer B., Simoni A., Mulas M., Corsini A., Schmidt D. Deformation responses of slow moving landslides to seasonal rainfall in the Northern Apennines,

measured by InSAR. *Geomorphology*. 2018. Vol. 308. P. 293–306. doi:10.1016/j.geomorph.2018.02.020.

122. Сендайська рамкова програма зі зниження ризику стихійних лих на 2015–2030 роки. Резолюція Генеральної Асамблеї ООН A/RES/69/283 від 3 червня 2015 року. URL: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030> (дата звернення: 15.03.2026).

123. Рудько Г. І., Пендерецький О. В. Екологічна безпека та раціональне природокористування в межах гірничопромислових і нафтогазових комплексів : монографія. Київ : Нічлава, 2012. 608 с.

124. Назаренко І. І., Польчина С. М., Нікорич В. А. Ґрунтознавство : підручник. Чернівці : Книги-XXI, 2004. 400 с.

125. Кравчук Я. С. Геоморфологічний аналіз рельєфу перспективних ділянок Українських Карпат для рекреаційних потреб (на прикладі басейну Чорної Тиси). Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2019. Вип. 2 (10). С. 71–87. doi:10.30970/gpc.2019.2.3061.

126. Castellanos Abella E. A., Van Westen C. J. Generation of a landslide risk index map for Cuba using spatial multi-criteria evaluation. *Landslides*. 2007. Vol. 4, № 4. P. 311–325. doi:10.1007/s10346-007-0087-y.

127. Greenway D. R. Vegetation and slope stability. *Slope Stability : Geotechnical Engineering and Geomorphology* / eds. M. G. Anderson, K. S. Richards. New York : Wiley, 1987. P. 187–230.

128. Wu T. H., McKinnell III W. P., Swanston D. N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal*. 1979. Vol. 16, № 1. P. 19–33. doi:10.1139/t79-003.

129. Llorens P., Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions: A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*. 2007. Vol. 335, № 1–2. P. 37–54. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.10.032.

130. Часковський О. Г., Гриник Г. Г. Оцінювання втрат лісового покриву Українських Карпат дистанційними методами за матеріалами відкритих джерел

спутникової інформації. Науковий вісник НЛТУ України. 2020. Том 30, № 1. С. 9–15. doi:10.36930/40300101.

131. Bosch J. M., Hewlett J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*. 1982. Vol. 55, № 1–4. P. 3–23. doi:10.1016/0022-1694(82)90117-2.

132. Bathurst J. C., Bovolo C. I., Cisneros F. Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale. *Ecological Engineering*. 2010. Vol. 36, № 3. P. 317–327. doi:10.1016/j.ecoleng.2009.05.001.

133. Wemple B. C., Swanson F. J., Jones J. A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001. Vol. 26, № 2. P. 191–204. doi:10.1002/1096-9837(200102)26:2<191::AID-ESP175>3.0.CO;2-U.

134. Brown A. E., Zhang L., McMahon T. A., Western A. W., Vertessy R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 310, № 1–4. P. 28–61. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.12.010.

135. Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*. 2004. Vol. 291, № 1–2. P. 1–27. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.015.

136. Лакида П. І. Фітомаса лісів України : монографія. Тернопіль : Збруч, 2002. 256 с.

137. Державне агентство лісових ресурсів України. Ліси України : стан та перспективи розвитку лісового господарства. Київ, 2021. URL: <https://forest.gov.ua/> (дата звернення: 17.02.2026).

138. Potapov P., Hansen M. C., Laestadius L., Turubanova S., Yaroshenko A., Thies C., Smith W., Zhuravleva I., Komarova A., Minnemeyer S., Esipova E. The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*. 2017. Vol. 3, № 1. Article e1600821. doi:10.1126/sciadv.1600821.

139. Van Westen C. J., Van Asch T. W. J., Soeters R. Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2006. Vol. 65, № 2. P. 167–184. doi:10.1007/s10064-005-0023-0.

140. Baum R. L., Godt J. W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*. 2010. Vol. 7, № 3. P. 259–272. doi:10.1007/s10346-009-0177-0.

141. Taalab K., Cheng T., Zhang Y. Mapping landslide susceptibility and types using Random Forest. *Big Earth Data*. 2018. Vol. 2, № 2. P. 159–178. doi:10.1080/20964471.2018.1472392.

142. Takaku J., Tadono T., Tsutsui K. Generation of high resolution global DSM from ALOS PRISM. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2014. Vol. XL-4. P. 243–248. doi:10.5194/isprsarchives-XL-4-243-2014.

143. UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2022 : Our World at Risk*. Geneva : UNDRR, 2022. 256 p.

144. Tatem A. J. WorldPop, open data for spatial demography. *Scientific Data*. 2017. Vol. 4. Article 170004. doi:10.1038/sdata.2017.4.

145. Pesaresi M., Politis P., Schiavina M., Freire S., Krummel R. GHS-BUILT-S R2023A - GHS built-up surface grid, derived from Sentinel2 composite and Landsat, multitemporal (1975–2030). European Commission, Joint Research Centre (JRC). 2023. doi:10.2905/9F06F36F-4B11-47EC-ABB0-4F8B7B1D72EA.

146. WorldPop (School of Geography and Environmental Science, University of Southampton; Department of Geography and Geosciences, University of Louisville; Departement de Geographie, Universite de Namur) and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University. *Global High Resolution Population Denominators Project*. Funded by The Bill and Melinda Gates Foundation (OPP1134076). University of Southampton, 2018. doi:10.5258/SOTON/WP00647.

147. Рушак В. О., Чепурний І. В. Геоінформаційний підхід до оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриття та розвитку зсувних процесів. *Вісник*

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 1 (144). С. 99–109. doi:10.32782/1995-0519.2024.1.13.

148. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка динаміки лісового покриву зсувонебезпечних територій Українських Карпат із використанням платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2025. № 2 (59). С. 146–150. doi:10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.22.

149. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка схильності території у межах Українських Карпат до розвитку зсувних процесів за даними дистанційного зондування та платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2026. № 1 (64). С. 197–203. doi:10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.27.

150. Рушак В. О. Геоєкологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території (на прикладі ділянки в басейні р. Тереля, Українські Карпати). Український журнал природничих наук. 2026. № 16. С. 356–365. doi:10.32782/naturaljournal.16.2026.32.

151. Corominas J., van Westen C., Frattini P. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2014. Vol. 73, № 2. P. 209–263. DOI: 10.1007/s10064-013-0538-8.

152. Arrogante-Funes P., Bruzón A. G., Arrogante-Funes F., Ramos-Bernal R. N., Vázquez-Jiménez R. Integration of Vulnerability and Hazard Factors for Landslide Risk Assessment. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, № 22. Article 11987. DOI: 10.3390/ijerph182211987.

153. O'Brien R. M. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. Quality & Quantity. 2007. Vol. 41, № 5. P. 673–690.

154. Wang J.-F., Li X.-H., Christakos G. et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. International Journal of Geographical Information Science. 2010. Vol. 24, № 1. P. 107–127.

ДОДАТКИ

Список публікацій

1. Рушак В. О., Чепурний І. В. Геоінформаційний підхід до оцінки взаємозв'язку поширення лісового покриву та розвитку зсувних процесів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 1 (144). С. 99–109. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.13>. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»).
2. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка динаміки лісового покриву зсувонебезпечних територій Українських Карпат із використанням платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2025. № 2 (59). С. 146–150. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.22>. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»).
3. Рушак В. О., Чепурний І. В. Оцінка схильності території у межах Українських Карпат до розвитку зсувних процесів за даними дистанційного зондування та платформи Google Earth Engine. Екологічні науки. 2026. № 1 (64). С. 197–203. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.27>. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»).
4. Рушак В. О. Геоєкологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з урахуванням стану лісового покриву території (на прикладі ділянки в басейні р. Тересля, Українські Карпати). Український журнал природничих наук. 2026. № 16. С. 356–365. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.16.2026.32>. (Видання включено до Переліку наукових фахових видань України, категорія «Б»).
5. Cherpurnyi I., Fedyk Ya., Cherpurna T., Rushchak V. Geoinformatics Modeling of Hydrological Parameters on the Example of the Prut River Basin Within the Ivano-Frankivsk Region. 16th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November 2022. Vol. 2022. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2022580252 (Scopus).
6. Федик Я., Рушак В. О., Чепурний І. В. Моделювання гідрологічних параметрів на прикладі басейну р. Прут в межах Івано-Франківської області за допомогою ГІС. Вплив виробництва, передачі, розподілу та використання

електроенергії на навколишнє середовище [Електронне видання] : зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (Івано-Франківськ, 24–25 листопада 2022 р.) / за заг. ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2022. С. 68–72.

7. Cherpurna T., Haydeychuk A., Cherpurnyi I., Fedyk Y., Rushchak V. Geoinformation analysis of mudflow danger and threat assessment for bridge structures within the territory of Transcarpathia. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2023», 2023. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2023510017 (Scopus).

8. Рушак В. О., Чепурний І. В. Аналіз стану лісового покриву та оцінка його взаємозв'язку з розвитком зсувних процесів на прикладі території в межах Українських Карпат. Актуальні проблеми формальної і неформальної освіти з моніторингу довкілля та заповідної справи : зб. тез доповідей III Міжнар. інтернет-конф. (м. Харків, 26 квітня 2024 р.). Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 130–132.

9. Cherpurnyi I., Rushchak V., Cherpurna 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, iss. 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2024510017.

10. Rushchak V., Cherpurnyi 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, iss. 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510172.

11. Рушак В. О. Геоінформаційна оцінка зсувної сприйнятливості та ризиків з урахуванням природоохоронного статусу територій. Світ наукових досліджень : матеріали Міжнар. мультидисциплінарної наук. інтернет-конф., м. Тернопіль (Україна) – м. Ополе (Польща), 2026. Вип. 54. URL: <https://www.economy-confer.com.ua/full-article/6972/>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу,

д.т.н., професор

Олександр КОНДРАТ



20 02 2026 р.

АКТ**впровадження результатів дисертаційного дослідження в освітній процес**

Даним актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи «Геоекологічна оцінка ризиків розвитку зсувних процесів з врахуванням стану лісового покриву території» аспіранта Рушчака Володимира Олеговича, зокрема методики обробки супутникових знімків на платформі Google Earth Engine та підходи щодо аналізу чинників розвитку небезпечних геологічних процесів, впроваджені в освітній процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу при викладанні дисциплін: «Експериментальні дослідження в екології» (ЗМ 3 Методи дослідження та аналіз результатів) та «Екологічна безпека паливно-енергетичної галузі України».

Завідувач кафедри екології,

к.т.н., доцент

Марія ОРФАНОВА

Гарант ОП третього рівня**вищої освіти «Екологія»**

професор кафедри екології,

д.т.н., професор

Олег МАНДРИК

Лістинг скрипта ключових процедур у Google Earth Engine для геоекологічної оцінки зсувної сприйнятливості території

```
// Геоєкологічна оцінка зсувної сприйнятливості (LSA) гібридним методом FR+RF
// у середовищі Google Earth Engine. Полігон Колочава/Теребля
// GEE-проект: ee-rushchakvolodymyrr.

// — 0. Параметри та вхідні дані —
var SCALE = 25, RF_TREES = 300, RF_SEED = 20260323, RF_BINS = 10;
var SPLIT_CRS = 'EPSG:32634', SPATIAL_BLOCK_M = 3000; // просторово-блокова CV
var LS_ASSET = 'projects/ee-rushchakvolodymyrr/assets/zsuv_kolochava_point';
var ls_all = ee.FeatureCollection(LS_ASSET);
var roi = ls_all.geometry().bounds(1).buffer(1000, 1).bounds(1);

// — 1. Просторово-блоковий поділ TRAIN/TEST (70/30) —
function assignSpatialSplit(fc) {
  return fc.map(function (f) {
    var xy = ee.List(f.geometry().transform(SPLIT_CRS, 1).coordinates());
    var bx = ee.Number(xy.get(0)).divide(SPATIAL_BLOCK_M).floor();
    var by = ee.Number(xy.get(1)).divide(SPATIAL_BLOCK_M).floor();
    var fold = bx.multiply(73856093).add(by.multiply(19349663)).abs().mod(10);
    return f.set('subset', ee.Algorithms.If(fold.lt(7), 'train', 'test'));
  });
}
var ls = assignSpatialSplit(ls_all).map(function (f) { return f.set('presence', 1); });
var ls_train = ls.filter(ee.Filter.eq('subset', 'train'));
var ls_test = ls.filter(ee.Filter.eq('subset', 'test'));

// Псевдо-відсутності (presence = 0) поза буфером 150 м від зсувів
var nonLsRegion = roi.difference(ls_all.geometry().buffer(150, 1), 1);
var nTarget = ee.Number(ls_all.size()).round().max(30).toInt();
var nonls = ee.FeatureCollection.randomPoints(nonLsRegion, nTarget, RF_SEED, 1)
  .map(function (f) { return f.set('presence', 0); });
var nonls_train = assignSpatialSplit(nonls).filter(ee.Filter.eq('subset', 'train'));

// — 2. Рельєф (AW3D30) та морфометричні похідні —
var dem = ee.Image('JAXA/ALOS/AW3D30/V2_2').select('AVE_DSM').clip(roi);
var PROJ = dem.projection().atScale(SCALE), SCALE_M = ee.Number(PROJ.nominalScale());
var slope = ee.Terrain.slope(dem), aspect = ee.Terrain.aspect(dem);
var elevation = dem.rename('elevation');
// Профільна кривизна (Zevenbergen & Thorne, 1987):  $2 \cdot (D \cdot G^2 + E \cdot H^2 + F \cdot G \cdot H) / (G^2 + H^2)$ ,
// де D...H – скінченні різниці ЦМР за ядрами 3×3 (концентрація/розсіювання стоку).
var profCurv = computeProfileCurvature(dem, SCALE_M); // повний розрахунок – у скрипті

// — 3. Лісові фактори (6 супутникових індикаторів) —
var wc = ee.Image('ESA/WorldCover/v200/2021').select('Map');
var forest = wc.eq(10); // лісова маска
var Df = forest.fastDistanceTransform(256).sqrt().multiply(SCALE_M);
var Dnf = forest.not().fastDistanceTransform(256).sqrt().multiply(SCALE_M);
var distForest = Dnf.subtract(Df); // 1) знакова відстань до межі лісу
var hansen = ee.Image('UMD/hansen/global_forest_change_2024_v1_12');
var forestDensity01 = hansen.select('treecover2000').divide(100); // 2) щільність лісу
var forestType = ee.Image('COPERNICUS/Landcover/100m/Proba-V-C3/Global/2019')
  .select('forest_type'); // 3) тип лісу (CGLS-LC100)
var loss = hansen.select('lossyear');
var forestLoss01 = loss.gt(0).and(loss.lte(23)).unmask(0) // 4) втрати лісу 2001-2023
  .convolve(ee.Kernel.circle({radius: 250, units: 'meters', normalize: true})).clamp(0, 1);
var ndviAmp = computeNdviAmplitude(roi, 2022); // 5) амплітуда NDVI (Sentinel-2)
var upsForest = computeUpslopeForestShare(dem, forest); // 6) частка лісу вище по схилу

// — 4. Геологічні та гідрологічні фактори —
```

```

var lithology =
ee.FeatureCollection('projects/ee-rushchakvolodymyrr/assets/Litologia_koloch1');
var faults = ee.FeatureCollection('projects/ee-rushchakvolodymyrr/assets/rozlom');
var streams = ee.Image('MERIT/Hydro/v1_0_1').select('upg').gte(800).selfMask();
// Відстані нормуються єдиним min-мак (без exp-загасання; масштаб калібрує FR – зауваж. #3)
var streamBase01 = ee.Image(1).subtract(norm01(distanceTo(streams)));
var faultBase01 = ee.Image(1).subtract(norm01(distanceTo(rasterize(faults))));
var precip01 = norm01(ee.Image('WORLDCLIM/V1/BIO').select('bio12')); // опади bio12
(зауваж. #4)

// — 5. Frequency Ratio: емпірична калібрівка кожного фактора по TRAIN-зсувах → [0..1] —
function buildFrRisk(img01, name, lsTrain, nBins) {
  var bin = img01.clamp(0, 1).multiply(nBins).floor().add(1).min(nBins).toInt();
  var totalA = area(roi); // повна площа ROI
  var aDict = areaByClass(bin); // площа кожного біна
  var lsHist = bin.sampleRegions({collection: lsTrain, scale: SCALE})
    .aggregate_histogram('bin'); // к-сть зсувів у біні
  var fr = bins.map(function (b) { // FR = (LS_b/LS) / (A_b/A)
    return lsShare(b, lsHist).divide(areaShare(b, aDict, totalA));
  });
  fr = smooth3(fr); // згладжування сусідніх бінів
  var risk = minMax01(fr); // нормування FR → 0..1
  return bin.remap(bins, risk, 0.5); // FR-шар ризику
}
var slopeRF = buildFrRisk(norm01(slope), 'slope', ls_train, RF_BINS);
var forestEdgeRF = buildFrRisk(norm01(distForest.abs()).subtract(1).multiply(-1),
  'forestEdge', ls_train, RF_BINS);
// аналогічно: elevRF, streamRF, forestDensityRF, forestTypeRF, profCurvRF,
// lithologyRF, faultRF, precipRF, ndviAmpRF, forestLossRF, upsForestRF,
aspectRF

// — 6. Random Forest → об'єктивні ваги факторів (Feature Importance, без AHP) —
var stack = ee.Image.cat([slopeRF, aspectRF, forestEdgeRF, elevRF, streamRF,
  forestDensityRF, forestTypeRF, profCurvRF, lithologyRF, faultRF]); // 10-факторний
варіант
var train = stack.sampleRegions({
  collection: ls_train.merge(nonls_train), properties: ['presence'], scale: SCALE});
var rf = ee.Classifier.smileRandomForest({numberOfTrees: RF_TREES, seed: RF_SEED})
  .train({features: train, classProperty: 'presence', inputProperties: bands});
var imp = ee.Dictionary(rf.explain().get('importance'));
var w = imp.toArray().divide(imp.values().reduce(ee.Reducer.sum())); // нормовані ваги
w_i

// — 7. Hazard = зважена сума FR-шарів —
var proxy01 = slopeRF.multiply(w_slope).add(aspectRF.multiply(w_aspect))
  .add(forestEdgeRF.multiply(w_forestEdge)).add(elevRF.multiply(w_elevation))
  .add(streamRF.multiply(w_stream)).add(forestDensityRF.multiply(w_forestDensity))
  .add(forestTypeRF.multiply(w_forestType)).add(profCurvRF.multiply(w_profileCurvature))
  .add(lithologyRF.multiply(w_lithology)).add(faultRF.multiply(w_faultDistance)).clamp(0,
1);

// — 8. Калібрований LSA через логістичну функцію (p0, k за квантилями TRAIN) —
var q = proxy01.sampleRegions({collection: ls_train, scale: SCALE})
  .reduceColumns(ee.Reducer.percentile([25, 50, 75]), ['proxy01']);
var p0 = ee.Number(q.get('p50')).clamp(0.30, 0.70);
var k = ee.Number(8).divide(iqr(q)).clamp(4, 14);
var hazard01 = proxy01.expression('1/(1+exp(-k*(x-p0)))', {x: proxy01, k: k, p0: p0});
var LSA = quantileClass(hazard01, roi, SCALE); // класи 1-5 (квантильна
класифікація)

// — 9. Природоохоронний статус (NPS) за WDPA/IUCN —
var wdpa = ee.FeatureCollection('WCMC/WDPA/current/polygons').filterBounds(roi);
// NPS: ЮНЕСКО/біосферний = 1.00; НПП = 0.90; Смарагдова мережа = 0.70;
// заказник = 0.65; пам'ятка природи = 0.55; поза ПЗФ = 0.20
var nps = wdpa.map(assignNPS).reduceToImage(['NPS'], ee.Reducer.max()).unmask(0.20);

// — 10. Фінальні шари ризику —
var conservationPriority = hazard01.multiply(nps); //
природоохоронний пріоритет
var exposure01 = computeExposure(roi); // населення + забудова + дороги

```

```

var vulnerability01 = computeVulnerability(roi);          // частка вразливих груп
(діти/літні)
var humanRisk = hazard01.multiply(exposure01)
    .multiply(ee.Image.constant(0.7).add(vulnerability01.multiply(0.3))); // ризик для
населення

// — 11. Валідація на незалежній TEST-вибірці та експорт результатів —
var val = buildValidation(LSA, roi, ls_test, nonls_test); // частоти, enrichment, AUC ROC
Export.table.toDrive({collection: val, description: 'kolochava_validation_lsa'});
Export.image.toDrive({image: hazard01, region: roi, scale: SCALE, crs: 'EPSG:32634'})

```