УДК 630:551.3
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.27

ОЦІНКА СХИЛЬНОСТІ ТЕРИТОРІЇ У МЕЖАХ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ ДО РОЗВИТКУ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ТА ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE

Рущак В.О., Чепурний І.В.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, Івано-Франківськ
rushchakvolodymyrr@gmail.com

У статті наведено результати оцінки схильності території Українських Карпат до розвитку зсувних процесів на основі інтеграції морфометричних, гідрологічних і біотичних чинників із використанням супутникових даних дистанційного зондування Землі та хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частоти та інтенсивності зсувних процесів у гірських районах Карпат, що пов'язано як із природними умовами (круті схили, флішова будова, інтенсивні опади), так і з антропогенними впливами, насамперед трансформацією лісового покриву.

Особливу увагу у дослідженні приділено ролі лісового покриву як структурного чинника стабільності схилів. На відміну від традиційних підходів, де ліс враховується у вигляді бінарного показника «ліс/не ліс», у запропонованій моделі застосовано індекс NDVI та показник відстані до межі лісових масивів, що дає змогу врахувати крайові ефекти, фрагментацію лісу та їх вплив на зволоження й ерозійні процеси. Дослідження виконано для ділянки площею 25×25 км у східній частині Закарпатської області, в басейні річки Теребля, де зафіксовано 236 зсувів за даними галузевого каталогу. Для побудови моделі використано цифрову модель рельєфу ALOS AW3D30 та похідні морфометричні показники (ухил, експозиція, абсолютні висоти, морфометрична нерівність рельєфу), інформацію про лісовий покрив за даними ESA WorldCover, а також гідрологічні характеристики, отримані з використанням набору даних MERIT Hydro. Усі вхідні фактори приведено до єдиної шкали шляхом нормалізації та інтегровано в індексну модель зсувної сприйнятливості (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) з подальшою класифікацією території на п'ять рівнів небезпеки – від дуже низького до дуже високого.

Отримані результати свідчать, що зони з найвищими значеннями індексу LSA приурочені до крутих схилів середніх абсолютних висот, ділянок активної ерозії та крайових зон лісових масивів. Перевірка результатів на незалежній тестовій вибірці показала, що переважна більшість зсувів локалізується у класах середньої, високої та дуже високої сприйнятливості, що підтверджує ефективність і практичну придатність запропонованого підходу для регіонального районування зсувонебезпечних територій Українських Карпат. *Ключові слова:* зсуви, оцінка сприйнятливості до зсувів, лісовий покрив, морфометричний аналіз, дистанційне зондування Землі, Google Earth Engine.

Assessment of Landslide Susceptibility of the territory within of the Ukrainian Carpathians Using Remote Sensing Data and the Google Earth Engine Platform. Rushchak V., Chepurnyi I.

The article presents the results of assessing the susceptibility of the territory of the Ukrainian Carpathians to the development of landslide processes based on the integration of morphometric, hydrological and biotic factors using satellite data of remote sensing of the Earth and the cloud geoinformation platform Google Earth Engine. The relevance of the study is due to the increase in the frequency and intensity of landslide processes in the mountainous areas of the Carpathians, which is associated with both natural conditions (steep slopes, flysch structure, intense precipitation), and anthropogenic influences, primarily the transformation of forest cover. The study pays special attention to the role of forest cover as a structural factor of slope stability. Unlike traditional approaches, where forest is taken into account as a binary indicator "forest/non-forest", the proposed model uses the NDVI index and the distance to the forest boundary indicator, which allows taking into account edge effects, forest fragmentation and their impact on moisture and erosion processes. The study was conducted for a 25×25 km area in the eastern part of the Transcarpathian region, in the Tereblya River basin, where 236 landslides were recorded according to the industry catalog. To build the model, the ALOS AW3D30 digital terrain model and derived morphometric indicators (slope, exposure, absolute heights, morphometric relief unevenness), information on forest cover according to ESA WorldCover data, as well as hydrological characteristics obtained using the MERIT Hydro dataset were used. All input factors were reduced to a single scale by normalization and integrated into an index model of landslide susceptibility (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) with subsequent classification of the territory into five levels of hazard – from very low to very high. The results obtained indicate that the zones with the highest values of the LSA index are confined to steep slopes of medium absolute altitudes, areas of active erosion and marginal zones of forest massifs. Verification of the results on an independent test sample showed that the vast majority of landslides are localized in the classes of medium, high and very high susceptibility, which confirms the effectiveness and practical suitability of the proposed approach for regional zoning of landslide-prone areas of the Ukrainian Carpathians. *Key words:* landslides, landslide susceptibility assessment, forest cover, morphometric analysis, remote sensing, Google Earth Engine.

© Рущак В.О., Чепурний І.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Активізація зсувних процесів у межах Українських Карпат є стійкою тенденцією останніх десятиліть і становить серйозну загрозу для природних ландшафтів, населених пунктів та інфраструктури. Її формування зумовлене поєднанням складних природних умов (круті схили, флішова будова, інтенсивні опади, сезонне перезволоження) та антропогенного впливу, передусім змін лісового покриву внаслідок рубок, фрагментації й будівництва лінійних об'єктів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, оцінка схильності територій до розвитку зсувів у вітчизняній практиці здебільшого базується на морфометричних показниках рельєфу або враховує лісовий покрив у спрощеному вигляді – як бінарний фактор. При цьому структурні та крайові ефекти лісів, зокрема вплив відстані до межі лісового масиву, фрагментації та сезонного стану рослинності, залишаються недостатньо дослідженими та рідко інтегруються в моделі зсувної сприйнятливості.

Водночас сучасні супутникові архіви та хмарні платформи геоінформаційного аналізу, зокрема Google Earth Engine, створюють передумови для побудови відтворюваних, масштабованих моделей оцінки зсувної схильності з урахуванням як морфометричних, так і біотичних чинників. Це зумовлює необхідність розроблення інтегрованого підходу до оцінки зсувної сприйнятливості територій Українських Карпат, у якому лісовий покрив розглядається як структурний фактор, а не лише як фоновий елемент ландшафту.

Актуальність дослідження. Зсувні процеси є одними з найбільш небезпечних екзогенних геологічних явищ у гірських районах і становлять суттєву загрозу для природних ландшафтів, населених пунктів та інфраструктури Українських Карпат. Їх активізація зумовлена поєднанням природних чинників (круті схили, складна геологічна будова, інтенсивні опади, сніготанення) та антропогенного впливу, насамперед лісогосподарської діяльності й розвитку транспортної інфраструктури. В умовах зростання кліматичних екстремумів зростає потреба в оперативних регіональних оцінках зсувної сприйнятливості.

Сучасні супутникові архіви та хмарні платформи геопросторової аналітики, зокрема Google Earth Engine, забезпечують можливість інтегрованого аналізу довгих часових рядів і факторів зсувоутворення на великих територіях [1]. Особливо актуальним є врахування динаміки лісового покриву як ключового стабілізуючого чинника схилів. Застосування цих підходів для Українських Карпат дозволить підвищити обґрунтованість оцінок зсувної небезпеки та науково підтримати прийняття управлінських рішень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.

Велика кількість праць у цьому напрямку послідовно підкреслює важливість лісу як індикатора та чинника розвитку зсувних процесів у Карпатах. Зокрема, у роботі [2] показано придатність дистанційних методів для оцінювання втрат лісового покриву в Карпатському регіоні й запропоновано використання цифрових моделей рельєфу та похідних морфометричних показників для просторового аналізу ризиків [3]. Останніми роками з'являються роботи, де просторовий зв'язок між контурами/центроїдами зсувів і структурою лісового покриву підтверджується кількісно – за допомогою буферного аналізу, морфометричних градієнтів, метрик фрагментації та відстаней до межі лісу [4]. Ці результати логічно узгоджуються з міжнародною практикою дистанційного зондування для ландшафтної діагностики небезпек і слугують базою для інтегрованих індексів вразливості на основі рельєфу й покриву.

Разом із тим у вітчизняній літературі досі бракує систематизованих підходів до побудови карти схильності до зсувів (landslide susceptibility assessment, LSA), де чинник лісу враховується структурно – через відстань до межі лісу, ступінь фрагментації, сезонні індекси (наприклад, NDVI у період вегетаційного максимуму) та морфометричні взаємодії з ухилом і експозицією. Окремі спроби показують високу інформативність саме крайових зон, де контраст біотичних і гідрологічних властивостей максимальний: такі перехідні смуги часто корелюють із активними або потенційними зсувними схилами, полягає у розвитку та застосуванні сучасних підходів просторово-часового аналізу зсувної сприйнятливості гірських територій на основі супутникових даних і хмарних геоінформаційних платформ. Отримані результати спрямовані на розв'язання актуальних наукових завдань із кількісної оцінки ролі природних і антропогенних чинників, зокрема динаміки лісового покриву, у формуванні зсувних процесів. У практичному вимірі напрацювання можуть бути використані для регіонального моніторингу зсувної небезпеки, підтримки планування лісогосподарських та інфраструктурних заходів, а також для підвищення обґрунтованості управлінських рішень у системі зменшення ризиків природних небезпек.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка схильності території до зсувів (landslide susceptibility assessment, LSA) на основі геопросторових даних є одним із найдинамічніших напрямів у сучасній геоінформатиці. Вона поєднує морфометричний аналіз цифрових моделей рельєфу, оцінку стану земельного покриву, гідрологічні та кліматичні фактори, а також статистичне або машинне моделювання просторової вразливості. У світовій практиці сформовано два ключові підходи – евристичний (індексний) і статистичний (модельний), які поступово зближуються завдяки інтеграції даних дистанційного зондування та платформ на кшталт Google Earth Engine (GEE) [1].

Серед робіт, які задали методичні стандарти для побудови карт схильності до зсувів, варто відзначити дослідження [5], де застосовано індексний підхід з ваговими коефіцієнтами факторів (ухил, експози-

ція, літологія, відстань до тектонічних розломів та доріг). Праці [6-7] довели ефективність статистичних моделей логістичної регресії, а також методів частотного співвідношення та індексу достовірності для визначення просторових закономірностей між розташуванням зсувів і наборами предикторів.

Після 2010-х років у зв'язку з масовою доступністю даних DEM (SRTM, ASTER, Copernicus GLO-30) і оптичних супутникових серій (Landsat, Sentinel) інтерес дослідників змістився в бік автоматизованих моделей схильності. Наприклад, у [8] використано машинне навчання для оцінки сприйнятливості до зсувів території у районі Вунін, Китай, де розглянуто 14 факторів, серед яких NDVI, який мав одну з найвищих інформаційних ваг. У роботі [9] на основі польових спостережень, морфометричного аналізу та ГІС-даних автори показали, що масове порушення лісового покриву різко знижує стабільність схилів, підсилює поверхневий стік і ерозійні процеси, що призводить до зростання частоти зсувів і руслових деформацій. Доведено, твердження про ключову стабілізаційну роль лісів у гірських екосистемах, що має важливе значення для оцінювання зсувної небезпеки та планування відновлення лісів у зонах природних і антропогенних порушень. У роботі [10] запропоновано модель сприйнятливості до зсувів, що базується на багатокритеріальній просторовій оцінці з урахуванням кліматичних і морфометричних чинників та використанні транснаціональних інвентарів зсувів, що забезпечує можливість регіонального порівняльного аналізу. Дослідження [11] демонструє ефективність поєднання даних дистанційного зондування і ГІС із методом частотного співвідношення для детального картографування зсувної небезпеки в умовах складного гірського рельєфу та інтенсивного антропогенного впливу. Робота [12] систематизує статистичні та машинно-навчальні підходи до оцінювання зсувної сприйнятливості й підкреслює зростаючу роль супутникових даних у підвищенні достовірності прогнозування зсувних процесів у гірських регіонах.

Поява платформи Google Earth Engine (GEE) сприяла переходу від локальних моделей до масштабованих регіональних оцінок. GEE забезпечує уніфікований доступ до супутникових архівів, DEM, кліматичних та ґрунтових шарів, дозволяючи реалізовувати повний цикл LSA – від збору даних до побудови індексу чи навчання моделі [1].

Так, у праці [13] застосували GEE для розрахунку індексу сприйнятливості до зсувів у горах Сичуаню, поєднуючи NDVI, ухил, опади та щільність дренажної мережі. Подібний підхід було реалізовано у [14].

В українському науковому просторі протягом останнього десятиліття активно розвиваються підходи до оцінювання стану лісового покриву та зсувної небезпеки в Карпатах. Зокрема, використано відкриті супутникові джерела для картографування втрат лісу та визначення тенденцій деградації лісових екосистем [4]. Дослідження [15] вперше продемонструвало кількісний зв'язок між розташуванням зсувів і межами лісових масивів у межах Українських Карпат. Автори показали, що понад 70 % зсувів припадають на зону до 500 м від межі лісу, що підтверджує роль крайових ефектів як тригерів. У роботі [16] за допомогою платформи GEE проаналізовано взаємний просторовий розподіл лісів та зсувних ділянок у межах східної частини Закарпаття та Івано-Франківщини. У роботі [17] використовується GEE для інтеграції супутникових та екологічних даних для регіонального картографування сприйнятливості зсувів на Карпатах.

Невирішені питання та мета даного дослідження. Більшість наявних робіт при районуванні території щодо схильності до зсувів або обмежуються суто морфометричними факторами (ухил, експозиція, кривизна), або розглядають лісовий покрив тільки у контексті його наявності чи відсутності. Водночас порогові та крайові ефекти лісів майже не вивчалися, наприклад, вплив відстані до межі лісу. Тому метою даного дослідження є удосконалення підходу до оцінки схильності територій до виникнення зсувів (LSA), який уніфіковано поєднує NDVI підходи до оцінки динаміки лісового покриву та врахування відстаней до межі лісу, морфометричні та структурні змінні, придатні до розрахунку на платформі GEE для гірських ландшафтів Українських Карпат.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в залученні платформи Google Earth Engine (GEE) для розрахунку оцінки схильності територій до виникнення зсувів, зокрема, поєднанні класичного підкоду щодо визначення лісового покриву за NDVI, врахуванні структурного параметра відстані до межі лісового масиву, морфометричних факторів (ухил, експозиція, абсолютні відмітки рельєфу, морфометрична нерівність рельєфу, відстань до базису ерозії (водотоків) і та одержанні показника схильності територій до виникнення зсувів (LSA) з подальшою його класифікацією. Використання GEE для аналізу сателітних даних забезпечує придатність до масштабування для інших зсувонебезпечних територій Карпат.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є принцип інтегральної оцінки схильності територій до розвитку зсувних процесів (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) на базі багатофакторного геоінформаційного аналізу. У межах даної роботи реалізовано адаптивну індексну модель, що поєднує морфометричні, структурні та біотичні параметри, розраховані за допомогою супутникових даних Sentinel-2, цифрової моделі рельєфу ALOS World 3D (AW3D30) та алгоритмів Google Earth Engine (GEE) [1].

Основною концепцією є врахування взаємодії трьох блоків чинників, які визначають схильність схилів до зсувів, а саме морфометричного блоку, який включає чинники ухил (Slope), експозиція (Aspect), абсолютні відмітки рельєфу (Elevation), морфометрична нерівність рельєфу (Roughness),

відстань до базису ерозії (водотоків), розрахована на основі цифрової моделі рельєфу з використанням гідрологічного аналізу. Біотичний блок визначає стан та структуру лісового покриву, які оцінені за індексом NDVI та відстанню до межі лісу. Структурний блок це інтегральний проксі-індекс, який поєднує морфометричні та біотичні показники у безрозмірному діапазоні (0–1) для отримання карти відносної вразливості (LSA index).

Методологічні етапи моделювання передбачають формування первинних шарів, побудову похідних кількісних факторних характеристик, розрахунок індексу LSA та його класифікація на 5 рівнів вразливості території до розвитку зсувних процесів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проведено для ділянки розміром 25×25 м, яка розташована у східній частині Закарпатської області, включає у свої межі такі населені пункти, як Колочава, Руська Мокра, Лопухів, Усть Чорна (рис. 1).

У її межах згідно каталогу зсувів ДНВП «Геоінформ України» зареєстровано 236 зсувів. Територія досліджень розташована у верхів'ях басейну річки Теребля, між хребтами Красна та Пішконя. Територія характеризується типовими для Карпат стрімкими схилами (ухили 20–40°), складеною флішовою товщею (чергування пісковиків, алевролітів, аргілітів) і високим рівнем зволоження. Середні абсолютні відмітки території становлять близько 650 м н.р.м., максимальні значення сягають 1300 м над рівнем моря. (г. Дарвайка, г. Менчул). Лісовий покрив переважає – близько 70 % площі – і представлений буковими, ялицевими та смерековими формаціями. Середній річний обсяг опадів перевищує 1200 мм, що створює передумови для інфільтрації вод у ґрунти та схилові породи, що у поєднанні з антропогенними факторами (лісозаготівлі, прокладання доріг) може спричиняти активізацію зсувів.

Для побудови карти схильності території дослідження до розвитку зсувів (Landslide Susceptibility Assessment, LSA) було використано комплекс просторових даних дистанційного зондування Землі та похідних геоморфометричних показників, інтегрованих у хмарному геоінформаційному середовищі Google Earth Engine.

Базовим набором вихідних даних слугувала цифрова модель рельєфу ALOS AW3D30 (JAXA) з просторовою роздільною здатністю близько 25–30 м, яка була приведена до єдиної проєкції та обрізана за межами досліджуваної території. На основі ЦМР було розраховано ключові морфометричні параметри рельєфу, що безпосередньо впливають на формування та активізацію зсувних процесів. Крутизна схилів (Slope), обчислена у градусах, використана як один із головних факторів гравітаційної нестійкості схилів. Для врахування нелінійного характеру впливу крутості на розвиток зсувів застосовано гау-

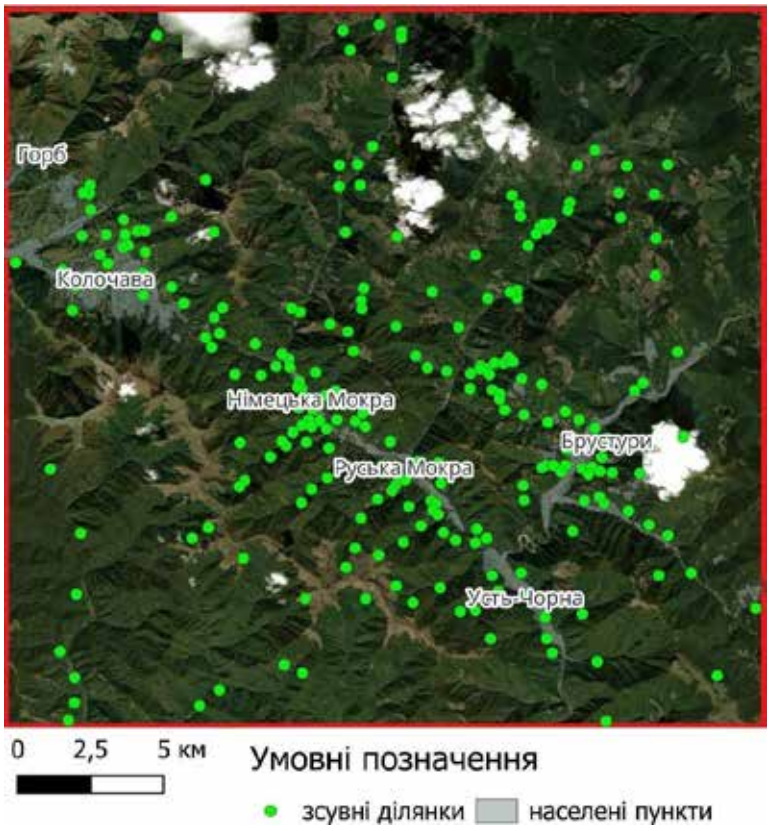

Рис. 1. Територія досліджень з нанесеними зсувними ділянками

сівську функцію ризику з максимумом у зоні середніх і крутих схилів. Експозиція схилів (Aspect) була нормалізована у діапазоні 0–1 та використана як допоміжний фактор, що опосередковано відображає відмінності у зволоженні, інсоляції та мікрокліматичних умовах схилів. Морфометрична нерівність рельєфу (Roughness) визначалась як стандартне відхилення висот у локальному вікні 7×7 пікселів, що дозволило ідентифікувати ділянки з порушеною морфологічною структурою поверхні, характерною для активних або реліктових зсувних форм. Для врахування ролі рослинного покриву було використано дані ESA WorldCover, на основі яких сформовано маску лісів та обчислено відстань до межі лісового покриву. Отриманий показник трансформовано у фактор ризику, що відображає зростання зсувонебезпечності поблизу лісових узлісь. Гідрологічний чинник враховано шляхом аналізу даних MERIT Hydro, зокрема показника накопичення стоку (upstream pixels), на основі якого було ідентифіковано дрібні водотоки та мікроканали. Для них обчислено відстань до водотоків, яка експоненційно трансформувалася у фактор зсувного ризику, що відображає вплив ерозійних і водонасичувальних процесів. Додатково враховано абсолютну висоту місцевості, нормалізовану у межах досліджуваної території, як узагальнений показник морфоструктурних і кліматичних відмінностей.

Усі фактори було приведено до єдиної шкали 0-1 за допомогою робастної нормалізації та інтегровано у зважену сумарну LSA-проксі-модель, після чого результуючий індекс класифіковано на п’ять класів зсувонебезпечності (LSA 1-5) – від дуже низького до дуже високого рівня ризику.

На основі шару лісового покриву було розраховано показник відстані до лісу, представлений у вигляді знакової евклідової відстані, що дозволяє врахувати роль лісової рослинності у формуванні схилових процесів. Для валідаційного аналізу та просторової інтерпретації результатів було використано векторний шар існуючих зсувів, що містить точкові об’єкти фактично зафіксованих зсувних тіл. Даний шар застосовувався для визначення меж досліджуваної області, а також для подальшого якісного порівняння розподілу зсувів із зонами підвищеної схильності. Усі вхідні растрові показники були приведені до єдиної роздільної здатності, нормалізовані до інтервалу 0–1 та інтегровані у індекс зсувної схильності, який згодом було перекласифіковано на п’ять класів (Дуже низька – Дуже висока) для формування карти схильності території дослідження до розвитку зсувів (LSA).

Для врахування впливу лісового покриву лісу, який, як показано у дослідженнях [15], відіграє значну роль у активізації розвитку зсувних процесів, застосовано фактор відстань до межі лісу. Його сутність полягає у визначенні відстані кожного пікселя до найближчої межі між лісовими та відкритими ділянками з урахуванням знаку: негативні значення – для пікселів, що розташовані всередині лісу, позитивні додатні для пікселів поза лісом, нульові значення – власне межа лісу. Таким чином отримано растровий шар, який враховує межі лісу, який є чутливим до форми лісових масивів і опосередковано визначає вплив межі лісу, яка потенційно впливає на ризик розвитку зсувів через вплив локальні зміни гідрологічного режиму схилу.

Отриманий результат інтерпретується як безрозмірна карта вразливості, де 0.0–0.2 – дуже низька схильність, 0.2–0.4 – низька, 0.4–0.6 – середня, 0.6–0.8 – висока, 0.8–1.0 – дуже висока. Для кількісної оцінки точності отриманого індексу LSA використано векторну базу точок зсувів, з яких 70 % зсувних ділянок є навчальною, 30 % точок – тестова база, що застосовується для оцінювання ефективності моделі. Таке співвідношення (70:30) є загальноприйнятим у дослідженнях схильності до зсувів [18, 19].

На рисунку 2 наведено картограму індексу схильності до зсувів (LSA), яка відображає диференціацію території досліджень за рівнем потенційної схильності до розвитку зсувних процесів (рис. 5).

Індекс набуває значень у межах 0–1, де:

– 0–0.2 – стабільні ділянки (дуже низька схильність);
– 0.2–0.4 – відносно стабільні (низька);
– 0.4–0.6 – помірна;
– 0.6–0.8 – висока;
– 0.8–1.0 – дуже висока схильність.

Найвищі значення LSA (>0.8) фіксуються на крутих схилах південної та південно-західної експозиції, переважно у межах висот 600–900 м н.р.м., що відповідає активним терасовим схилам.

Геоінформаційний аналіз щодо оцінки розподілу площі території досліджень за класами LSA дає такі результати: клас 1 (дуже низька схильність) – 76,31 км² (10,8%); клас 2 (низька схильність) – 161,76 км² (22,9%); клас 3 (помірна) – 217,95 км² (30,9%); клас 4 (висока схильність) – 165,23 км² (23,4%); клас 5 (дуже висока схильність) – 84,25 км² (11,9%).

З метою валідації моделі проведено просторовий аналіз щодо оцінки класу сприйнятливості щодо розвитку зсувів для зсувних ділянок вибірки тестових зсувів. На рисунку 3 наведено гістограму розподілу для тестових зсувів за класами сприятливості території до зсувів. Як видно з рис. 3 в клас дуже низької сприйнятливості попадає 2 зсуви, низької – 15, середньої – 21, високої – 23, дуже високої – 19.

Абсолютна більшість зсувів попадає в класи сприйнятливості території щодо розвитку зсувів від середнього до дуже високого, що дає змогу попередньо стверджувати про достовірність моделі.

Головні висновки. У роботі реалізовано інтегрований підхід до оцінки схильності територій Українських Карпат до розвитку зсувних процесів на основі поєднання морфометричних, гідрологіч-

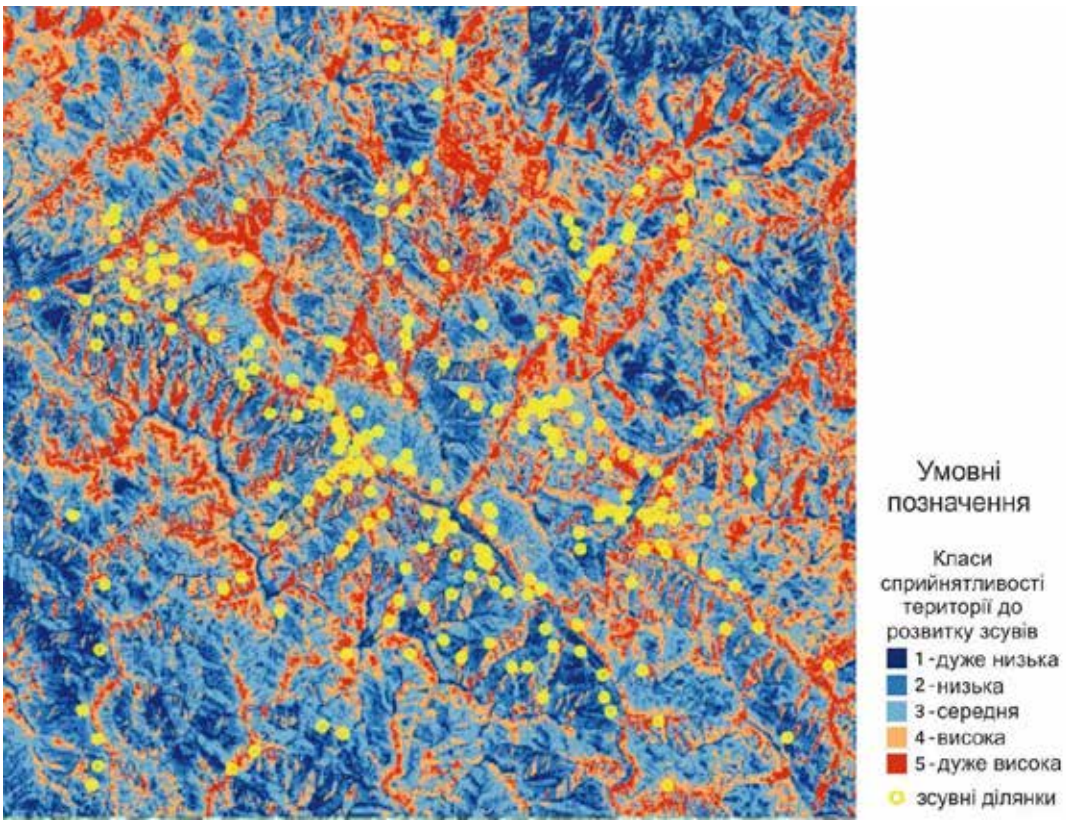

Рис. 2. Картограма схильності території до розвитку зсувів (LSA) з нанесеними зсувними ділянками

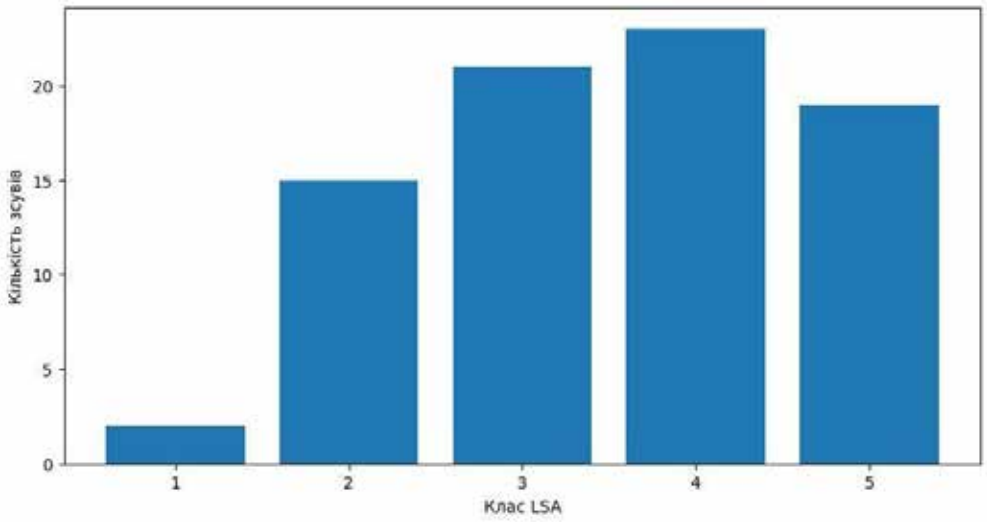

Рис. 3. Гістограма розподілу тестових зсувів за класами сприятливості території до зсувів

них і біотичних чинників із використанням супутникових даних та платформи Google Earth Engine. Запропонована індексна модель базується на уніфікованій нормалізації факторів і дозволяє отримати безрозмірну карту відносної зсувної сприйнятливості в діапазоні 0–1. Показано, що врахування лісового покриву як структурного чинника, зокрема через відстань до межі лісу та індекси стану рослинності, істотно підвищує інформативність моделі порівняно з традиційними підходами, де ліс розглядається лише як бінарний параметр. Найвищі значення індексу LSA приурочені до крутих схилів середніх висот, зон активної ерозії та крайових ділянок лісових масивів, що узгоджується з фактичним просторовим розподілом зсувів. Результати валідаційного аналізу з використанням незалежної тестової вибірки зсувів засвідчили, що абсолютна більшість зсувних ділянок локалізується у класах середньої, високої та дуже

високої схильності, що підтверджує адекватність і практичну придатність запропонованої моделі. Отримана карта LSA може розглядатися як інструмент регіонального рівня для попереднього районування територій за ступенем зсувної небезпеки.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для регіонального моніторингу та просторового планування в межах зсувонебезпечних територій Українських Карпат, зокрема при розміщенні інфраструктурних об'єктів, плануванні лісогосподарських заходів і оцінюванні наслідків змін землекористування. Запропонований підхід є відтворюваним і масштабованим, що дозволяє застосовувати його для інших гірських регіонів за наявності стандартних супутникових даних.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію часової складової (аналіз динаміки NDVI, опадів та вологості ґрунтів), використання актуальних даних щодо зсувної активності зсувів для статистичного навчання моделей, а також порівняння індексного підходу з методами машинного навчання. Також використання можливостей обробки даних дистанційного зондування Землі для удосконалення існуючих методик просторово-часового регіонального прогнозування зсувів.

Література

1. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
2. Chaskovskyy O. H., Hrynyk H. H. Estimation of losses of forest cover of the Ukrainian Carpathians by remote methods based on the materials of open sources of satellite information. Scientific Bulletin of UNFU. 2020. Vol. 30, № 1. P. 66–73. DOI: 10.36930/40300111.
3. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine / Kennedy R. E., Yang Z., Gorelick N., Braaten J., Cavalcante L., Cohen W. B., Healey S. Remote Sensing. 2018. Vol. 10, № 5. Article 691. DOI: 10.3390/rs10050691.
4. Chepurnyi I., Rushchak V. Analysis of forest cover parameters and their relationship with landslides in the Ukrainian Carpathians using GEE. Proceedings of Monitoring'2023. Kyiv, 2023. P. 1–6.
5. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy / Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P. Geomorphology. 1999. Vol. 31, № 1–4. P. 181–216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
6. Carrara A. GIS technology in mapping landslide hazard. GIS in Assessing Natural Hazards / eds. A. Carrara, F. Guzzetti. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1995. P. 135–175.
7. Ayalew L., Yamagishi H. The application of GIS-based logistic regression for landslide hazard mapping in Central Japan. Geomorphology. 2005. Vol. 65, № 1–2. P. 15–31. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.06.010.
8. Landslide susceptibility assessment at the Wuning area, China: a comparison between multi-criteria decision making, bivariate statistical and machine learning methods / Hong H., Shahabi H., Shirzadi A., Chen W., Chapi K., Ahmad B. B., Roodposhti M. S., Yari Hesar A., Tian Y., Tien Bui D. Natural Hazards. 2019. Vol. 96, № 1. P. 173–212. DOI: 10.1007/s11069-018-3536-0.
9. The intensity of slope and fluvial processes after a catastrophic windthrow event in small catchments in the Tatra Mountains / Strzyżowski D., Gorczyca E., Krzemień K., Żelazny M. Journal of Mountain Science. 2021. Vol. 18, № 6. P. 1405–1423. DOI: 10.1007/s11629-021-6726-2.
10. Climate-physiographically differentiated Pan-European landslide susceptibility assessment using spatial multi-criteria evaluation and transnational landslide information / Günther A., van Den Eeckhaut M., Malet J.-P., Reichenbach P., Hervás J. Geomorphology. 2014. Vol. 224. P. 69–85. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.011.
11. Sonker I., Tripathi J. N., Swarnim. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. Quaternary Science Advances. 2022. Vol. 8. 100067. DOI: 10.1016/j.qsa.2022.100067.
12. Landslide susceptibility in mountainous regions of the Andes: a review and new insights / Reichenbach P., Rossi M., Malamud B. D., Mihir M., Guzzetti F. Journal of Mountain Science. 2022. Vol. 19, № 3. P. 543–567. DOI: 10.1007/s11629-021-7011-0.
13. Integration of predisposing and triggering factors in landslide susceptibility mapping using hybrid machine learning methods / An B., Zhang Z., Xiong S., Zhang W., Yi Y., Liu Z., Liu C. Remote Sensing. 2024. Vol. 16, № 22. 4218. DOI: 10.3390/rs16224218.
14. Landslide susceptibility mapping based on convolutional neural network and extreme learning machine / Wu W., Zhang Q., Singh V. P., Wang G., Zhao J., Shen Z., Sun S. Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 18. Article 4662. DOI: 10.3390/rs14184662.
15. 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.
16. 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.
17. Spatial Analysis of the Relationship between the Distribution of Landslide Areas and Forest Cover / Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024». 2024. Vol. 2024, issue 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2024510017.
18. Assessment of Forest Cover Dynamics in Landslide-Prone Areas of the Ukrainian Carpathians using Remote Sensing Data / Rushchak V., Chepurnyi I. 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025510172.
19. Davybida L. Remote sensing and Google Earth Engine for Regional Landslide Assessment in the Carpathians. 5th EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. 2025. Vol. 2025. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2025520018.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026