



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.4.251>

УДК 528.88:551.4

Картування зсувонебезпечних районів із застосуванням методу аналізу ієрархій на прикладі правобережжя Канівського водосховища

Т. А. Орленко*, О. В. Седлерова, М. С. Лубський, С. І. Голубов, А. В. Хижняк

ДУ "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України", вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Вивчення зсувонебезпечних територій потребує аналізу великої кількості об'єктивних даних, продуктів обробки даних дистанційного зондування (космічних знімків, цифрові дані про висоту місцевості, аналітичні дані про розраховані індекси), аналітичних карт, побудованих на основі польових замірів. Всі ці дані дають змогу об'єктивно і точніше охарактеризувати досліджувану територію. Важливо, за результатами оцінювання, отримати висновок про сприятливі, несприятливі і небезпечні території. Саме таким результатом може стати карта сприйнятливості до зсувів. У цьому дослідженні ми провели процедуру створення карти сприйнятливості до зсувів на регіональному рівні для Ржищівської об'єднаної територіальної громади Київської області. Обрано вісім факторів, які впливають на розвиток зсувів або стають індикаторами зсувних процесів. Подано опис алгоритму створення карти сприйнятливості до зсувів за методом аналізу ієрархій. Отриманий результат дає уявлення про різну схильність ділянок досліджуваної території до розвитку зсувних процесів, окреслено ділянки найбільших загроз, що, своєю чергою, сприятиме раціональному прийняттю управлінських рішень.

Ключові слова: картування схильності до зсувів, SRTM, Sentinel, метод аналізу ієрархій.

© Т. А. Орленко, О. В. Седлерова, М. С. Лубський, С. І. Голубов, А. В. Хижняк. 2023

Вступ

Рельєф району правобережжя Канівського водосховища характеризується своєрідними особливостями розвитку (Демчишин, Беспалова, 1987). Ландшафт сформувався на різних етапах розвитку під впливом ендегенних та екзогенних факторів, серед яких тектонічні, еолові, ерозійні та ін. В результаті утворена складна морфоскульптура з основними, характерними елементами: лесове плато з нестійкими схилами; правобережна долина р. Дніпро з ерозійно-аккумулятивними терасами; яружно-балкові, ерозійні та зсувні форми рельєфу.

Наявність зсувонебезпечних ділянок у межах територіальних громад створює додаткове навантаження на систему управління та прийняття рішень. Зміна функціонального землекористування, розвиток населених пунктів та безпека життєдіяльності громади залежить від наявності інформації про поширення зсувонебезпечних ділянок, їх активізацію та прогнозування стану території. Тому картування схильності до зсувів (КСЗ) може використовуватися для ефективного планування та управління природними ресурсами (Piacentini et al., 2015) і є корисним інструментом для сталого розвитку регіону. Картування схильності до зсувів було впроваджено в останні десятиліття як

предмет досліджень у всьому світі (Pradhan & Kim, 2014; El Jazouli et al., 2019; Stankevich et al., 2019; Arabameri et al., 2020; Islam et al., 2022). Факторами, що сприяють виникненню зсувів, є літологічні, кліматичні, морфометричні чинники та інтенсивна антропогенна діяльність. Розвиток інфраструктурних комплексів, видобуток корисних копалин відкритим способом, кількість населення та зміна землекористування є основними антропогенними факторами поширення та активізації зсувів (Ivanik et al., 2022).

Укладені карти схильності до зсувів (КСЗ) є важливим джерелом для підвищення інформованості планувальних установ та осіб, що приймають рішення, щодо вживання важливих кроків в управлінні та захисті ґрунтів і природних ресурсів, а також визначення земель, придатних для розширення міст і сіл. Карти схильності до зсувів, основані на відповідних моделях, можна використовувати для визначення ймовірних ділянок зсувної небезпеки. Тобто, вони сприяють найефективнішому землекористуванню, при цьому уникаючи зон, що схильні до зсувів. Результати цього дослідження можуть слугувати основою для розробки стратегій раціонального використання природних ресурсів та управління територією.

Опис досліджуваної території

Ржищівська міська об'єднана територіальна громада (ОТГ), розташована в Обухівському районі

*E-mail: tetianaorlenko@ukr.net
<https://orcid.org/0000-0002-4933-7750>

Київської області, являє собою значущу географічну одиницю в межах Середнього Придніпров'я. Територія ОТГ в тектонічному відношенні знаходиться в зоні зчленування Українського щита з Дніпровсько-Донецькою западиною, що визначає її геоструктурні особливості. Регіон характеризується великим геологічним різноманіттям, що впливає на його природні умови. Станом на 2021 рік населення громади становило 14745 осіб, що визначається демографічними характеристиками регіону.

Комплекс порід, які відіграють важливу роль у екзогенних геологічних процесах досліджуваної території, включає палеогенові, неогенові та четвертинні відклади, які характеризуються перешаруванням пісків та глин або суглинистих пісків. Геоморфологічна будова регіону визначається місцевим базисом ерозії та впливом річища р. Дніпро. Рельєф території відрізняється значним перепадом висот (від 10–15 м до 80–120 м), коливанням базису ерозії, значними кутами нахилу схилів та впливом водосховища. Згідно з фізико-географічним районуванням, правобережжя Канівського водосховища входить в межі Київської височинної області та охоплює два райони: Васильківсько-Кагарлицький і Букринсько-Канівський (Маринич та ін., 2007). Клімат регіону дослідження помірно континентальний, м'який. Середня температура січня $-5,8...-6,5$ °С, липня $+19,2...+20,1$ °С, що є характерною особливістю для території північної України. Кількість опадів сягає 500–600 мм на рік, найбільша їх кількість випадає у червні–липні, характерні періоди дощів, які мають зливовий характер.

Матеріали та методи

Для створення КСЗ різні автори використовували як кількісний, так і якісний підходи (Ayalew & Yamagishi, 2005). Якісні методи відіграють ключову роль у підготовці картографування зсувів (Aleotti & Chowdhury, 1999). Одним із важливих і ефективних джерел даних, які використовуються для КСЗ, є карта інвентаризації зсувів (КІЗ) (Рис. 1).



Рис. 1. Поширення зсувів на території Київської області та правобережжі Дніпра. Карто-схема інвентаризації зсувів Ржищівської об'єднаної територіальної громади. (Інформаційний щорічник, 2017)

Цю карту отримано за допомогою інтерпретації космічних знімків Sentinel, зображень Google Earth та польових досліджень, зафіксованих у звітах інших фахівців (Інформаційний щорічник..., 2017, 2021). КІЗ вказує на просторовий розподіл зсувів у вигляді точок і полігонів. КІЗ є основною передумовою для картографування території, схильної до розвитку зсувів.

Дослідники в усьому світі застосовували різні види методів та технік, включаючи методи, основані на знаннях імовірностей, машинного навчання, інтелектуального аналізу даних для картографування територій, схильних до зсувів. Приклади застосування цих методів та підходів містяться в літературі, включаючи метод аналізу ієрархій (MAI) або Analytic Hierarchy Process (AHP), співвідношення частот (FR), статистичний індекс (SI), доказову функцію переконання (EBF), номінальний фактор ризику зсуву (LNRF), Демпстера-Шейфера (DS), логістичну регресію (LR), ваги доказів (WOE), нечітку логіку (FL), штучну нейронну мережу (ANN), посилене дерево регресії (BRT), найменші квадрати SVM (LSSVM), багатовимірний адаптивний регресійний сплайн (MARS), адаптивну нейронечітку систему висновку (ANFIS), випадковий ліс (RF), дерево рішень (DT), лінійну дискримінантну функцію Фішера (FLDA), Байєсову логістичну регресію (BLR), дерево логістичної моделі (LMT) та альтернативне дерево рішень (ADTree) (El Jazouli et al., 2019; Stankevich et al., 2019; Arabameri et al., 2020; Islam et al., 2022).

Для аналізу зсувів за технологічною схемою методики (Рис. 2) у дослідженні використовувалися вісім факторів, що впливають на розвиток зсувів, а саме: ступінь крутизни схилу, щільність лінеаментів (як зон розущільнення гірських порід), неотектонічна активність території (відображена у базисних поверхнях), літологію досліджуваної ділянки, значення вологості ґрунту, дані про поширення рослинності, розподіл земної поверхні за напрямом землекористування та вертикальні зміщення земної поверхні.

Обрані фактори провокують зміни в стабільності схилів берегів Канівського водосховища в межах Ржищівської ОТГ та підвищують ризик активізації і утворення нових зсувів або відображають зміни, що є результатом таких змін. Створено тематичні шари у векторному форматі, що містять формалізовані показники цих факторів, методом аналізу ієрархій (MAI) визначено вагові коефіцієнти обраних факторів, потім векторизовані шари об'єднано за ваговими коефіцієнтами, при цьому застосовувались можливості геоінформаційної системи, створено карту сприйнятливості території до зсувів.

Джерела та дані, використані в дослідженні

Фактор потенційного ризику небезпеки

1. *Карти вертикальних зміщень земної поверхні*, отримані при обробці радіолокаційних знімків за методом диференціальної радарної інтерферометрії, виконаної за даними супутника Sentinel-1. З метою створення інтерферограми

використовувалися інтерферометричні продукти Single Look Complex (SLC) з часовою різницею 12 днів, у низхідній геометрії, для визначення вертикальних

змін земної поверхні за весняний період з 2015 по 2023 роки.

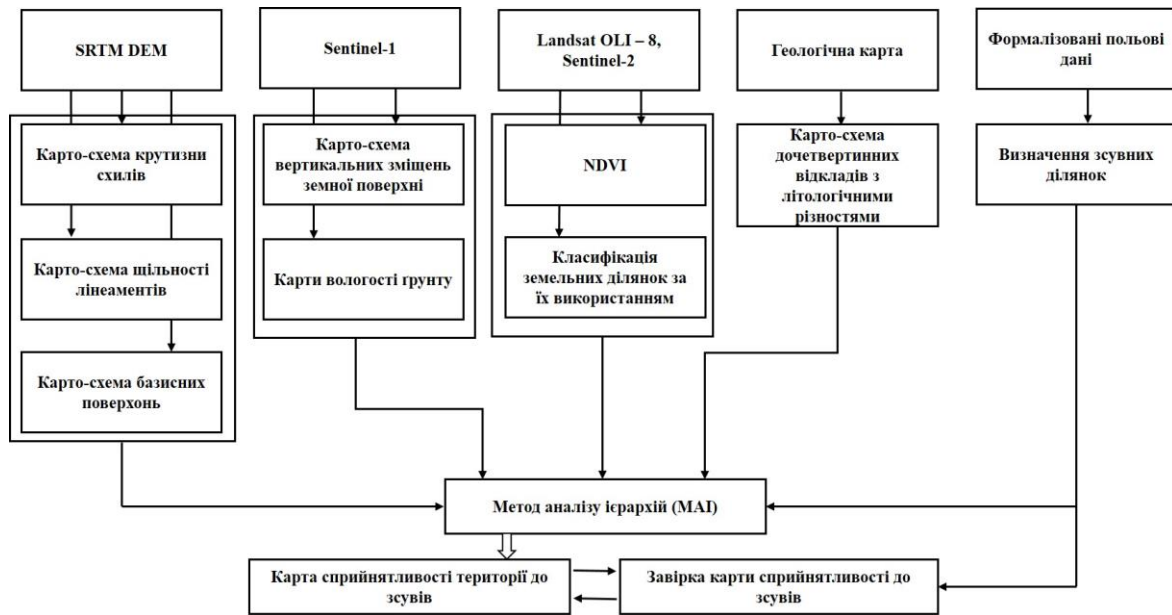


Рис. 2. Загальна технологічна схема методики створення карти сприйнятливості території до зсувів

Топографічні фактори

2. *Карто-схема крутизни схилів* у градусах від 5 до 30. Для створення цього шару даних використовували дані просторової розрізненості 30 м. Від крутизни схилів залежить активізація зсувної діяльності при наявності додаткових факторів, що провокують екзогенні геологічні процеси, виступаючи тригером зсувонебезпечності. На досліджуваній території спостерігається розвиток зсувів на ділянках із крутизною вище 15 градусів.

Геологічні фактори

3. *Карто-схема щільності лінементів* отримана з аналізу просторового розповсюдження тектонічних порушень та зон лінементів, що визначають зони розшарування гірських, зокрема, осадових порід. Створена авторами на основі аналізу тектонічної схеми, геологічної карти та даних SRM.

4. *Схема літологічних різностей у межах ділянки дослідження.* Важливим є те, що у межах Ржищівської ОТГ, яка розташована на правобережжі Канівського водосховища розвинені відклади палеогену, неогену та четвертинного періоду. Характерною особливістю є перешарування піщаних, піщанистих шарів з глинистими, що мають схильність до замокання при надлишковій кількості опадів. Основні дані про літологію були отримані з Державної геологічної карти України масштабу 1:200 000, 2001, 2006 та 2009 років.

5. *Карто-схема базисних поверхонь* 3–4 порядків, побудована за результатами морфометричного аналізу карт водотоків (дренажної сітки), створеної на основі топографічних карт масштабу 1:25000 та даних SRM.

Біофізичні фактори поверхні

6. *Карти поверхневої вологості ґрунту*, які відображають відносний вміст води у верхньому

шарі ґрунту, виражені у відсотках насиченості, що вимірюється радіолокаційними датчиками супутника Sentinel-1. Слід зазначити, що на вологість ґрунту впливають катастрофічні і затяжні опади, які призводять до перенасичення відкладів вологою та їх втрати стійкості до зсувів.

7. *Індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* є важливим інструментом для визначення динаміки зсувних процесів. Збільшення або зменшення нормалізованого диференційованого вегетаційного індексу протягом певного періоду може вказувати на зміни в рослинному покриві, що є індикатором інтенсифікації екзогенних процесів, зокрема, зсувної діяльності. Для розрахунків спектральних індексів було використано знімки супутника Landsat-8 та Sentinel-2 з 2015 по 2023 роки, за період березень–квітень, згідно з проведеними інтерферометричними дослідженнями, з просторовою розрізненістю 30 та 10 м (Лубський та ін., 2023).

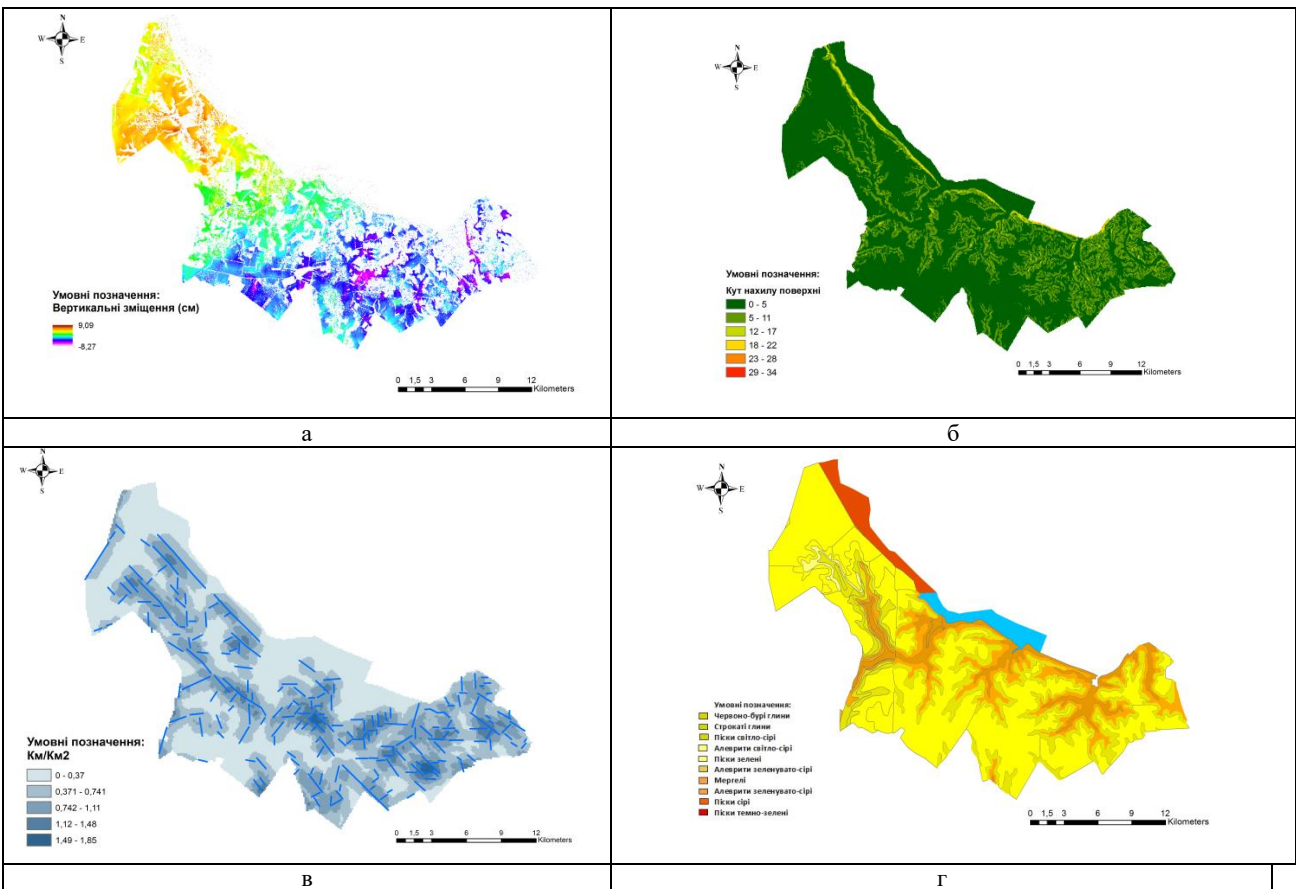
8. *Фактор використання земель* є важливим як при встановленні зміни використання земель через вплив екзогенних процесів, зокрема, активізації зсувів, так і для прийняття рішень щодо подальшого використання земель та зміни їх призначення. Дані отримані за класифікацією типів змного покриву багатоспектрального знімка супутника Sentinel-2.

У Табл.1 подано опис даних, просторову розрізненість цих даних, джерела та спосіб їх отримання.

Отже, використовуючи наявні джерела та інструменти для восьми обраних факторів були побудовані векторні шари даних (Рис. 3), які надалі були застосовані для отримання карти сприйнятливості до зсувів.

Таблиця 1. Опис даних, розрізненість, ресурси отриманих даних

Джерело даних, просторова розрізненість (м)	Отримання даних	Ресурс даних	Продукт
SRTM, 30 м	Оброблено в середовищі QGIS	https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non	Карто-схема крутизни схилів
SRTM, 30 м	Інтерактивне дешифрування	https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non	Карто-схема щільності лінеаментів
SRTM, 30 м	Оброблено в середовищі QGIS	https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non	Карта-схема базисних поверхонь
Державна геологічна карта Масштаб 1:200 000	Діджиталізовано	Державна геологічна карта	Карто-схема дочетвертинних відкладів з літологічними різностями
Карти поверхневої вологості ґрунту 1 км	Завантажено	https://land.copernicus.eu/global/products/ssm	Карти вологості ґрунту
Landsat-8 OLI, 30 м	Розраховано $NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	https://earthexplorer.usgs.gov	NDVI Нормалізований диференційний вегетаційний індекс
Sentinel-2, 10 м	Проведено класифікацію типів земного покриву	https://earthexplorer.usgs.gov або https://www.esa.int	Карто-схема землекористування Класифікація земного покриву
Sentinel-1, 10 м	Отримані при обробленні радіолокаційних знімків	https://www.esa.int	Карти зміщень



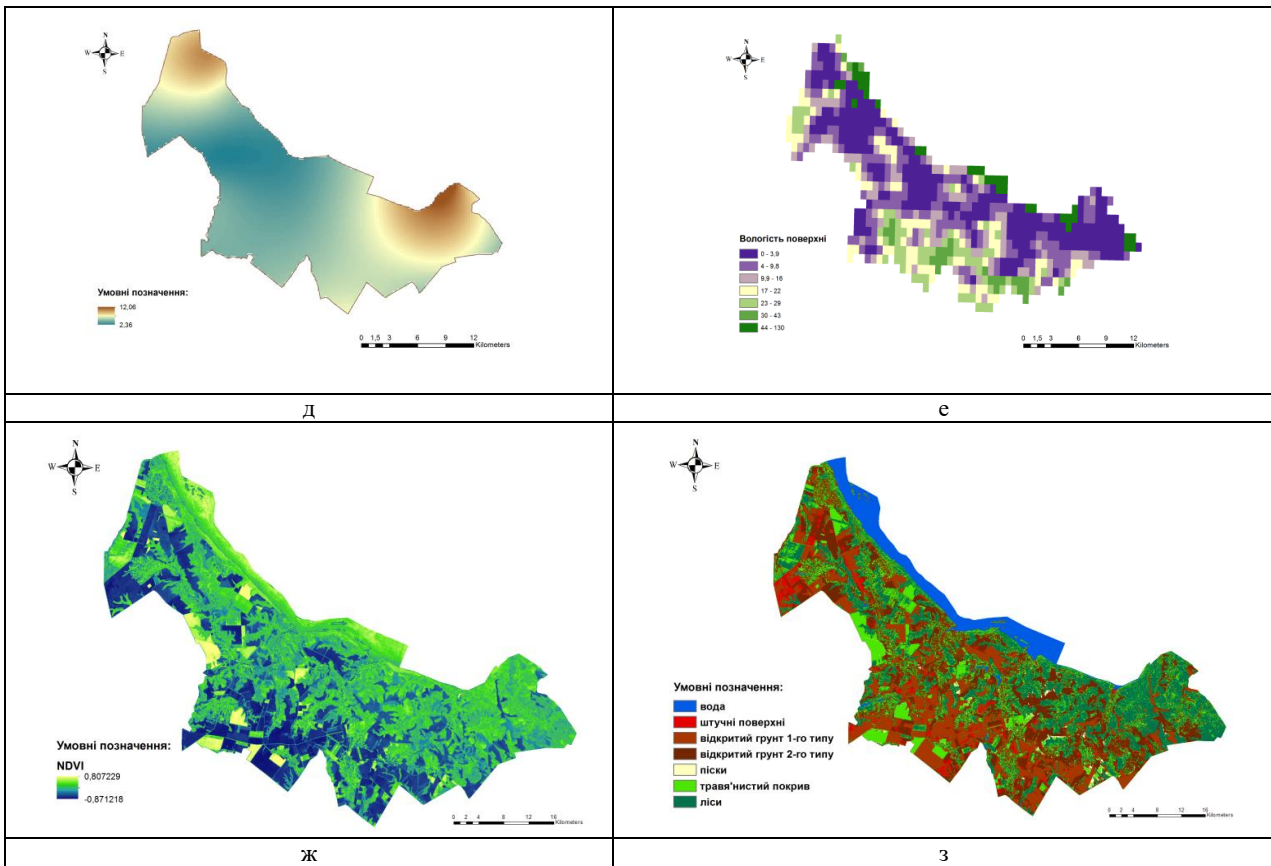


Рис. 3. Фактори, які обумовлюють розвиток зсувів: а – карта зміщень (дані за 12.03.2022 р.); б – карто-схема крутизни схилів; в – карта щільності лінеаментів; г – схема літологічних різностей; д – карта базисних поверхонь; е – карто-схема вологості ґрунту (дані за 12.03.2022 р.); ж – індекс NDVI; з – карто-схема класифікації земель за їх використанням

Метод аналізу ієрархій для побудови карти сприйнятливості до зсувів

Для визначення відносної ваги факторів зазначених на Рис. 3 використано метод аналізу ієрархій (MAI) (Saaty, 1980), за яким визначено пріоритет факторів та субфакторів, що є причиною зсувів на правобережжі Канівського водосховища. MAI був розроблений Т. Сааті для моделювання взаємозв'язків між окремими складовими задачі прийняття рішення за допомогою ієрархічної структури з подальшим визначенням ваг або пріоритетів альтернатив рішень відносно елементів цієї структури. Аналіз при вивченні зсувів на

правобережжі Канівського водосховища базується на трьох принципах: декомпозиція, порівняльне судження та синтез пріоритетів. Ієрархічна структура факторів та показників дослідження показана на Рис. 4. Фактори, що були визначені як значущі для оцінювання зсувонебезпечності, в оцінюванні сприйнятливості виступають в ролі індикаторів, які об'єднані в групи за генезисом або способом отримання інформації. Попарні порівняння проводилися в термінах домінування одних індикаторів над іншими. Порівняння проводилося експертами за дев'ятибальною порядковою шкалою “відносної важливості” (Табл. 2) (Saaty, 1980).

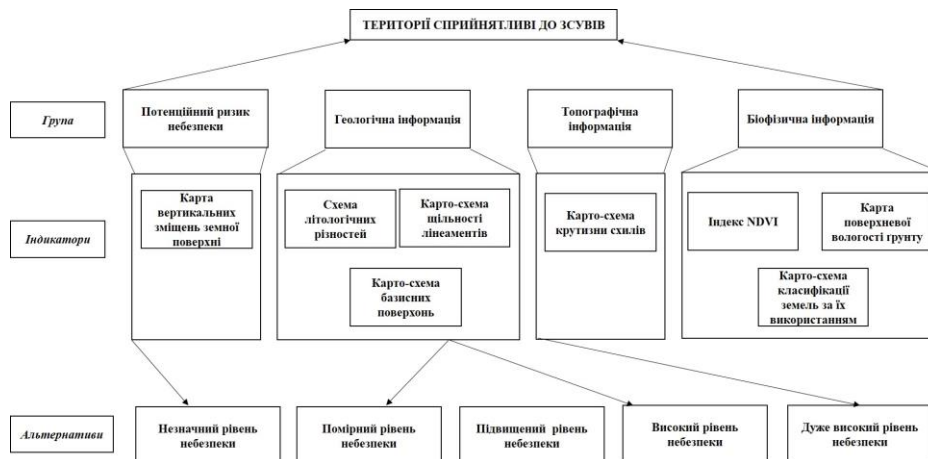


Рис. 4. Ієрархічна структура факторів та показників дослідження

Таблиця 2. Таблиця оцінювання ступенів важливості факторів, що застосовуються в моделі

Ступінь важливості	Значення	Пояснення
1	Однакова важливість	Дві альтернативи однаково поставленої мети
3	Слабка перевага	Досвід і судження експерта дають змогу віддати незначну перевагу одній альтернативі над іншою
5	Сильна перевага	Досвід і судження експерта дають змогу віддати перевагу одній альтернативі над іншою
7	Очевидна (дуже сильна) перевага	Одна альтернатива очевидно переважає над іншою
9	Абсолютна перевага	Докази, які свідчать про перевагу однієї альтернативи над іншою, мають найвищий можливий порядок підтвердження
2,4,6,8	Проміжні значення	Коли потрібен компроміс між двома сусідніми судженнями

Аналіз факторів впливу на зсуви реалізовано в кілька послідовних кроків, таких як: розробка ієрархічної структури визначеної задачі, виконання двійкових порівнянь критеріїв, встановлення порівняльної матриці суджень, обчислення векторів пріоритетів, надання значення випадковому індексу (RI), обчислення середнього значення, створення таблиці оцінювання ступенів важливості критеріїв моделі та прийняття остаточного рішення на основі узагальненого критерію.

МАІ дав змогу сконструювати необхідну цільову функцію й оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. Отримавши значення векторів локальних пріоритетів (вагових

коефіцієнтів), визначено значення згортки узагальненого критерію $K(x)$ згідно з формулою (1), що дало змогу оцінити території, сприятливі до зсувів, за всією сукупністю індикаторів та складових запропонованої ієрархії.

$$K(x) = \prod_{j=1}^n K_j^{a_j}(x), \quad (1)$$

де $K(x)$ – узагальнений критерій для альтернативи $x \in X$, який показує зсувонебезпечність території; $K_1(x), \dots, K_j(x), \dots, K_n(x)$ – набір вхідних індикаторів; n – число вихідних критеріїв; a_j – відносна вага (важливість) часткового критерію K_j . Для ваг виконується умова нормування вхідних значень

$\sum_{j=1}^n a_j = 1$, яка необхідна, щоб результати, отримані в різних умовах, можна було порівняти.

Багатокритеріальний підхід до моделювання стану навколишнього середовища на основі МАІ є досить поширеним в дослідженнях, в яких застосовуються гетерогенні дані дистанційного зондування, оскільки він позитивно себе зарекомендував для формування відносних багатофакторних оцінок ризиків, ступеня зсувонебезпечності території та інших задач, тому є основою для створення карти сприйнятливості до зсувів.

Результати та обговорення

Для реалізації МАІ при оцінюванні зсувної небезпеки в межах досліджуваної території для обраних даних сформовано матрицю переваг, на основі якої визначено вагові коефіцієнти впливу на зсувну небезпеку для кожного типу даних (Табл. 3). Для одержаної матриці коефіцієнт узгодженості становить 0,0979, тобто $\approx 9\%$, що менше припустимих за теорією МАІ 10% (Saaty, 1980).

Таблиця 3. Матриця переваг

	Зміщення земної поверхні	Крутизна схилів	Щільність лінеаментів	Літологічні різності	Базисні поверхні	Вегетаційний індекс NDVI	Типи земної поверхні	Вологість ґрунту
Зміщення земної поверхні	1	5	5	6	5	4	5	6
Крутизна схилів	0,2	1	2	4	3	4	3	4
Щільність лінеаментів	0,2	0,5	1	3	4	2	2	4
Літологічні різності	0,16	0,25	0,33	1	2	3	3	4
Базисні поверхні	0,2	0,33	0,25	0,5	1	2	2	4
Вегетаційний індекс NDVI	0,25	0,25	0,5	0,33	0,5	1	4	4
Типи земної поверхні	0,2	0,33	0,5	0,33	0,5	0,25	1	2
Вологість ґрунту	0,16	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	1

Також визначено вагові коефіцієнти для кожного із факторів, за ступенем інтенсивності їх впливу на зсувоутворення, які наведено в Табл. 4.

Таблиця 4. Вагові коефіцієнти для факторів визначені за МАІ

Критерій	Ваговий коефіцієнт
Зміщення земної поверхні	38
Кругизна схилів	15,4
Щільність лінеаментів	10,53
Літологічні різності	10,3
Вегетаційний індекс NDVI	8,8
Базисні поверхні	8,67
Типи земної поверхні	5,08
Вологість ґрунту	3,24

За результатами виконання багатокритеріального аналізу на основі МАІ отримано карту розподілу ступеня зсувної небезпеки для досліджуваної території (Рис. 5).

Інтеграція зважених растрових карто-схем виконана в середовищі QGIS. Результатом чого є створення карти сприйнятливості до зсувів, у якій значення червоного кольору відповідають найвищому рівню зсувонебезпеки, зеленим кольором визначено ділянки, зсуви на яких неможливі.

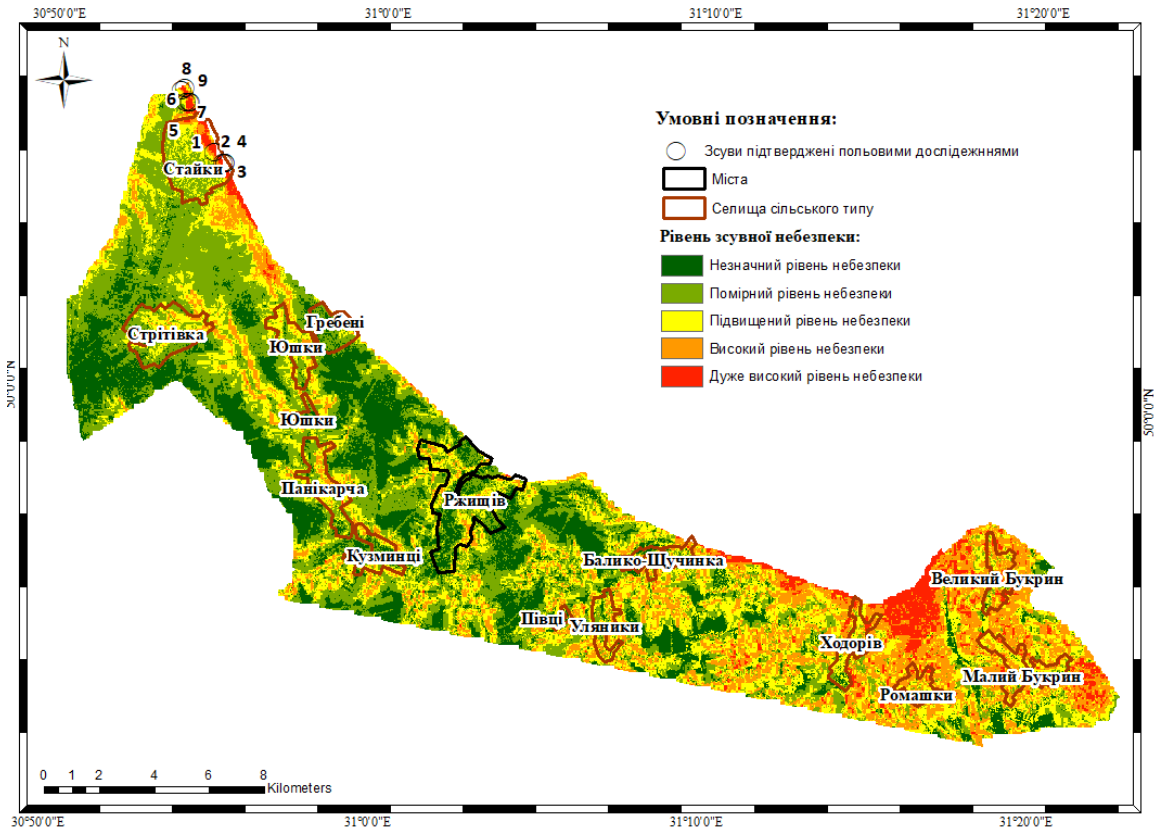


Рис. 5. Карта сприйнятливості до зсувів території Ржищівської ОТГ

У дослідженні використано класифікатор за такими п'ятьма категоріями: незначний рівень небезпеки, помірний рівень небезпеки, підвищений рівень небезпеки, високий рівень небезпеки, дуже високий рівень небезпеки. Дуже високий рівень небезпеки мають круті схили Канівського водосховища. Підвищений та високий рівень небезпеки мають схили балкової мережі. Низький рівень небезпеки зафіксовано на вододільних ділянках з густим лісовим покривом та рідколіссям.

Висновки

За останні два десятиліття спостерігається поступове збільшення кількості природних катастроф, пов'язаних зі зсувами на території України. Тому оцінювання територій за ступенем ураженості зсувами та прогнозом їх активізації є важливим і актуальним завданням.

Оскільки геоінформаційні системи є корисним інструментом для аналізу ризиків, важливим є також використання можливостей ГІС із застосуванням методу аналізу ієрархічного (МАІ). Рекомендації сформовані шляхом вагового оцінювання факторів впливу з урахуванням поставлених завдань, а також альтернатив з погляду кожного фактора та остаточних балів для альтернатив. Отже, для території Ржищівської ОТГ сформовано карту сприйнятливості до зсувів, за якою дуже високий рівень небезпеки сягає 15 %, підвищений та високий рівень небезпеки – 23 % та 18 % відповідно, альтернатива з низьким та помірним рівнем небезпеки – 44 % території. Необхідним є своєчасна розробка системи раннього попередження, планування та визначення пріоритетних заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

Література

- Геологічна карта СРСР масштабу 1:200000. (1973). Аркуш М36-XX (Корсунь Шевченківський). Центральноукраїнська серія. Київ: Міністерство геології СРСР, Міністерство геології УРСР.
- Демчишин, М. Г., Беспалова, Е. Н. (1987). Инженерно-геологические условия правобережных склонов Среднего Днепра. *Основания и фундаменты*, 20, 15–19.
- Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200000. (2001). Аркуш М36-ХІІІ (Київ). Київ: Державна геологічна служба, Північне державне регіональне геологічне підприємство “Північгеологія”.
- Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200000. (2009). Дніпрово-Донецька серія. Аркуш М36-ХІV (Переяслав-Хмельницький). Київ: Державна геологічна служба, Північне державне регіональне геологічне підприємство “Північгеологія”.
- Державна геологічна карта України. Масштаб 1:200000. (2006). Центральноукраїнська серія. Аркуш М36-ХІХ (Біла Церква). Київ: Державна геологічна служба, Північне державне регіональне геологічне підприємство “Північгеологія”.
- Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. (2021). Примушко С. І., Коваленко Н. Б., Пишна Н.Г. (Ред.). Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”.
- Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. (2017). Примушко С. І., Білошапська Т. Д., Величко В. Ф. (Ред.). Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”.
- Лубський, М., Орленко, Т., Пестова, І., Андреев, А., Лисенко, А. (2023). Оцінка індикаторів опустелювання регіону Олешківські піски за довготривалими часовими рядами даних супутникового знімання Landsat. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 10(1), 17–28. doi:10.36023/ujrs.2023.10.1.229.
- Маринич, О. М., Пащенко, В. М., Петренко, О. М., Шищенко, П. Г. (2007). *Фізико-географічне районування: карта – 1:2500000*. Київ: Національний атлас України.
- Aleotti, P., Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Env.*, 58, 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>.
- Arabameri, A., Saha, S., Roy, J., Chen, W., Blaschke, T., Tien Bui, D. (2020). Landslide Susceptibility Evaluation and Management Using Different Machine Learning Methods in The Gallicash River Watershed, Iran. *Remote Sensing*, 12(3), 475. <https://doi.org/10.3390/rs12030475>.
- Ayalew, L., Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>.
- El Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R. (2019). GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco). *Geoenvirom Disasters*, 6, 3. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0119-7>.
- Islam, F., Riaz, S., Ghaffar, B., Tariq, A., Shah, S. U., Nawaz, M. ... Aslam, M. (2022) Landslide susceptibility mapping (LSM) of Swat District, Hindu Kush Himalayan region of Pakistan, using GIS-based bivariate modeling. *Front. Environ. Sci.*, 10, 1027423. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027423>.
- Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52(I–III), 81–86. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139947>.
- Piacentini, D., Devoto, S., Mantovani, M., Pasuto, A., Prampolini, M., Soldati, M. (2015). Landslide susceptibility modeling assisted by Persistent Scatterers Interferometry (PSI): an example from the northwestern coast of Malta. *Nat. Hazards*, 78, 681–697. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1740-8>.
- Pradhan, A. M. S., Kim, Y. T. (2014). Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: a case study in Deokjeokri Creek, South Korea. *Nat. Hazards*, 72, 1189–1217. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1065-z>.
- Saaty, T. L. (1980). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234–281.
- Saaty, T. L. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium*. (pp. 15–37). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V., Svideniuk, M. O. (2019, December). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight-of-evidence modelling in Central Georgian regions. Proceeding of the International Scientific Conference Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation, 187–190, Tbilisi.

References

- (Ed.). Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine" (in Ukrainian).
- Islam, F., Riaz, S., Ghaffar, B., Tariq, A., Shah, S. U., Nawaz, M. ... Aslam, M. (2022) Landslide susceptibility mapping (LSM) of Swat District, Hindu Kush Himalayan region of Pakistan, using GIS-based bivariate modeling. *Front. Environ. Sci.*, 10, 1027423. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1027423>.
- Ivanik, O., Fonseca, J., Shabatura, O., Khomenko, R., Hadiatska, K., Kravchenko D. (2022). An integrated approach for landslide hazard assessment: A case study of the Middle Dnieper Basin, Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 52(I–III), 81–86. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139947>.
- Lubskiy, M., Orlenko, T., Piestova, I., Andreiev, A., Lysenko, A. (2023). Evaluation of indicators for desertification risk assessment of Oleshky Sands Desertification based on Landsat Data Time Series. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 10(1), 17–28. doi:10.36023/ujrs.2023.10.1.229 (in Ukrainian).
- Marynych, O. M., Pashchenko, V. M., Petrenko, O. M., Shishchenko, P. G. (2007). *Physico-geographic zoning: map – 1:2500000*. Kyiv: National atlas of Ukraine (in Ukrainian).
- Piacentini, D., Devoto, S., Mantovani, M., Pasuto, A., Prampolini, M., Soldati, M. (2015). Landslide susceptibility modeling assisted by Persistent Scatterers Interferometry (PSI): an example from the northwestern coast of Malta. *Nat. Hazards*, 78, 681–697. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1740-8>.
- Pradhan, A. M. S., Kim, Y. T. (2014). Relative effect method of landslide susceptibility zonation in weathered granite soil: a case study in Deokjeokri Creek, South Korea. *Nat. Hazards*, 72, 1189–1217. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1065-z>.
- Saaty, T. L. (1980). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15, 234–281.
- Saaty, T. L. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium*. (pp. 15–37). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Stankevich, S. A., Titarenko, O. V., Svideniuk, M. O. (2019, December). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight-of-evidence modelling in Central Georgian regions. Proceeding of the International Scientific Conference Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation, 187–190, Tbilisi.
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200000*. (2001). Sheet M36-XIII (Kyiv). Kyiv: State Geological Service, Northern State Regional Geological Enterprise "Pivnichheolohiia" (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200000*. (2009). Dnipro-Donetsk series. Sheet M36-XIV (Pereyaslav-Khmelnyskyi). Kyiv: State Geological Service, Northern State Regional Geological Enterprise "Pivnichheolohiia" (in Ukrainian) (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine. Scale 1:200000*. (2006). Central Ukrainian series. Sheet M36-XIX (Bila Tserkva). Kyiv: State Geological Service, Northern State Regional Geological Enterprise "Pivnichheolohiia" (in Ukrainian).

MAPPING OF LANDSLIDE-PRONE AREAS USING ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS USING THE RIGHT BANK OF THE KANIV RESERVOIR AS AN EXAMPLE

T. A. Orlenko, O. V. Sedlerova, M. S. Lybskyi, S. I. Golubov, A. V. Khyzhniak

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

The study of landslide-prone areas requires analysing of a large amount of objective data, results of remote sensing data processing (spatial images, digital terrain elevation data and calculated indices analytical data), analytical maps based on field measurements. With this data it is possible to characterize the studied territory more objectively and accurately. It is important, that we can get a conclusion about favorable, unfavorable and dangerous areas based on the results of the assessment. The result is a landslide susceptibility map. In this study, we carried out the procedure of creating a landslide susceptibility map at the regional level for the Rzhyschiv united territorial community of the Kyiv region. Eight factors that influence the development of landslides or indicate landslide processes are selected. A description of the algorithm for creating a landslide susceptibility map using the method of hierarchical analysis is provided. The obtained result gives an idea of the different propensity of the areas of the studied territory to the development of landslide processes, meaning the areas of the greatest threats, which contributes to the rational adoption of management decisions.

Keywords: landslide susceptibility mapping, SRTM, Sentinel, analytical hierarchy process.

*Рукопис статті отримано 01.12.2023
Надходження остаточної версії: 24.12.2023
Публікація статті: 29.12.2023*