

УДК 551.3:551.435.6(477.87)

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>

Шехунова С. Б., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5975-3491>,
Сюмар Н. П., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-7576>,

Лобасов О. П., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8474-4821>,
Стадніченко С. М. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1038-6878>

Інститут геологічних наук НАН України, Київ

Аналіз просторових закономірностей поширення зсувів у межах Закарпатської області засобами ГІС

З метою виявлення основних і похідних геологічних факторів, що визначають поширення та активізацію зсувів у межах Закарпатської області, зібрано та сформовано базу даних про 2575 зсувів загальною площею 385,21 км². В середовищі *ArcView Spatial Analyst* проаналізовано фактори зсувоутворення, представлені побудованими ґрідами рельєфу, його похідних та щільності структурно-тектонічних неоднорідностей. Встановлено, що максимум розвитку зсувів припадає на висоти з гіпсометричними позначками 280–730 м, схили з крутизною 7,5–22,4°, орієнтовані на захід, південний захід, південь та південний схід та розташовані на відстані до 500 м до водотоків. Дві третини від усіх досліджених зсувів знаходяться в межах кілометрової зони вздовж структурно-тектонічних порушень та на відстані до 1250 м до порушень, що мають азимут 90–180°. Побудовано ітераційну регіональну модель прогнозу поширення зсувонебезпеки для території Закарпаття.

Ключові слова: зсув, геоінформаційні системи, фактори зсувоутворення, прогнозні моделі, Закарпатська область.

UDC 551.3:551.435.6(477.87)

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>

Shekhunova, S. B., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5975-3491>,
Siumar, N. P., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-7576>,

Lobasov, O. P., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8474-4821>,
Stadnichenko, S. M. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1038-6878>

Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Analysis of Spatial Patterns of Landslide Formation with GIS Tools (Zakarpatska Oblast)

To identify the primary and derived geological factors determining the spread and activation of landslides within Zakarpatska Oblast, a database of 2.575 landslides were collected and integrated into GIS, with a total area of 385.21 km² covered. Using the *ArcView Spatial Analyst* environment, the factors of landslide formation represented by the constructed grids of the relief, its derivatives, and the density of structural-tectonic heterogeneities have been examined. It has been established that landslide development maximum occurs at heights with hypsometric marks of 280–730 m, slopes of 7.5–22.4° steepness, oriented to the west, south-west, south, and south-east and located at a distance of up to 500 m from watercourses. Two-thirds of all analyzed landslides are located within a kilometer zone along structural-tectonic disturbances and at a distance of up to 1250 m to disorders with the 90–180° azimuth. The approach applied made it possible to establish for the first time ever the patterns of landslide occurrence, relying on the results of processing a large array of primary cartographic information, and to obtain probable limit values characterizing landslide formation factors, as well as build an iterative regional predictive model for forecasting landslide hazards occurrence. Mapping of areas with characteristic values of the factors determined will be used for local landslide forecasts. It will be implemented in the development of measures to reduce the risk of hazardous landslide processes in Zakarpatska Oblast.

Keywords: landslide, geoinformation systems, landslide formation factors, forecast models, Zakarpatska Oblast.

Актуальність теми дослідження

Зсуви (або гравітаційні процеси на схилах) належать до найбільш поширених екзогенних геологічних процесів на Землі і можуть становити серйозну загрозу для населення, державної та приватної власності, економіки навіть добре технологічно розвинених заможних країн. До прикладу, в США щорічні збитки від зсувів оцінюються у понад 2 млрд. доларів, а людські втрати сягають 25–50 чоловік [1].

Розвиток зсувних процесів залежить від геологічних, геоморфологічних, гідрогеологічних (рівень, хімічний склад, умови живлення та дренажу підземних вод), метеорологічних (атмосферні опади, температура тощо), гідрологічних (рівні та витрати води в поверхневих водотоках, ерозійна та абразійна дія поверхневих вод), сейсмічних та неотектонічних (землетруси) природних умов. Їх активізація може бути спровокована техногенною діяльністю (вирубка лісів, зрошення земель, порушення рівноважного профілю схилів при розташуванні інженерних об'єктів на схилах чи поблизу них) [2–8 *та ін.*].

Територія Закарпаття є частиною альпійсько-гімалайського орогенного (колізійного) поясу, в межах якого тектоніка прямо або опосередковано відображається в рельєфі. Найбільш чітке співвідношення рельєфу зі структурним планом спостерігається у Зовнішніх Карпатах, де чергування гірських хребтів і улоговин, їхні висоти, характер розчленування та напрямки простягання пов'язані з серією покривів, що мають значний вплив на напрямок і будову річкових долин, які, в свою чергу, формують регіональні умови розвитку зсувів, селів та інших небезпечних інженерно-геологічних процесів. Серед усіх екзогенних геологічних процесів, що мають розвиток на території Закарпатської об-

ласті, зсуви є одним з найпоширеніших [2–6, 9, 10 *та ін.*].

Згідно з даними ДСНС та Геоінформ, станом на 1 січня 2020 р. на території області закартовано і занесено в кадастр 3288 зсувів загальною площею 385,21 км², з яких 6 зсувів активізувались повністю або частково на загальній площі 0,030096 км² [2–6 *та ін.*].

Антропогенна діяльність (розбудова інфраструктури, господарська діяльність на схилах, вирубка лісів, землеробство тощо), зміни клімату в подальшому збільшуватимуть втрати від розвитку зсувів у регіоні. Ключовим напрямом робіт з оцінки загроз і ризиків від зсувонебезпеки є виявлення та картування зсувонебезпечних ділянок та їх використання для розробки системи запобігання та розробки заходів із пом'якшення та управління землекористуванням із виключенням (вилученням з обігу) небезпечних ділянок.

Протягом останніх десятиліть картування зсувонебезпечних ділянок та прогнозування зсувонебезпечних схилів стало одним із основних напрямів робіт як для спеціалістів геологів, геоінженерів, так і для населення, місцевої влади в різних регіонах із зсувонебезпечними схилами по всьому світу [1, 11 *та ін.*].

Метою цієї статті є висвітлення результатів оцінки засобами просторово-статистичного аналізу основних і похідних геологічних факторів, що визначають поширення та активізацію зсувів у межах Закарпатської області, застосувати розроблену методіку регіонального прогнозування поширення зсувонебезпечних територій на основі ГІС для території Закарпаття та побудувати ітераційну регіональну модель прогнозу поширення зсувонебезпеки.

Стан вивчення питання, основні праці

Роботи з вивчення зсувів у межах Закарпаття виконувалися за чотирма основними напрямками: документування, облік зсувних схилів; аналіз причин утворення зсувів і факторів їх активізації; каталогізація, картографування та моніторинг зсувонебезпечних ділянок; прогнозування активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів [12, 13 *та ін.*].

Вивчення зсувів у межах Закарпатської області почалося ще в позаминулому столітті з досліджень на трасах залізничних доріг і родо-

вищ корисних копалин і до 60-х років ХХ ст. роботи виконувалися, як правило, після катастрофічних активізацій зсувних процесів, а роботи з вивчення зсувів зводились до обліку їх поширення та розробки класифікацій; за результатами подальших робіт було укладено кадастри, унікальні карти розповсюдження зсувів, селів, яружної ерозії, виконані роботи з виявлення причин і факторів їхньої катастрофічної активізації та обґрунтовано протизсувні заходи [3, 4, 5, 14, 15].

Аналіз геологічних, геоморфологічних та інших чинників зсувоутворення представлений в роботах М. Г. Демчишина, В. В. Кюнцеля, Г. І. Рудька, О. І. Шеко, Е. Д. Кузьменка та ін. [1, 2, 7, 8, 12, 13]. Незважаючи на багаторічну історію досліджень зсувонебезпечних процесів

територія Закарпатської області вивчена нерівномірно, з різним ступенем детальності, що значно впливає на оцінку просторових закономірностей поширення зсувів для подальшого впровадження при розробці заходів щодо зниження ризиків прояву небезпечних процесів.

Методологія досліджень

В останні роки геоінформаційні системи (ГІС) стали універсальним інструментом для візуалізації, аналізу, управління та моделювання просторових даних. Завдяки належному використанню ГІС, більшість підходів до прогнозу розвитку зсувів та оцінки зсувонебезпеки дозволяють повністю автоматизувати оцінку та стандартизацію методів управління даними, починаючи від обробки вихідних даних до аналізу отриманих побудов [1 та ін.]. Ці роботи зазвичай ґрунтуються на картографічній базі даних у складі карти поширення зсувів, топографічної карти (ізогіпси рельєфу, річкова мережа, дороги, залізниці та інші об'єкти антропогенного впливу), гідрогеологічних даних (рівні ґрунтових вод, структурна карта першого від денної поверхні водотриву), геологічних даних (карта четвертинних відкладів, карта диз'юнктивних порушень, тощо), метеорологічні дані (норма опадів). Склад бази даних залежить від наявності вихідної інформації та можливості її отримання в кожному конкретному випадку. Так, завжди присутні топографічні та метеорологічні дані, геологічні

та гідрогеологічні дані використовуються рідше через об'єктивні складнощі їх отримання [8, 11 та ін.].

Сучасні методи та прийоми прогнозу розвитку зсувів та оцінки зсувонебезпеки мають свої переваги й недоліки. Вибір інструменту прогнозування залежить від ряду параметрів: конкретної задачі, характеристик території дослідження, зокрема, ступеня складності геологічної будови. Точність і достовірність отриманих прогнозів розвитку зсувів залежить, головним чином, від якості, типу та об'єму вихідної інформації та вибору оптимальної комбінації зсувоутворюючих факторів, що, в свою чергу, обумовлюється характеристиками території. Наша робота складалася з наступних етапів: збір та аналіз інформації (зокрема картографічної) про поширення зсувів в Закарпатській області, укладання бази даних, інтегрованої у ГІС, встановлення просторових закономірностей зсувоутворення, аналіз даних про фактори зсувоутворення та їх картування, побудова ітераційної регіональної моделі прогнозу поширення зсувонебезпеки.

Матеріали

Вихідна інформація для аналізу факторів розвитку зсувних процесів представлена:

1) створеною авторами цієї статті за результатами узагальнення попередніх досліджень базою даних та картами поширення зсувів у межах Закарпатської області, інтегрованою у ГІС (рис. 1); 2) ізогіпсами рельєфу, які відповідають топооснові масштабу 1:200 000; 3) картою тектонічних порушень, знятих з геологічної карти масштабу 1:100 000 [3–5]; 4) даними про середньорічну кількість опадів та висоту снігового покриву (з кліматичної карти Закарпатської області масштабу 1:750 000 [5]).

Карту поширення зсувів у межах Закарпатської області було створено в середовищі ArcView 3.2a за результатами опрацювання матеріалів Державної геологічної служби України, Закарпатського геолого-гідрогеологічного центру ДП «Західукргеологія»,

НАК «Надра України», ДНВП «Геоінформ України». Зокрема, використано карти розповсюдження зсувних процесів масштабу 1:100 000 (В. В. Барничка) та масштабу 1:200 000 (М. М. Габор) за період 1980–2010 рр., матеріали ДГП «Західукргеологія», надані В. М. Петриком (Закарпатська КГП), І. А. Масенком (ДГП «Західукргеологія»), дані Інформаційних щорічників щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу інженерно-геологічних процесів, власні матеріали аналізу оперативних повідомлень ДСНС, роботи Інституту геологічних наук НАН України, а також топографічні карти масштабу 1:100 000 для прив'язки рельєфу, населених пунктів, гідрографії та транспортної інфраструктури [3–5 та ін.]. З внесених в кадастр 3288 зсувів нами враховано в базі даних 2575 зсувів, загальною площею 385,21 км² (рис. 1).

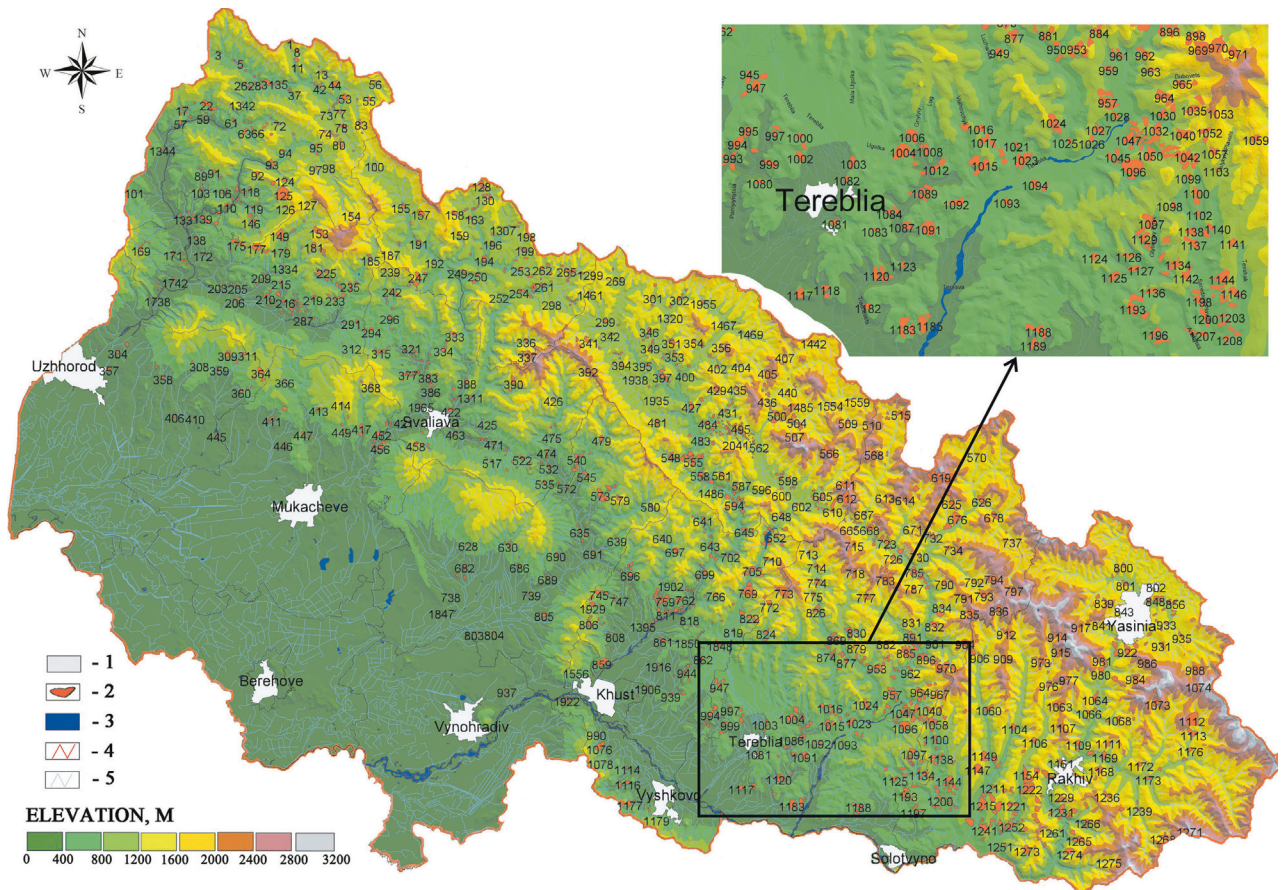


Рис. 1. Карта поширення зсувів Закарпаття:

1 — населенні пункти; 2 — наявні зсуви; 3 — озера, водосховища; 4 — державний кордон; 5 — річки.

Методика просторового аналізу

Для встановлення просторових закономірностей зсувоутворення проаналізовано вплив на поширення зсувів рельєфу території та його похідних (геоморфологічних факторів) і структурно-тектонічних умов (тектонічних факторів). Геоморфологічні фактори представлені числовими моделями (грідами): рельєфу; експозиції схилів; кутів нахилу схилів; дисперсії (середньоквадратичного відхилення рельєфу); локальної складової рельєфу. Тектонічні фактори представлені грідами: щільності тектонічних порушень; відстані до тектонічних порушень; відстані до тектонічних порушень певної орієнтації, які вірогідно впливали на структуроутворення території дослідження (для Карпатського регіону це траси в азимутальному інтервалі 90–180°); відстані до річкової мережі.

Для побудови ґридів факторів рельєфу, експозиції схилів, кутів нахилу схилів, відстані до тектонічних порушень, відстані до річкової мережі використовувалися стандартні методи *ArcView Spatial Analyst*, описані та використані раніше

в роботі [16 та ін.], які було доповнено інтерфейсом користувача відповідно до умов задачі. Гріди факторів дисперсії (середньоквадратичного відхилення рельєфу), локальної складової рельєфу та тренд рельєфу, щільності тектонічних порушень обчислювались методом ковзаючого вікна. Локальна складова рельєфу розраховувалась як різниця ґриду рельєфу та його тренду.

Вся територія дослідження покривалася регулярною точковою мережею S з кроком 100 м, яка по суті є її дискретною моделлю. Крок сітки DX визначався за формулою:

$$DX \leq (S_{min})^{0.5}$$

де S_{min} — мінімальна площа зсуву в межах території дослідження. Для зсувів Закарпаття $DX \sim 130$. Тому було прийнято $DX = 100$.

У вузлах цієї мережі було розраховано значення всіх факторів.

Кожний зсув у рамках такої моделі представляється множиною вузлів регулярної точкової мережі, які попали в полігон зсуву.

Прогнозування зсувонебезпеки виконувалось наступним чином.

На першому етапі будувались гістограми розподілів значень факторів у вузлах мережі, що належали зсувам. З гістограм для кожного фактора знімалися інтервали його значень, найбільш вірогідних для утворення зсувів. В даному дослідженні значення порогу вірогідності приймалося рівним 0,7.

Розрахунок інтервалу значень фактора, що відповідає вірогідності 0,7 виконувався за наступним алгоритмом.

Спочатку стандартними засобами ArcView для кожного фактора

$$F = \{f_0, f_1, \dots, f_i, \dots, f_{m-1}, f_m\},$$

де f_i — граничні значення інтервалів; m — число інтервалів, будується гістограма розподілу його значень на вузлах, що належать зсувам. Вірогідність i -го інтервалу гістограми:

$$p_i = n_i/N, \quad \sum_{i=1}^m n_i/N = 1,$$

де n_i — число вузлів мережі (в межах полігонів зсувів), в яких зафіксовано значення i -го інтервалу; N — загальне число вузлів мережі в межах полігонів зсувів.

Далі інтервали гістограми ранжуються за значеннями p_i ($p_1 > p_2 > p_3 > \dots > p_m$) і вибираються k перших інтервалів з умови:

$$\sum_{i=1}^k n_i/N > 0,7, \quad k < m.$$

Мінімальне та максимальне значення з границь k вибраних таким чином інтервалів дає шуканий інтервал значень фактора, що відповідає вірогідності 0,7.

Зауважимо, що якщо на гістограмі фактора маємо більше одного екстремуму, то це означає, що вибірка значень фактора неоднорідна, тобто зсуви на досліджуваній території можуть бути результатом кількох процесів, кожному з яких відповідає свій екстремум. В такому випадку

необхідні додаткові дослідження, результатом яких має бути поділ вихідної вибірки зсувів на однорідні в просторі факторів.

На другому етапі виконувалась власне побудова прогнозу карти зсувонебезпеки. Вона може бути виконана принаймні двома способами.

Перший спосіб. У кожному вузлі регулярної точкової мережі S за результатами першого етапу розраховується сумарна кількість факторів L , сприятливих для утворення зсуву. Припускаючи, що всі фактори рівноцінні, величина L пропорційна вірогідності утворення зсуву. Оконтуруючи полігонами вузли з однаковими значеннями L , отримуємо карту зон з різною вірогідністю утворення зсувів. Замість полігональної карти можна побудувати карту в ізолініях значень величини L . Максимальні значення L на цій карті відповідатимуть максимальній вірогідності утворення зсувів.

Другий спосіб. Використовуючи знайдені на першому етапі інтервали значень факторів, найбільш вірогідних для утворення зсувів, можна трансформувати вихідні ґриди факторів у (0,1)-ґриди, в яких одиниця відповідатиме вузлам ґриду, сприятливим для утворення зсувів. Сукупності 1-точок в свою чергу трансформуються в однофакторні полігони, перетини яких утворюють двох-, трьохфакторні тощо зони вірогідного утворення зсувів на прогнозній карті.

Такий підхід цікавий ще й тим, що може допомогти у формальному визначенні найінформативнішої комбінації факторів шляхом співставлення зон отриманої прогнозу карти з фактичною картою поширення зсувів. Співставляючи однофакторні прогнозні карти з тією ж фактичною картою поширення зсувів, можна ранжувати фактори за інформативністю і знайти числові коефіцієнти впливу кожного фактора на процес утворення зсуву.

В роботі використано другий підхід, як більш перспективний. Побудована регіональна модель прогнозу поширення ділянок розвитку зсувів враховує всі дев'ять факторів.

Основні результати дослідження та їх обговорення

Аналіз факторів утворення зсувів

Як показано в роботах [2, 7, 8, 12, 13 та ін.], розвиток зсувних процесів контролюється взаємодією ендегенних та екзогенних сил та антропогенної діяльності. Поділяючи та підтримуючи основні висновки зазначених досліджень, ми розглядаємо потенційні фактори ризиків зсу-

воутворення за двома групами: такі, що властиві ділянці та/або схилу (топографія / рельєф, геологія, літологія, гідрогеологія) та такі, що провокують активізацію зсувних процесів (інтенсивні зливи, землетруси, антропогенні зміни ландшафтів (зокрема, урбанізація, будівниц-

тво доріг, гірничовидобувна діяльність тощо). В роботі аналізувалися потенційні фактори ризиків зсувоутворення, які є власне характеристикою ділянки схилу: фактори рельєфу; експозиції схилів; кутів нахилу схилів; дисперсії (середньо-квадратичного відхилення рельєфу); локальної складової рельєфу; щільності тектонічних поршень; відстані до тектонічних порушень; відстані до річкової мережі.

Рельєф досліджуваної території неоднорідний. Більша частина області характеризується низько- та середньогірним рельєфом, інша — рівнинним. В геоморфологічному відношенні територія Закарпаття входить до складу провінції Східних Карпат, в якій виділяються підобласті [17]. У *табл. 1* представлено результати оцінки ураженості території зсувними процесами за окремими геоморфологічними областями. Найбільші відсо-

тки припадають на Мармароське брилове середньогір'я, Складчасто-брилове низько- та середньогір'я Вододільно-Верховинських Карпат та на Полонинсько-Чорногірське брилове середньогір'я.

Тектоніка (та неотектоніка) є визначальними при формуванні рельєфу та провідними факторами стійкості його форм. Тому, вплив сучасного рельєфу на розвиток зсувів, незважаючи на різні механізми їх утворення, є суттєвим.

Відстань до тектонічних порушень є фактором зсувоутворення, який пов'язаний з впливом неоднорідності геологічних умов та потенційної сейсмічної активності на гравітаційні схилі процеси. Відстань до водотоків (дрен) за багатьма експертними оцінками є одним з потенційних факторів ризику нестабільності схилів.

На *рис. 2 а-е* наведено отримані статистичні закономірності поширення зсувів залежно від

Таблиця 1.

Ураженість території зсувами в Закарпатській області відповідно до геоморфологічних областей

Геоморфологічна підобласть	Площа геоморфологічної області, км ²	Площа зсувних ділянок, км ²	Ураженість зсувами, %
Складчасто-брилове низько- та середньогір'я Вододільно-Верховинських Карпат на палеогенових відкладах	2112,01	87,50	4,14
Полонинсько-Чорногірське брилове середньогір'я на крейдових і палеогенових відкладах	4838,31	205,92	4,26
Мармароське брилове середньогір'я на докембрійських і палеозойських породах	294,87	20,47	6,94
Вигорлат-Гутинське денудаційно-вулканічне низькогір'я на неогенових відкладах	1783,81	22,16	1,24
Солотвинське пластово-денудаційне низькогір'я та пластово-аккумулятивна рівнина на неогенових відкладах	1135,09	31,53	2,78
Чоп-Мукачівська пластово-аккумулятивна низовина на неоген-четвертинних відкладах	2588,76	0,51	0,02
Всього:	12 752,85	368,09	3,23 (середнє)

крутизни, висоти схилів, їхньої просторової орієнтації, відстані від водотоків та тектонічних порушень. По вертикальній вісі відкладено сумарну площу зсувів, нормована на площу елементарної комірки регулярної точкової мережі, яка в рамках прийнятої моделі дорівнює 104 м². Аналіз гістограм дає змогу встановити закономірності поширення зсувних ділянок. При цьому треба зазначити, що на територіях з абсолютними відмітками понад 1200 м, відсоток зсувів, що фіксується, каталогізується і досліджується значно менший. В базі даних інформації про зсуви на цих висотах значно менше. Тому всі побудови і оцінки виконано на масиві даних про зсуви до висот 1280 м. Аналіз показує, що зсуви розвиваються на гіпсометричних позначках 160–1280 м, тобто в усьому інтерва-

лі висот, що досліджувалися, їхній максимум припадає на 280–730 м (*рис. 2 б*). Коментуючи цей результат треба зазначити, що в цьому інтервалі висот має місце прояв більшої частини техногенних чинників, зокрема забудови, перетворення ландшафтів шляховою мережею, гідротехнічними спорудами тощо. Тобто, за нашими уявленнями, на цих висотах розвиток зсувів провокують не стільки природні умови, скільки антропогенна діяльність. За даними *рис. 2 в* зсуви приурочені до схилів з кутами 4–28°, але переважна їхня кількість поширена на схилах з крутизною 7,5–22,4°. Гістограма узгоджується з одномодальним логнормальним законом розподілу ймовірностей, максимум частоти зсувів припадає на схили крутизною 11,2–14,9°. Кут нахилу схилу та дисперсія

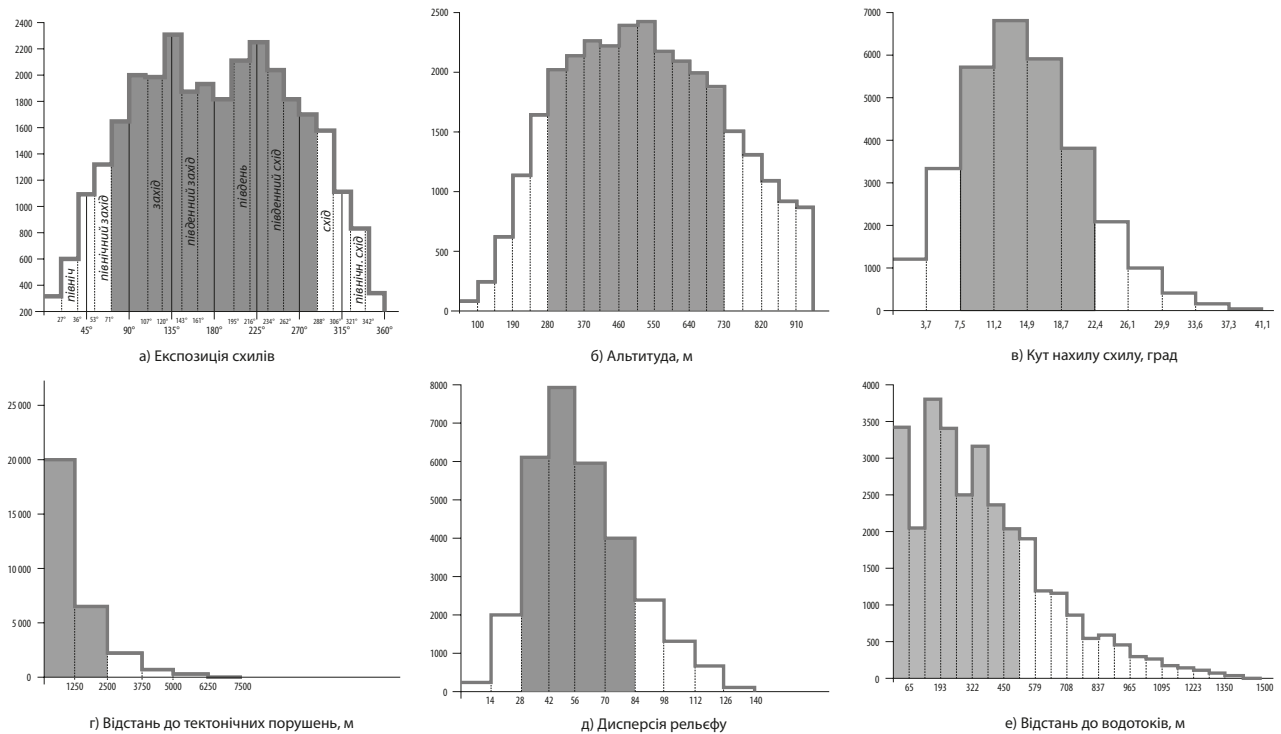


Рис. 2. Аналіз факторів зсувоутворення: *а* — просторова орієнтація схилів зі зсувами; *б* — альтитуда; *в* — крутизна схилів зі зсувами; *г* — розподіл зсувів за відстанню до тектонічних порушень; *д* — розподіл зсувів за дисперсією рельєфу; *е* — розподіл зсувів за відстанню до водотоків, м

рельєфу є важливим параметром, узгоджується з одномодальним логнормальним законом розподілу ймовірностей і має бути врахованим при оцінці ступеня зсувонебезпеки території. Зсуви в регіоні характерні для схилів, орієнтованих на захід, південний захід, південь та південний схід (**рис. 2 а**). Дві третини від усіх досліджених зсувів знаходяться в межах кіло-

метрової зони вздовж структурно-тектонічних порушень (**рис. 2 д**) та на відстані до 1250 м від порушень, що мають азимут 90–180°. На гістограмі фактора «відстань до водотоків» отримано тримодальний розподіл (**рис. 2 е**), що свідчить про необхідність додаткових досліджень зв'язку цього фактора з поширенням зсувонебезпечних ділянок.

Регіональна модель прогнозу поширення ділянок розвитку зсувів

Отриману за описаною вище методикою ітераційну регіональну модель прогнозу поширення зсувонебезпеки для території Закарпатської області, що враховує дев'ять потенційних факторів ризику зсувоутворення, наведено на **рис. 3**. При її побудові було прийнято, що всі фактори мають однакову вагу. Для територій, що розташовані на висотах понад 1200 м аналіз не проводився. Найменшу вірогідність до розвитку зсувів мають території Чоп-Мукачівської низовини, Солотвинського низькогір'я. Для цих територій закартовано один-три потенційних фактори зсувонебезпеки. Максимальну вірогідність мають території, зокрема на Мармароському бриловому середньогір'ї, на

яких прогнозується прояв семи-дев'яти факторів зсувонебезпеки.

Візуалізована ітераційна регіональна модель прогнозу поширення зсувонебезпеки є лише одним з можливих варіантів. На основі отриманої статистичної моделі зсувоутворення можуть бути побудовані карти для різної вірогідності (чим більша порогова вірогідність — тим ширші прогнозні області зсувонебезпеки, тобто прогноз менш диференційований). Разом з тим, прогноз більш статистично обґрунтований (зменшуються помилки першого та другого типу, тобто віднесення зсувонебезпечної ділянки до зсувобезпечних (помилка першого типу) і навпаки (помилка другого типу)).

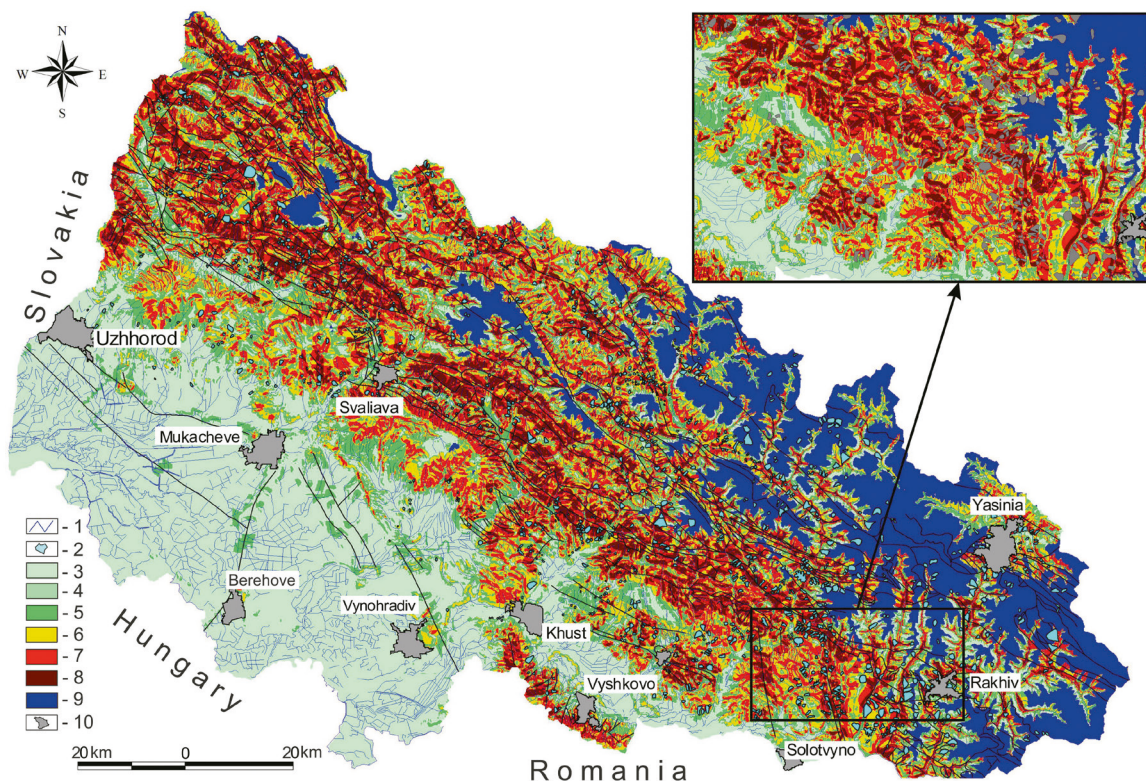


Рис. 3. Ітераційна регіональна модель прогнозу поширення зсувонебезпеки для території Закарпатської області (масштаб 1 : 200 000)

1 — річки; 2 — зсуви; ділянки сприятливі для розвитку зсувів: 3 — однофакторні; 4 — двофакторні; 5 — трифакторні; 6 — чотирифакторні; 7 — п'ятифакторні; 8 — шестифакторні; 9 — ділянки з альтитудою більше 1000 м; 10 — населенні пункти

Результати і новизна

Вперше створено інтегровану у ГІС базу даних зсувів та зсувонебезпечних ділянок на території Закарпатської області, що містить цифрову інформацію про 2575 зсувів, загальною площею 385,21 км², яку використано для аналізу факторів ризику зсувоутворення та регіонального прогнозу зсувонебезпеки.

Визначено та проаналізовано фактори ризику утворення зсувів, які пов'язані з рельєфом території та його похідними і структурно-тектонічними умовами. За узагальненням основних оціночних критеріїв, встановлено, що дві третини від усіх досліджених зсувів знаходяться в межах кілометрової зони вздовж структурно-тектонічних порушень та на відстані до 1250 м від порушень, що мають азимут 90–180°. Максимум розвитку зсувів припадає на висоти з гіпсометричними позначками 280–730 м, схили з крутизою 7,5–22,4°, які орієнтовані на захід, південний захід, південь та південний схід та на відстані до 500 м до водотоків.

Розроблено методику просторово-статистичного прогнозування зсувонебезпечних терито-

рій та побудовано ітераційну регіональну модель прогнозу поширення зсувонебезпеки для території Закарпаття.

Застосований підхід дав змогу вперше встановити закономірності поширення зсувів за результатами обробки великого масиву первинної картографічної інформації та отримати вірогідні граничні значення для характеристики факторів зсувоутворення, а також побудувати ітераційну регіональну модель прогнозу поширення зсувонебезпеки. Результати мають перспективи впровадження при розробці заходів щодо зниження ризиків прояву небезпечних зсувних процесів у Закарпатському регіоні.

Дослідження виконувались в рамках НДР «Інтегрування різномасштабних геологічних даних для вирішення фундаментальних та прикладних задач геології України» (КПКВК 6541230) та з використанням даних, отриманих при виконанні теми «Розробка та впровадження нових технологій та методів геологічного вивчення території України та освоєння мінерально-сировинних ресурсів» (КПКВК 5641030).

References [Література]

1. He Y., Beighley E. (2008). GIS-based regional landslide susceptibility mapping: A case study in southern California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 380–393. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1562>
2. Demchishin, M.G. (1988). Modern dynamics of the Ukraine territory slopes (Engineering-geological aspects). Kiev, 54. (Preprint of the Academy of Sciences of the USSR. Institute of Geological Sciences; 88–13). [in Russian].
[Демчишин М. Г. Современная динамика склонов территории Украины (Инженерно-геологические аспекты). Киев, 1988. 54 с. (Препринт АН УССР. Институт геологических наук; 88–13)].
3. Barnichka, V. Yu. (1980). Report on the exogenous geological processes study in the Transcarpathian region for 1978–1980. No. 42541. Berehovo, Book 1–5. [in Russian].
[Барничка В. Ю. Отчет по изучению экзогенных геологических процессов на территории Закарпатской обл. за 1978–1980 гг. № 42541. Берегово, 1980. Кн. 1–5].
4. Petryk, M.V. (1998). Study and forecast of exogenous geological processes in the Transcarpathian region, 1996–1998. No. 42541. Berehove, Book 1–2. [in Ukrainian].
[Петрик М. В. Вивчення та прогноз екзогенних геологічних процесів на території Закарпатської обл., 1996–1998 рр. № 42541. Берегове, 1998. Кн. 1–2].
5. Gabor, M. M. (2004). Report on the geological environment ecological status assessment of the Transcarpathian region near border areas in scale of 1:100 000. № 61159. Berehove, Book. 1–2. [in Ukrainian].
[Габор М. М. Звіт по оцінці екологічного стану геологічного середовища прикордонних територій Закарпатської області в масштабі 1:100 000. № 61159. Берегове, 2004. Кн. 1–2].
6. Information Yearbook on the activation of hazardous exogenous geological processes in the territory of Ukraine according to the exogenous geological processes monitoring data (2020). Prymushko, S. I., Kovalenko, N. B., Pyshna, N. G. (Eds.). State Geological Survey of Ukraine, SSE “State Informational Geological Funds of Ukraine,” Kyiv, 104. [in Ukrainian].
[Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів на території України за даними моніторингу ЕГП: С. І. Примушко, Н. Б. Коваленко, Н. Г. Пишна (ред.). Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2020, 104 с.].
7. Froude, M., & Petley, D. (2018). Global fatal landslide occurrence 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1–44. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-2018-49>
8. Khadka, A., Dhakal, S., & Budha, P. (2018). GIS Based Landslide Susceptibility Mapping along the Road Section from Bandeu to Barahabise, Sindhupal Chowk District of Nepal. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 7, 465–471.
9. Shekhunova, S. B., Siumar S. P., Lobasov, O. P., Yakovlev, E.O., Meijer, S., & Stadnichenko, S. M. (2019). GIS tools application for landslides formation factors analysis (Transcarpathian region) / First EAGE Workshop on assessment of landslide and debris flows hazards in the Carpathians, 17–20 June 2019, Lviv, Ukraine. L-05. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902160>
10. Shekhunova, S. B., Aleksieienkova, M. V., Kril, T. V., Stadnichenko, S. M., & Siumar, N.P. (2020). Natural and man-induced landslides formation factors within the Tysa-Apshysia interfluvium (Transcarpathia, Ukraine) / Second EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities, 8–9 September 2020, Kyiv, Ukraine. L-2020-01-18. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055018>
11. Lombardo, L., Tanyas, H., Huser, R., Guzzetti, F., Castro-Camilo, D. (2021). Landslide size matters: A new data-driven, spatial prototype. *Engineering Geology*, Vol. 293, 106288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106288>
12. Rudko, G. I., Klimchuk, L. M., Yakovlev, Ye. O. (1999). Scientific and methodological basis for predicting the environmental risk of hazardous geological processes in Transcarpathia in connection with their mass activation. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 42–45. [in Ukrainian].
[Рудько Г. І., Климчук Л. М., Яковлев Є. О. Наукові і методичні основи прогнозування екологічного ризику небезпечних геологічних процесів у Закарпатті у зв'язку з їх масовою активізацією. Мінеральні ресурси України. 1999. № 2. С. 42–45].
13. Kuzmenko, E. D., Blinov, P. V., Vdovina, O. P., Demchyshyn, M. G., Zhuravel, O. M., Kuzmenko, E. D. (ed.) (2016). Prediction of landslides: a monograph. *Ivano-Frankiv. national technical University of Oil and Gas. — Ivano-Frankivsk: IFNTUNG*, 601. [in Ukrainian]
[Прогнозування зсувів: монографія / Е. Д. Кузьменко, П. В. Блінов, О. П. Вдовина, М. Г. Демчишин, О. М. Журавель; ред.: Е. Д. Кузьменко; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2016. 601 с.]

14. Chverenko, V. M. (1988). Regional and stationary study of the PGI in the Transcarpathian region for 1986–1987. No. 50827. Berehove, Book 1–5. [In Russian].
[Чверенко В.М. Региональное и стационарное изучение ЗГП на территории Закарпатской области за 1986–87 гг. № 50827. Берегово, 1998. Кн. 1–5].
15. Gabor, M. M. et al. (2018). Information report on monitoring, accounting for the spread and activation of exogenous geological processes of the Transcarpathian Geological and Hydrogeological Center of the Lviv GRE for 2017. The state of the spread and activation of exogenous geological processes in the territory of the Transcarpathian region (regime, accounting and forecast). Berehovo, 2018. 43 p.
[Габ о р М. М. та ін. Інформаційний звіт з моніторингу, обліку поширення і активізації екзогенних геологічних процесів Закарпатського геолого-гідрогеологічного центру Львівської ГРЕ за 2017 р. Стан поширення і активізації екзогенних геологічних процесів на території Закарпатської області (режим, облік і прогноз). Берегово, 2018. — 43 с.]
16. Shekhunova, S. B. & Lobasov, O. P. (2001). Spatial statistical analysis of the Dnipro-Donets Basin tectonic disturbances systems and their application. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 1, 73–79. [in Ukrainian].
[Шехунова С. Б., Лобасов О. П. Просторовий статистичний аналіз систем тектонічних порушень Дніпровсько-Донецької западини та його застосування. Геологія і геохімія горючих копалин. 2001. № 1. С. 73–79].
17. Palienko, V. P., Barshchovsky, M. E., Bortnik, S. Yu., Palienko, E. T., Vakhrushev, B. O., Kravchuk, Ya. S., Gnatiuk, R. M., & Zinko, Yu. M. (2004). General geomorphological zoning of the territory of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 3–11. [in Ukrainian]
[Палієнко В. П. Загальне геоморфологічне районування території України / В. П. Палієнко, М. Є. Барщевський, С. Ю. Бортник, Е. Т. Палієнко, Б. О. Вахрушев, Я. С. Кравчук, Р. М. Гнатюк, Ю. М. Зінко // Український географічний журнал. 2004, № 1. С. 3–11]

Стаття надійшла до редакції 26.09.2021.

For citation [Для цитування]

Шехунова С. Б., Сюмар Н. П., Лобасов О. П., Стадніченко С. М. Аналіз просторових закономірностей поширення зсувів у межах Закарпатської області засобами ГІС // Укр. геогр. журн. 2022. № 3. С. 11–20. [Українською мовою] DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>

Shekhunova, S. B., Siumar, N. P., Lobasov, O. P., & Stadnichenko, S. M. (2022). Analysis of Spatial Patterns of Landslide Formation with GIS Tools (Zakarpatska Oblast). *Ukr. Geogr. Zh.*, 1, 11–20. [In Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>