

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.347039>

УДК 551.31:551.435.6(477.64+477.72)

Аналіз просторових закономірностей розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів засобами ГІС у зоні впливу колишнього Каховського водосховища

E-mail: stadnichenkosm@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-1038-6878>;
siumar@meta.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-5950-7576>;
lobasov54@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-8474-4821>;
marinaal@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0003-4214-6465>

Received / Надійшла до редакції:
19.08.2025

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
12.11.2025

Accepted / Прийнята:
11.12.2025

*Corresponding author /
Автор для кореспонденції:
S.M. Stadnichenko,
stadnichenkosm@gmail.com

Keywords: geological monitoring, hazardous exogenous geological processes, slope processes, landslide formation factors. Kakhovka Reservoir.
Ключові слова: моніторинг геологічного середовища, небезпечні екзогенні геологічні процеси, схилі процеси, фактори зсувоутворення, Каховське водосховище.

С.М. Стадніченко*, Н.П. Сюмар, О.П. Лобасов, М.В. Алексєєнкова

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Spatial patterns analysis of hazardous exogenous geological processes development using GIS tools within the area affected by the former Kakhovka Reservoir

S.M. Stadnichenko*, N.P. Siumar, O.P. Lobasov, M.V. Aleksieienkova

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Military aggression against Ukraine by Russia is having a catastrophic impact on the geological environment, in particular the destruction of the dam at the Kakhovka Hydroelectric Power Plant (HPP). The aim of this study was to justify approaches to the analysis and assessment of the hazardous exogenous geological processes dynamics in order to develop technologies for geological environment monitoring and support decision-making on the reconstruction of the territory and post-war economic recovery in Ukraine. The territory was ranked according to the density and frequency of occurrence of various types of processes (karst, slope processes, flooding, loess soil subsidence etc.) using statistical analysis of spatial data in the ArcGIS environment, and the area of the territory affected by these processes was determined. Analysis of the resulting map made it possible to estimate the areas in which a certain number of processes are developed: one – 47,550.0 sq. km (76.8%), two – 9,661.79 sq. km (15.6%), three – 4,374.38 sq. km (7.09%), four – 314.782 sq. km (0.5%) and five – 6,762 sq. km (0.01%). The methodology for assessing risks and forecasting the development of slope processes within the territory affected by the Kakhovka Reservoir has been improved. Based on the analysis of the conditions and factors influencing the development of hazardous geological processes using the inventory maps created, the influence of tectonics and relief was determined, and a forecasting model for the development of slope processes within the studied territory was created. An analysis of the distribution of slope processes by distance from tectonic disturbances was carried out. It was found that the areas of predicted landslide processes extend beyond the previously mapped. The results obtained will provide scientific and methodological support for estimating and assessing the damage caused to the geological environment as a result of Russian armed aggression, as well as for developing remediation measures and management strategies for the affected areas. According to the principles of “Build Back Better” and “Build Back Greener,” it is necessary to take into account the problem of hazardous geological processes activation within the studied area by applying measures of geological environment monitoring, mapping, modeling, and forecasting as part of the development and assessment of scenarios for the economic recovery of the territory affected by the former Kakhovka Reservoir.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Ц и т у в а н н я : Стадніченко С.М., Сюмар Н.П., Лобасов О.П., Алексєєнкова М.В. Аналіз просторових закономірностей розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів засобами ГІС у зоні впливу колишнього Каховського водосховища. *Геологічний журнал*. 2025. № 4 (393). С. 77–94. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.347039>

C i t a t i o n : Stadnichenko S.M., Siumar N.P., Lobasov O.P., Aleksieienkova M.V. 2025. Spatial patterns analysis of hazardous exogenous geological processes development using GIS tools within the area affected by the former Kakhovka Reservoir. *Geologichnij zhurnal*, 4 (393), 77–94. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.4.347039>

1 Вступ

Оцінка ризиків і прогнозування розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів є важливим та актуальним аспектом вивчення стану геологічного середовища, особливо коли постає питання впливу воєнних дій та спричинених ними техногенних катастрофічних явищ.

Розвиток екзогенних геологічних процесів, як і їх активізація (інтенсифікація), на пряму залежить від рівноважного стану компонентів геологічного середовища, які є досить чутливими до будь-якого антропогенного впливу. Територія досліджень, що знаходиться в межах зони впливу колишнього Каховського водосховища, ще до руйнування греблі характеризувалася активним розвитком екзогенних геологічних процесів: карсту, зсувів, ерозії, абразії, підтоплення, заболочування, переробки берегів, просідання лесових ґрунтів тощо. Руйнування греблі Каховської гідроелектростанції (ГЕС) 6 червня 2023 р. стало такою катастрофічною подією, яка спричинила суттєву зміну гідродинамічних параметрів підземних вод та інженерно-геологічних умов території, що потребує їх аналізу й оцінки, виявлення найбільш вразливих ділянок і прогнозування подальшого розвитку небезпечних процесів.

Актуальність цього дослідження має три ключових аспекти: оцінка впливу від катастрофічного руйнування техногенно-геологічних систем (резервуари, греблі) на геологічне середовище; удосконалення методології фіксування впливу воєнних дій на геологічне середовище та зумовлений ним вплив на життєдіяльність населення; створення інформаційної основи для прийняття управлінських рішень.

З огляду на те, як багато об'єктів такого типу (водосховищ, в тому числі значних за площею) налічується на території України (понад 1100, з яких найбільшими є шість водосховищ на Дніпрі: Київське, Канівське, Кременчуцьке, Дніпродзержинське, Дніпровське та Каховське), важливим є обґрунтування та відпрацювання подібних сценаріїв катастрофічних руйнувань та оцінки їх впливу на великі інженерно-геологічні системи ще на стадії проєктування. Збройна агресія росії проти України завдає величезної шкоди геологічному середовищу, зокрема руйнування низки гідротехнічних об'єктів, що призвело до масштабних підтоплень та інших катастрофічних наслідків. З початку повномасштабного вторгнення на території України було зафіксовано низку випадків підриву й

обстрілу гідротехнічних споруд, а саме: Козаровицької греблі (р. Ірпінь, Київська область, лютий 2022 р.); греблі Карачунівського водосховища (р. Інгулець, Криворізька область, вересень 2022 р.); греблі Печенізького водосховища (р. Сіверський Донець, м. Харків, вересень 2022 р.); руйнування греблі Оскільського водосховища (р. Оскіл, Харківська область, квітень та вересень 2022 р.); руйнування греблі Карлівського водосховища (р. Вовча, Донецька область, травень 2023 р.); руйнування греблі Каховської ГЕС (р. Дніпро, Запорізька, Херсонська області, червень 2023 р.); пошкодження Тернівської греблі на Курахівському водосховищі (р. Вовча, Донецька область, листопад 2024 р.) та ін.

Територія впливу Каховського водосховища після руйнування може стати експериментальною платформою для оцінки впливу на інженерно-геологічну систему, інтенсифікацію розвитку екзогенних геологічних процесів і подальших прогнозів. Тобто, враховуючи, що небезпечні геологічні процеси можуть активізуватися внаслідок порушення рівноважного стану геологічного середовища в межах техногенно-геологічних систем, важливим є розробка сценаріїв їх розвитку для управління ризиками, пов'язаними з руйнуванням гідротехнічних споруд у надзвичайних ситуаціях, умовах зміни клімату та воєнних дій.

Другим аспектом актуальності цієї роботи є обґрунтування методичних підходів до фіксації впливів військової агресії на стан геологічного середовища, відпрацювання методичних засад щодо оцінки шкоди, завданої геологічному середовищу внаслідок російської агресії, та наповнення загальнонаціональної доказової бази визначення завданої військовими діями шкоди довкіллю, серед компонентів якого геологічне середовище відрізняється масштабністю та довготривалістю зазначених впливів.

За період повномасштабної російської агресії було проведено дослідження з моніторингу й оцінки наслідків бойових дій на території України за такими напрямками: вплив на палеоботанічну спадщину, стратотипові розрізи та об'єкти геологічної спадщини (Ольштинська та ін., 2024; Shevchuk et al., 2024); корисні копалини; вплив на підземні води та пов'язані з ним проблеми водопостачання (Саніна, Люта, 2024; Shestopalov et al., 2024); поширення хімічного забруднення, оцінка забруднення нафтопродуктами, спричиненого руйнуванням нафтобази під впливом воєнних чинників (Гаврилюк та ін.,

2024); аналіз стійкості геологічного середовища на об'єктах історико-архітектурної та культурної спадщини (Cherevko et al., 2024). Зокрема, дослідження авторів щодо впливу воєнних дій та ролі моніторингу в оцінці збитків, завданих безпосередньо надрам: пошкодження або знищення гірничодобувних об'єктів, родовищ, пошкодження геологічних пам'яток (Шехунова та ін., 2023; Shekhunova et al., 2023, 2025a, 2025b та ін.).

Окремим напрямом є низка досліджень, присвячених різним екологічним і геоecологічним аспектам оцінки наслідків руйнування Каховської ГЕС: зміні стану поверхневих вод і впливу на водні екосистеми Дніпра та Чорного моря (Kadam et al., 2024; Pichura et al., 2025; Shumilova et al., 2025), в тому числі проблемі водопостачання регіону (Бойко, 2024; Karamushka et al., 2025; Vyshnevskiy et al., 2023; Vyshnevskiy, Shevchuk, 2024 та ін.); впливу на зрошення сільськогосподарських угідь (Yailymov et al., 2025); попередній оцінці зміни стану підземних вод (Саніна, Люта, 2023; Shekhunova et al., 2023); трансформації ландшафтів і зміні біорізноманіття в ложі колишнього Каховського водосховища (United..., 2023).

Більшість з цих досліджень базується на використанні даних супутникового дистанційного зондування, що зумовлено головним чином складністю або відсутністю доступу до території дослідження через пряму загрозу бойових дій. Зокрема, в роботі, яку підготувала міжнародна група дослідників за співавторства фахівців з Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України й Інституту гідробіології НАН України, на основі дешифрування космознімків детально описано залишкові водні об'єкти Каховського водосховища під час водопілля на Дніпрі, виконано оцінку коротко- та довгострокових екологічних наслідків Каховської катастрофи (Shumilova et al., 2025). Науковим центром аерокосмічних досліджень Інституту геологічних наук НАН України у систематизованому вигляді представлені результати дистанційного вивчення Каховської катастрофи з аналізом її наслідків на основі матеріалів оптичної та радарної супутникової зйомки (Катастрофа..., 2024). Важливо зазначити, що питання активізації та розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів і зміни стану підземних вод детально не розглядалися.

Актуальність та значущість очікуваних результатів оцінки ризиків розвитку небезпечних геологічних процесів території впливу колишнього Каховського водосховища визначаються голов-

ним чином необхідністю прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо геологічного середовища як з огляду на екологічну безпеку, так і щодо безпеки населення та підвищення економічної стійкості України в умовах війни, що триває, та повоєнного відновлення. Таким чином, одним з найважливіших аспектів цього питання є недопущення інтенсифікації розвитку небезпечних геологічних процесів, спричинених воєнними діями. Однак не менш важливим є дотримання принципів «Build Back Better» та «Build Back Greener» (Міністерство..., 2023) при підготовці рекомендацій щодо управління такими територіями та розробці стратегій їх відновлення. Тому для того, щоб процес прийняття рішень щодо відновлення був ефективним, необхідно враховувати можливі сценарії розвитку небезпечних геологічних процесів.

Метою цього дослідження є обґрунтування підходів до аналізу й оцінки розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів для розробки технологій моніторингу геологічного середовища та підтримки прийняття рішень щодо реконструкції території та післявоєнного відновлення економіки України.

2 Матеріали і методи

2.1 Вихідні матеріали

Для формування ГІС-інтегрованої бази даних небезпечних екзогенних геологічних процесів у зоні впливу колишнього Каховського водосховища (Херсонська та Запорізька області), побудови карт сумарної ураженості території та прогнозу поширення небезпечних екзогенних явищ (схилі процеси (зсуви, ерозія), карст, підтоплення, просідання лесових ґрунтів) було використано як геологічні, так і гідрогеологічні дані. Геологічна інформація представлена планшетами різного масштабу, зокрема картами четвертинних, дочетвертинних відкладів, пояснювальними записками до кожного аркуша, що містили стратиграфічні розбивки свердловин, та інженерно-геологічними картами (Государственная..., 1975, 1976; Андреева и др., 1983; Долгополов, 1991; Черкасов, 2007; Климчук та ін., 2008а, б; Національна..., 2022). Ці карти були використані для прогнозу ділянок можливого просідання лесових ґрунтів, розвитку зсувів і карсту. Всього було закартовано 1088 зсувів; 10,433 тис. км² територій розвитку напівприхованого карсту; 0,318 тис. км² територій розвитку відкритого карсту; 2,344 тис. км² територій розвитку ерозійних схилівих процесів (ярів) (рис. 1).

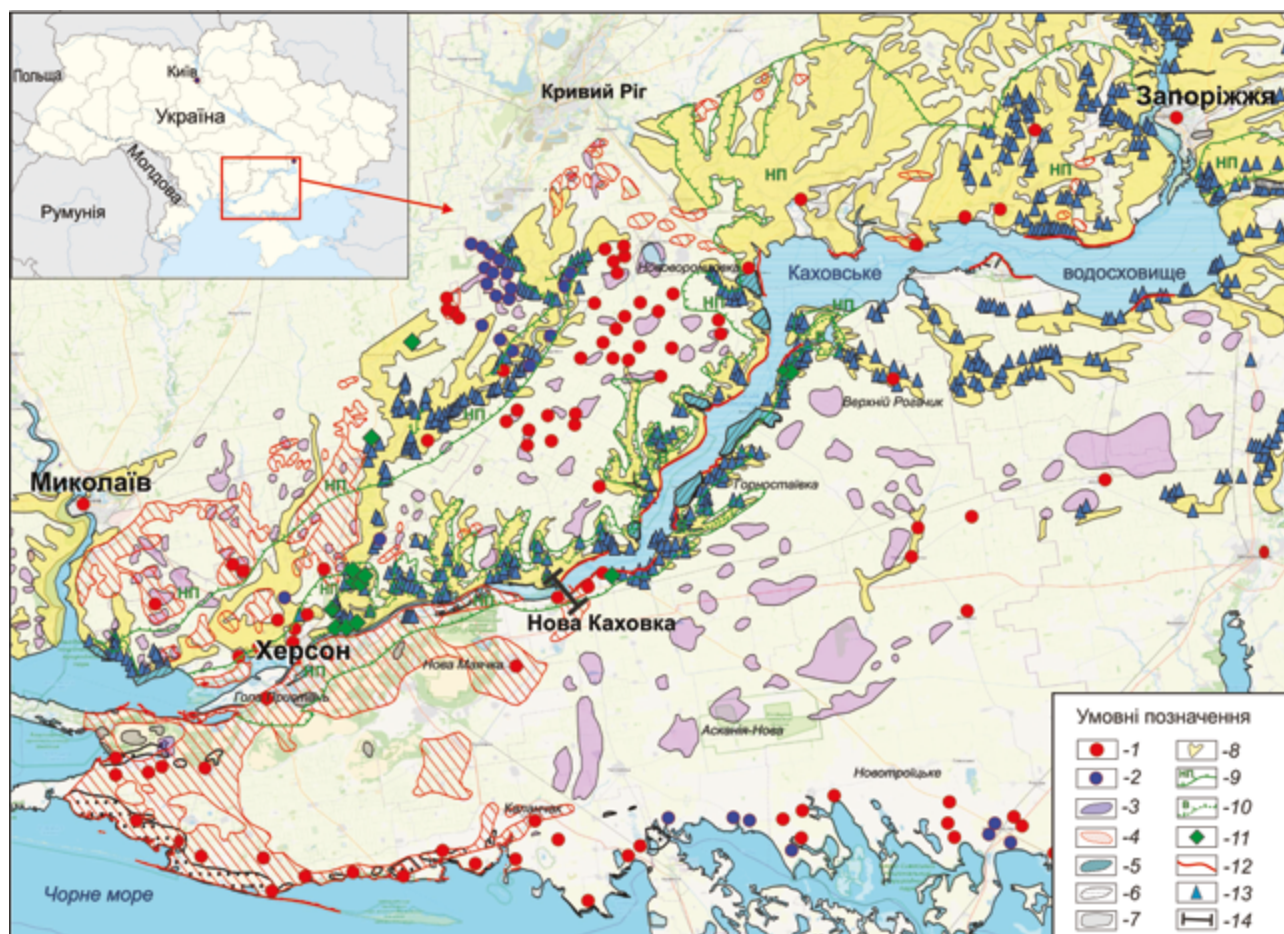


Рис. 1. Візуалізація бази даних розвитку екзогенних геологічних процесів: 1 – природний підйом рівня ґрунтових вод; 2 – техногенний підйом рівня ґрунтових вод; 3 – поди; 4 – ділянки підняття рівня ґрунтових вод на зрошувальній території; 5 – ділянки інтенсивного розвитку поверхневих процесів; 6 – солончаки; 7 – заболочуваність; 8 – ділянки розвитку ерозійних процесів; 9 – ділянки напівпокритего карсту; 10 – ділянки відкритого карсту; 11 – карстові провали; 12 – ділянки переробки берегів водосховищ; 13 – яри, зсуви; 14 – гребля Каховського водосховища

Fig. 1. GIS database visualisation of the hazardous exogenous geological processes: 1 – natural rise in groundwater level; 2 – man-made rise in groundwater level; 3 – pods; 4 – areas of groundwater level rise in irrigated areas; 5 – areas of intensive ground surface processes; 6 – salt marshes; 7 – waterlogging; 8 – areas of erosion processes; 9 – areas of semi-covered karst development; 10 – areas of open karst development; 11 – karst sinkholes; 12 – areas of reservoir bank cultivation; 13 – ravines, landslides; 14 – dam of the Kakhovka Reservoir

Гідрогеологічна інформація також представлена планшетами різного масштабу. Кожний аркуш містить свердловини та колодязі з відмітками глибини поверхні ґрунтових вод до руйнування греблі Каховського водосховища, які були зняті з карт і використані для прогнозу ділянок розвитку карсту, просідання лесових ґрунтів, схилових процесів і підтоплення. Опрацьовано дані близько 250 гідрогеологічних свердловин і колодязів. Загалом використано 12 планшетів масштабу 1:200 000 та близько 40 великомасштабних карт (1:100 000 і більш детальних) (Государственная..., 1975, 1976; Долгополов, 1991; Климчук, 2008а, б).

Також для побудови карти сумарної ураженості території залучені дані з тектонічної карти масштабу 1:1 000 000 за редакцією С.С. Круглова, 2007 (Тектонічна..., 2007).

Для створення цифрової моделі рельєфу (Digital Elevation Model – DEM) було використано дані обробки аерокосмічних знімків (супутникові дані з високою роздільною здатністю, зокрема карти на основі Google Earth та Copernicus станом на 2025 р.) та дані з раніше створених топографічних карт за допомогою ГІС-інструментів.

Опис та аналіз розвитку екзогенних геологічних процесів на досліджуваній території виконано на основі наявних вихідних даних до руйнування Каховської греблі, аналізу розвитку деяких небезпечних процесів після руйнування греблі, а також з урахуванням експертних оцінок зміни факторів, що впливають на розвиток екзогенних геологічних процесів.

2.2 Методи та методика побудови карти сумарної ураженості території

На основі аналізу створеної ГІС-інтегрованої бази даних небезпечних екзогенних геологічних процесів для території в межах впливу колишнього Каховського водосховища проведено ранжування території за щільністю та частотою прояву різних типів процесів (карст, схилові процеси, підтоплення, просідання лесових ґрунтів) з використанням методу статистичного аналізу просторових даних у середовищі ArcGIS. Для побудови карти сумарної ураженості території застосована розроблена раніше методологія моделювання зсувонебезпеки (Shekhunova et al., 2019; Шехунова та ін., 2022), адаптована для нових методів та алгоритмів обробки даних. Система була доповнена спеціально розробленими програмними модулями для оконтурення ділянок з різною кількістю екзогенних геологічних процесів і визначення сумарних площ полігонів з різним рівнем небезпеки.

Задача розв'язується з використанням методів Grid-класу ArcGis (Spatial Analyst).

На першому етапі площі, уражені певним процесом, представлялися полігональною темою багатозв'язних полігонів. Встановлювалися параметри ґридів для аналізу (extent, крок сітки) однаковими для всіх ґридів робочого вікна. Прямокутник extent повинен був покривати всю територію дослідження. Бувувався 0-ґрид, тобто всі комірки містили нуль. Проводилася така процедура:

$$ResGrid = Grid.MakeFromNumb(0).$$

На другому етапі в циклах по темах процесів кожна тема конвертувалася в (1, nul)-Grid (процедура uGrid = Grid.MakeFromFTab (polyftab, pro, nil, nil)), а (1, nul)-Grid, у свою чергу, перетворювався в (1,0)-Grid (процедура cGrid = uGrid.IsNull dGrid = cGrid.Con(0.AsGrid, uGrid)). Виконувалася операція:

$$ResGrid = ResGrid + (1,0)-Grid.$$

Після закінчення циклу в кожній комірці ResGrid містилася кількість процесів, визначених у цій комірці. В атрибутах теми ResGrid автоматично записано кількість процесів, визначених у кожному полігоні – ResTheme. По цій темі була побудована карта ураженості території небезпечними процесами. Заключним етапом був підрахунок площі по кожній групі полігонів у темі ResTheme (з одним, двома, трьома, чотирма, п'ятьма небезпечними явищами).

2.3 Методи та методика розрахунку впливу рельєфу та розломної тектоніки на схилові процеси

Важливою складовою аналізу наслідків підриву греблі Каховського водосховища є удосконалення методики оцінки ризиків і прогнозу розвитку схилових процесів (зсуви, ерозія) на території дослідження для науково-методичного забезпечення фіксації й оцінки шкоди, завданої геологічному середовищу як компонента довкілля в результаті російської агресії, ремедіаційних заходів та стратегій поводження з постраждалими територіями.

Проаналізовано вплив факторів, що сприяють розвитку схилових процесів і створено прогнозну карту поширення зсувонебезпечних ділянок з використанням раніше розробленої методики для моделювання зсувної небезпеки (ГІС-системи, відкритої до нових методів та алгоритмів обробки даних) (Shekhunova et al., 2019; Шехунова та ін., 2022). Згідно з методикою для побудови прогнозної моделі розвитку схилових процесів було реалізовано такі кроки:

- Створено цифрову модель рельєфу (Digital Elevation Model – DEM), отриману шляхом обробки аерокосмічних знімків (супутникові дані з високою роздільною здатністю, зокрема карти на основі Google Earth та Copernicus) та даних з раніше створених топографічних карт за допомогою ГІС-інструментів. Середня щільність знятих вихідних точок дорівнює 1 точці на 1 км², що відповідає масштабу 1:50 000 (рис. 2).
- Створено цифрову модель тектонічних порушень для досліджуваної території.
- Створено прогнозну модель просторово-часового розвитку ярів.

На основі цих даних проведено комплексний аналіз факторів, що впливають на розвиток схилових процесів (зсувів та ерозії) та із застосуванням просторово-статистичного аналізу фактора дисперсії рельєфу візуалізовано прогнозну модель розвитку схилових процесів.

3 Геологічна будова

Геологічний розріз досліджуваної території виступає природною передумовою для розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів. Територія дослідження знаходиться в межах південної частини Східноєвропейської платформи, а в геоструктурному відношенні – в зоні переходу Українського щита (УЩ), а саме Середньопридніпровського мегаблоку в Південноукраїнську монокліналь з границею між ними субширотного простягання.

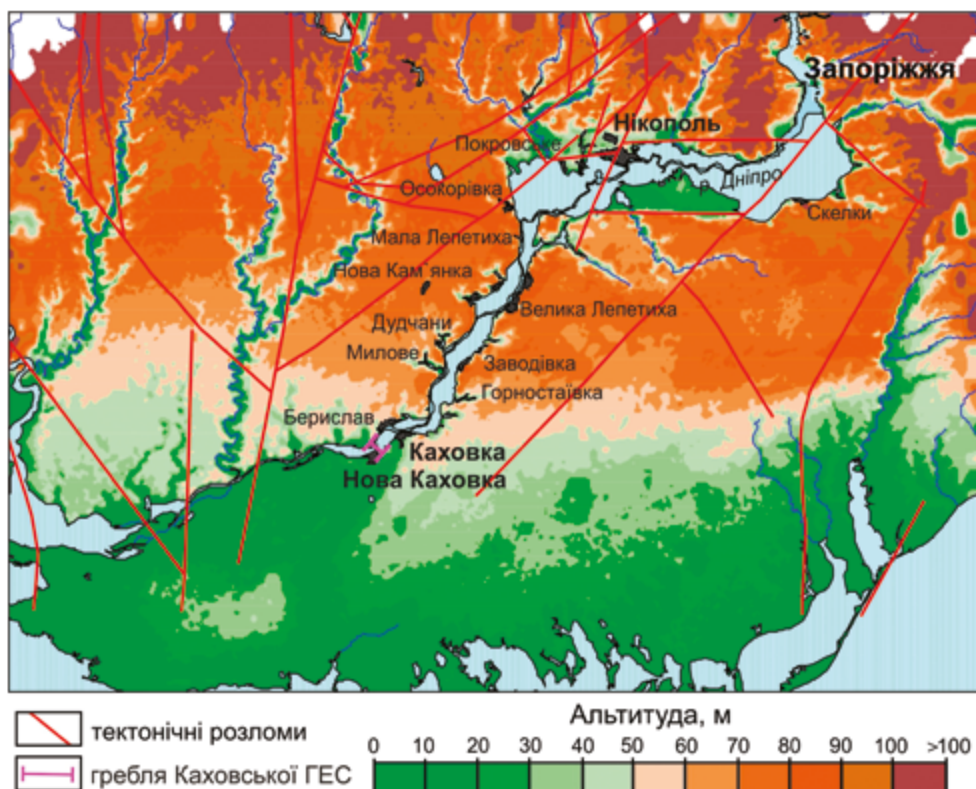


Рис. 2. Цифрова модель рельєфу

Fig. 2. Digital Elevation Model

Середньопридніпровський мегаблок УЩ за особливостями будови відповідає граніт-зеленокам'яному типу областей (Тектонічна..., 2007). Він має чітко виражену двоповерхову будову, в кожному поверсі виділяють два підповерхи. Нижній поверх складають утворення славгородського чорнокіт-гранулітового (нижній підповерх) та аульського плагіограніт-амфіболітового (верхній підповерх) структурно-формаційних комплексів, а верхній – нашаровані складові середньопридніпровського тоналіт-зеленокам'яного (нижній підповерх) і білозерського та криворізького гранітоїдно-метатеригенних (верхній підповерх) комплексів. За особливостями розподілу проявів різних формацій та їх асоціацій у сучасному ерозійному зрізі докембрію мегаблоку виділено Дніпропетровський, Запорізький та Василівський блоки.

Південноукраїнська монокліналь охоплює область поширення осадових товщ, що перекривають фундамент Східноєвропейської платформи (Тектонічна..., 2007). Її північна границя відповідає межі поширення неогенових відкладів, що перекривають південний схил УЩ. За стратиграфічною повнотою та потужністю розрізів у межах монокліналі породи осадового чохла містять відклади від крейди до антропогену. Структурний план Південноукраїнської монокліналі загалом простий і характеризується пологим падінням осадових товщ у південно-західному та

південному напрямках. Ізопахіти чохла витримують переважно субширотне простягання з окремими ускладненнями у формі напіввиступів, малоамплітудних піднять та локальних западин.

У геологічному відношенні докембрійські утворення УЩ представлені гранітами, мігматитами та гнейсами нерозчленованого комплексу архею-протерозою. Відклади крейдової системи складені двома відділами: нижнім і верхнім. Нижній відділ крейди представлений аптським та альбським ярусами та складений глинами, алевролітами, пісками, іноді вапняками. Верхній відділ поділяється на сарматський, туринський, кампанський та маастрихський яруси, що складені мергелями, глинами та дрібнокристалічними вапняками. Осадкові породи палеогену та неогену залягають або на кристалічному фундаменті, або на породах крейдової системи зі слабким нахилом у південному та південно-західному напрямках. Палеогенова система представлена морськими відкладами палеоцену, середнього та верхнього еоцену й олігоцену; переважно це піски, глини, іноді алевроліти. В неогені виділяються відклади міоцену та пліоцену. Найбільшого розповсюдження набули відклади тортонського, сарматського, понтичного та кімерійського ярусів, що складені вапняками та піщано-глинистими породами. Четвертинна система залягає на міоцен-пліоценових вапняках і піщано-глинистих породах. Представлена

нижньо-, середньо-, верхньочетвертинними та сучасними відкладами; літологічно це суглинки, супіски, піски, подекуди глини.

Згідно з геологічною будовою досліджуваної території та гідрогеологічними особливостями гірських порід, що складають розріз, виділяють такі водоносні горизонти (Долгополов, 1991):

- Водоносні горизонти у сучасних алювіальних та алювіально-делювіальних відкладах, які поширені в межах заплав річок і великих балок. Водовмісними породами є піски дрібнозернисті та супіски потужністю 3–5 м. Глибина залягання рівня ґрунтових вод – до 5 м.
- Водоносний горизонт у плейстоценових алювіальних відкладах розвинутий по долинах річок і приурочений до надзаплавних терас. Водоносні породи потужністю до 15–18 м, піски різнозернисті, подекуди з домішками гравію.
- Водоносний горизонт у еолово-делювіальних неоплейстоценових відкладах поширений на всій площі, але відсутній у долинах річок і балок. Приурочений до лесових відкладів. Глибина залягання водоносного горизонту сягає від 1 до 10–20 м (переважно 5–10 м).
- Водоносний горизонт у товщі пісків і вапняків понтичного регіорусу поширюється в межах всієї території дослідження. Приурочений до піщаних відкладів, вапняків. Глибина залягання водоносного горизонту становить від 1–2 до 40 м. Потужність горизонту – 5–8 м.
- Водоносний комплекс у середньо- та пізньоміоценових відкладах (N,čk, N, kă+gl,N,pr2+3) поширений на всій досліджуваній площі. При-

урочений до вапняків і пісків сарматського регіорусу (неоген). Глибина залягання водоносного комплексу змінюється від кількох метрів на схилах долин річок до 80 м на вододілах (Долгополов, 1991).

Отже, до підриву греблі Каховської ГЕС глибина залягання ґрунтових вод становила в долинах річок 0–5 м, на міжіріччях – 3–10 м, місцями 2–5 м, на схилах вододілів – 10–20 і понад 20 м. Стосовно зміни рівнів ґрунтових вод можна зазначити, що на території вище зруйнованої греблі прогнозується поступове збільшення глибини залягання рівня підземних вод до показників, що спостерігалися до заповнення чаші водосховища: на правобережжі Дніпра – до 10,3–16,1 м, на лівобережжі – до 10,5–12,2 м (Shekhunova et al., 2023).

4 Результати та їх обговорення

4.1 Ранжування території за щільністю та частотою прояву небезпечних екзогенних геологічних процесів

На основі аналізу наявних даних розвитку екзогенних геологічних процесів, зокрема карсту (напівпокритого, відкритого), схлизових процесів (зсувів, ерозії), підтоплення, просідання лесових ґрунтів та ін.), територію ранжовано за щільністю та частотою прояву різних типів небезпечних геологічних процесів. Крім того, визначено площу ураженості території кожним із зазначених вище небезпечних геологічних процесів (рис. 3).

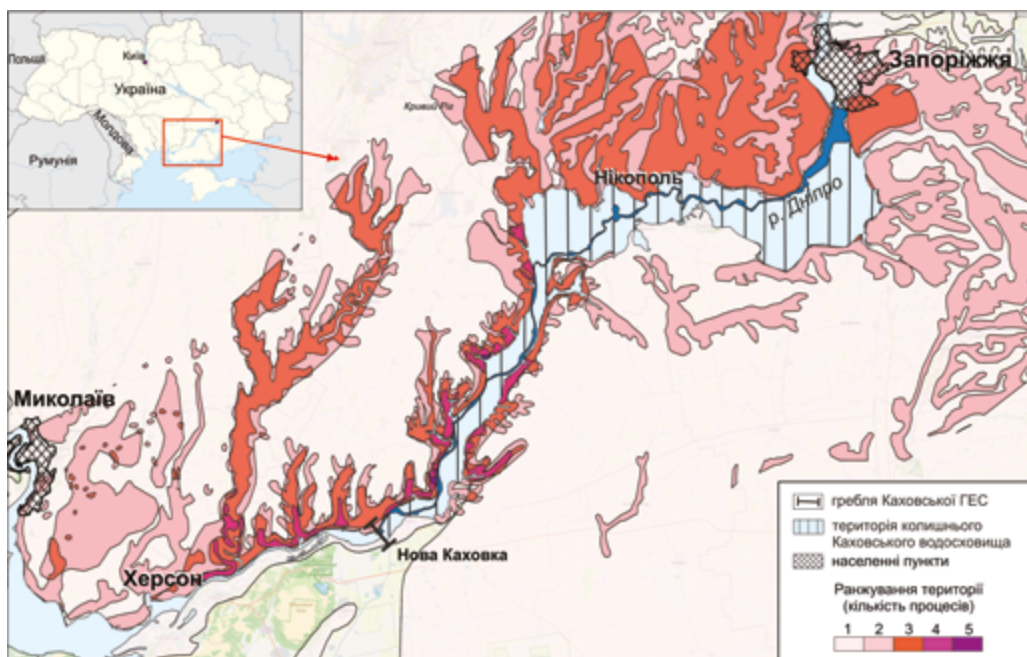


Рис. 3. Ранжування території за щільністю та частотою прояву небезпечних геологічних процесів

Fig. 3. The territory ranking by the density and frequency hazardous geological processes occurrence

У результаті статистично-просторового аналізу території, ураженої небезпечними геологічними процесами, встановлено, що площа, уражена напівпокритим карстом, складає 10434,2 км², відкритим – 318,013 км². Карст (покритий, напівпокритий та відкритий) розвинений у відкладах понтійського ярусу пліоцену та верхньосарматського ярусу міоцену, які літологічно представлені оолітовими вапняками потужністю від 4–10 м на півночі до 120–140 м на півдні. На досліджуваній території визначальним чинником розвитку небезпечних геологічних процесів, у тому числі карсту, був техногенний вплив, спричинений будівництвом водосховища, зрошувальних систем і каналів (Андреева, 1983; Черкасов, 2007). Після руйнування греблі Каховського водосховища прогнозується відновлення активізації карсту на всіх стадіях за рахунок зміни рівня, напрямку та швидкості руху підземних вод (Саніна, Люта, 2023), зливових паводків і підтоплень, зміни локального базису ерозії (Shekhunova et al., 2023).

Територія характеризується високим ступенем еродованості, спостерігаються руслова ерозія постійних водотоків (бічна та вертикальна); руслова ерозія тимчасових водотоків (ярова) та схилова ерозія (площинна). Найбільшого розвитку набули руслова ерозія тимчасових водотоків і схилова. Для території Інгуло-Дніпровської рівнини та лівобережжя Дніпра характерний пологий рельєф. Поверхня цих районів складена товщею лесових порід, що легко розмиваються. Більш інтенсивно площинна ерозія спостерігається на землях, що розорюються. Ерозійні процеси представлені значною площинною й яружною ерозією (Андреева, 1983). Схили Каховського водосховища ускладнені різноманітними балками й ярами, які часто мають каньйоноподібний профіль, довжиною від 2,5 до 15 км і глибиною 20–30 м. На правому березі Дніпра, в районі колишнього Каховського водосховища, зсувна активність в останні роки була незначною. Загальна довжина берегів водосховища, уражених зсувами, становила близько 30 км. Довжина зсувних ділянок сягала 100–200 м, ширина в глиб території – до 40 м, висота зсувних уступів – 0,5–8 м (Черкасов, 2007). За даними статистично-просторового аналізу була оцінена площа території, ураженої схиловими процесами (зсуви, ерозія), яка становить 19022,831 км².

Підтоплення до підризу греблі водосховища, як правило, відбувалося в долинах річок (Дніпро та ін.) і заплавах, а на узбережжі Чорного моря воно спричинене прибережними підтопленнями. Інтенсивне підтоплення території спостерігалось після заповнення Каховського водосховища в 1956 р. і будівництва великих зрошувальних систем (Каховської й Інгулецької). В результаті статистичного аналізу просторових даних території, що зазнала впливу небезпечних геологічних процесів, було визначено площу локальних ділянок підтоплення, яка становить 97,92 км².

Просадні процеси пов'язані з поширенням неоплейстоценових лесоподібних утворень (суглинки, супіски) потужністю 15–30 м на вододілах Дністровсько-Дніпровської низовини та лівобережної частини Дніпра. Лесова формація практично повсюдно перекриває породи різного віку від архею до пліоцену включно. Вона займає позальодовикову зону в межах південних лесових районів і представлена різними генетичними типами порід (Андреева, 1983). У зв'язку зі значним зниженням рівня ґрунтових вод унаслідок руйнування греблі прогнозуються процеси просідання лесових ґрунтів, що може призвести до динамічної втрати їх інженерної стійкості, виникнення просадних деформацій та ускладнення умов експлуатації інженерних споруд у межах забудованих територій (Саніна, Люта, 2023; Shekhunova et al., 2023). За результатами статистичного аналізу просторових даних площа території поширення сприйнятливих до просідання лесових ґрунтів становить 51418,1 км².

Сучасні еолові процеси відбуваються на перших надзаплавних терасах річок та на морських пляжах. Інтенсифікація цих процесів прогнозується частково через втрату рослинного покриву, спричинену недостатнім зволоженням ґрунту, але більш критичною є широкомасштабна дезінтеграція верхнього шару ґрунту разом з рослинністю внаслідок воєнних дій (ракетних обстрілів, артилерійських бомбардувань, проїзду важкої військової техніки тощо).

Аналіз отриманої карти території, ураженої небезпечними геологічними процесами, дозволив оцінити площі, на яких розвинулася відповідна кількість процесів: один – 47550,0 км² (76,8 %), два – 9661,79 км² (15,6 %), три – 4374,38 км² (7,09 %), чотири – 314,782 км² (0,5 %) і п'ять – 6,762 км² (0,01 %).

4.2 Оцінка зсувонебезпеки та ризиків розвитку схлизових процесів у межах території впливу колишнього Каховського водосховища

Схлизові процеси становлять загрозу здоров'ю та життю людей, спричиняють руйнування, в тому числі катастрофічні, та призводять до економічних збитків. Виявлення ділянок, уразливих до розвитку зсувів, є необхідним при розробці стратегій землекористування в межах зсувонебезпечних регіонів, а карти зсувонебезпеки мають вирішальне значення для оцінки ризиків. Зони, сприйнятливі до розвитку зсувів, визначаються та виносяться на карту за допомогою різних методів і моделей. Відомо, що як природні, так і антропогенні чинники можуть спричинити розвиток схлизових процесів, наприклад (van Westen et al., 2008; Шехунова та ін., 2022; Pilatasig et al., 2025). Зсуви зазвичай виникають внаслідок взаємодії складної сукупності тригерних «triggering» та кондиціюючих «conditioning» факторів (Asmare, 2023; Pilatasig et al., 2025; Taye,

Tamang, 2025). Загалом, такі фактори, як рельєф, експозиція та крутизна схилу, геологічна будова схилів, літологічний склад порід, рівень залягання ґрунтових вод, фізико-механічні властивості порід, відстань до дрени, відстань до тектонічних порушень, тип землекористування, рослинний покрив та індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормалізований диференційний вегетаційний індекс) та ін., класифікуються як кондиціюючі фактори зсувоутворення (Miccadei et al., 2022; Asmare, 2023). Землетруси, екстремальні опади (через зміну клімату/екстремальні кліматичні явища) та діяльність людини (воєнні дії) класифікуються як тригерні фактори.

На основі аналізу факторів розвитку небезпечних геологічних процесів з використанням створеної бази даних виявлено ступінь впливу тектоніки та рельєфу, а також створено прогнозну модель розвитку схлизових процесів у межах досліджуваної території (рис. 2, 4, 5).

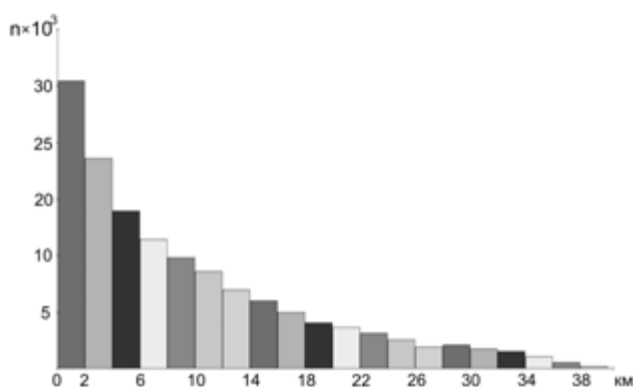


Рис. 4. Розподіл схлизових процесів по відстані від тектонічних порушень (по осі y – кількість точок у межах полігонів проявів схлизових процесів, $n \times 10^3$)

Fig. 4. Distribution of slope processes depending on the distance from tectonic disturbances (along the y-axis, the number of points within polygons of slope processes manifestations is shown in $n \times 10^3$)

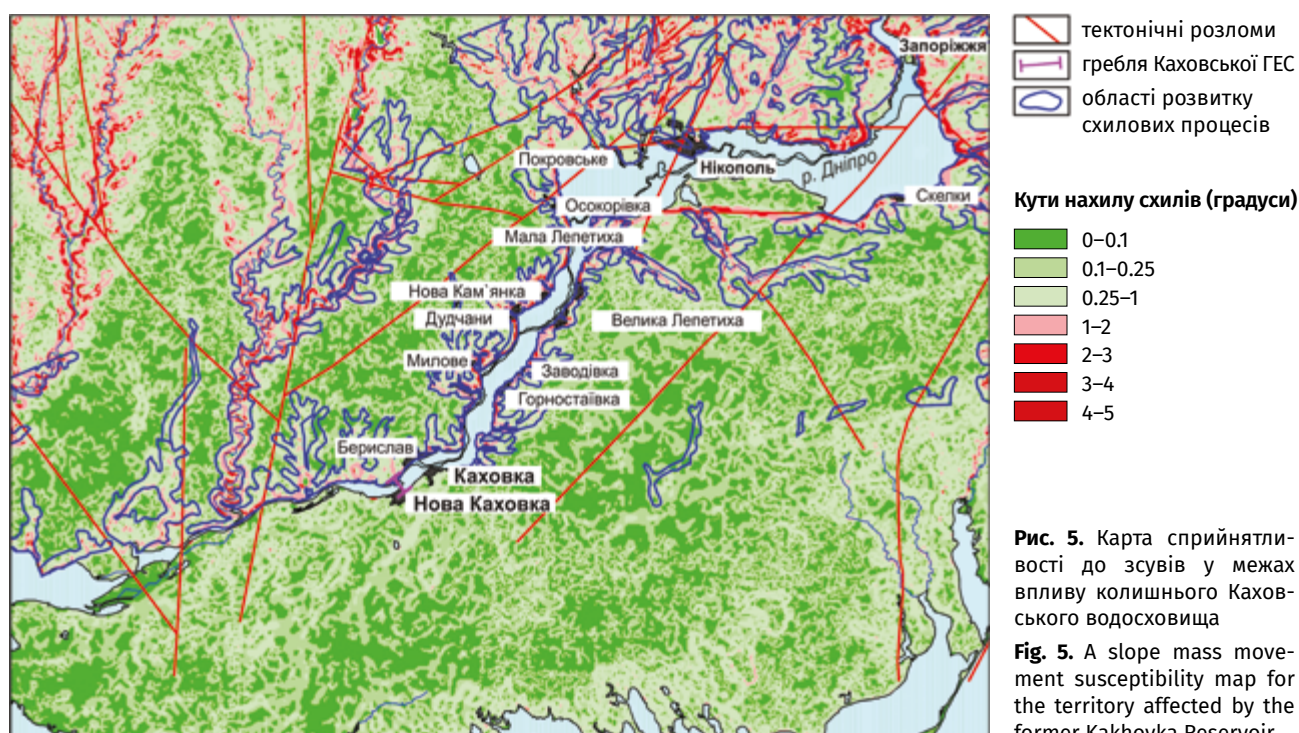


Рис. 5. Карта сприйнятливості до зсувів у межах впливу колишнього Каховського водосховища

Fig. 5. A slope mass movement susceptibility map for the territory affected by the former Kakhovka Reservoir

Аналіз впливу тектонічних порушень на розвиток схилових процесів. За результатами аналізу впливу розломної тектоніки як фактора розвитку екзогенних процесів отримано гістограму розподілу множини точок схилових процесів по відстані від тектонічних порушень (див. рис. 4). Для цього полігони схилових процесів ділилися на елементарні ділянки, представлені регулярною сіткою точок (точковою темою) в межах полігонів. Потім визначався розподіл точок по відстані від порушень. З огляду на те, що розподіл полігонів описується експоненціальною функцією, зроблено висновок про наявність впливу розломної тектоніки.

Як зазначено вище, територія досліджень відноситься до двох головних тектонічних елементів: УЩ і Південноукраїнської монокліналі з границею між ними субширотного простягання. В кожному з цих тектонічних елементів були виділені численні розривні порушення (розломи) як першого, так і другого порядків. Розривні порушення субмеридіонального простягання, вірогідно, пов'язані із блоковою тектонікою УЩ. Розміщення розломів показано на карті рельєфу (див. рис. 2).

У цьому дослідженні наразі не проводилася класифікація розломів за рангом. Але було встановлено, що найбільша кількість нестійких ділянок схилів знаходиться на відстані до 2 км від зон розломів першого та другого порядків, а їх вплив зменшується зі збільшенням відстані від розломних зон.

Аналіз впливу рельєфу на розвиток схилових процесів. Дослідження проведено з використанням DEM, згенерованої на основі супутникових даних (див. рис. 2). Рельєф північної правобережної частини території більш розчленований, ніж такий південної. В межах регіону виділяються значні площі замкнутих понижень – балок. На лівому березі, в гирлі Дніпра, розвинений дюнний рельєф з перепадом висот у кілька метрів. Поверхня характеризується абсолютними відмітками 150–160 м на півночі та 2–3 м на півдні. Знижені ділянки пов'язані з морським узбережжям і дельтою Дніпра, де абсолютні відмітки коливаються в межах 1,5–4 м. Територія має досить високий рейтинг сейсмічності – 5–6 балів (Черкасов, 2007). Загалом досліджувана територія характеризується високим ступенем ерозії.

Згідно з раніше опублікованими результатами попередньої оцінки змін гідрогеологічних умов

після підриву греблі Каховської ГЕС (Люта, Санина, 2023; Shekhunova et al., 2023), дренавання Каховського водосховища призвело до зміни водного режиму території (рівня, напрямку течії та витрат), а подальша зміна базису ерозії, очікувано, призведе до посилення ерозії гірських порід та яроутворення на прилеглий території. Ерозійні процеси, що мають значний вплив на формування схилів, у поєднанні з іншими екзогенними процесами можуть спровокувати активізацію схилових процесів, поширених у межах території впливу колишнього Каховського водосховища.

В той час, коли яри можуть виникати навіть при нульових кутах нахилу схилів, для руху маси зсуву по схилу потрібні хоча б мінімальні кути нахилу. Таким чином, природні умови та тригерні фактори є відповідальними за реалізацію сценаріїв розвитку схилових процесів.

Прогноз ділянок, сприятливих для розвитку зсувів. Була побудована карта кутів нахилу схилів. На карту винесені зони локалізації схилових процесів. Небезпека утворення зсувів зростає із збільшенням кутів нахилу схилів. Площі прогнозованих схилових процесів (див. рис. 5) виходять за межі раніше закартованих ділянок розвитку схилових процесів (див. рис. 1, 3). Зсуви спостерігаються переважно на схилах долин річок. Залежно від поверхні ковзання виділяються чотири типи зсувів: I – у неоплейстоценових лесових відкладах або у породах, які раніше зазнали процесів зсувоутворення; II – у червоно-бурих глинах пліоцену; III – у верхній товщі меотичних глин; IV – у глибоких горизонтах меотичних глин. Деформації типів I та II – зсуви-потоки, пов'язані з перезволоженням порід, розвинених по берегах річок (Довгополов, 1991). Розміри зсувів варіюють від 20–80 м довжиною до 80–100 м шириною. Ураженість ділянок зсувами коливається в межах 0,01–1 % (басейни рік).

При оцінці вразливості схилових процесів з урахуванням наявності тектонічних порушень було встановлено, що 93 % площі всіх схилів з кутами нахилу понад 1° знаходиться в межах 8-кілометрової лінії, що прилягає до розломних зон.

Побудовано карту дисперсії рельєфу (середньоквадратичного відхилення), яка характеризує фактичні площі (ділянки) поширення ярів (рис. 6).

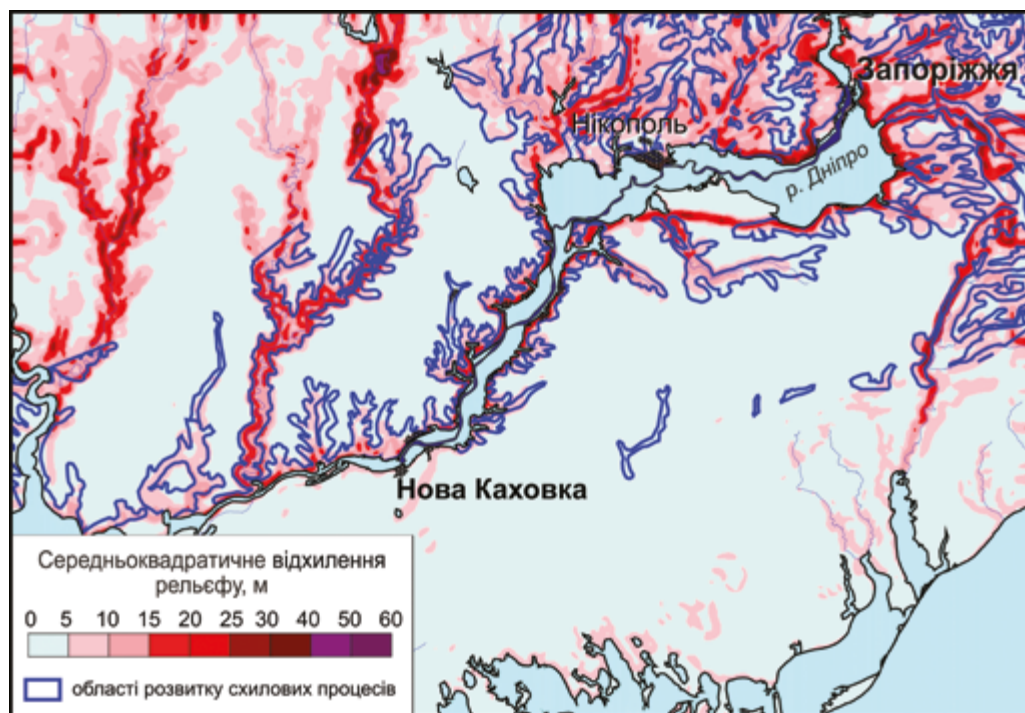


Рис. 6. Карта дисперсії рельєфу (середньоквадратичного відхилення)

Fig. 6. Relief dispersion (standard deviation) map

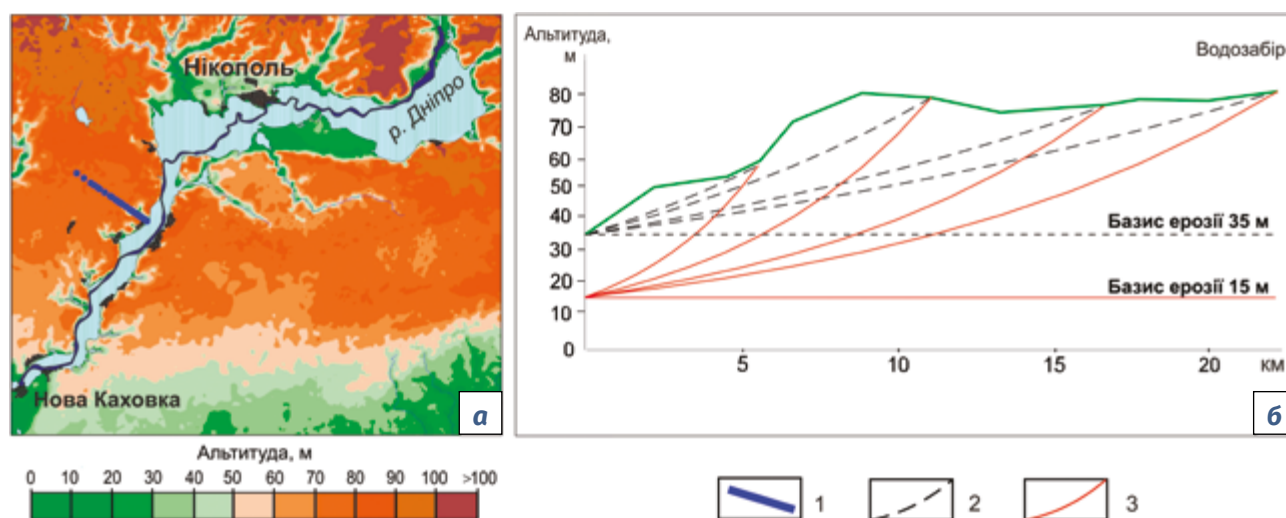


Рис. 7. Розрахункова схема для прогнозу просторово-часового розвитку ярів: а – фрагмент цифрової моделі рельєфу з розташуванням розрахункового розрізу; б – розрахункова схема інтенсивності розвитку ярів на основі зміни базису ерозії та тисня підірву греблі Каховської ГЕС (1 – розташування розрахункового розрізу; 2 – прогнозна інтенсивність розвитку ярів до руйнування греблі; 3 – прогнозна інтенсивність розвитку ярів після руйнування греблі)

Fig. 7. Estimated scheme for spatio-temporal ravine development forecast: а – fragment of digital elevation model with calculation section location; б – estimated ravine development intensity scheme based on erosion basis change before and after Kakhovska HPP dam destruction (1 – calculation section location; 2 – estimated ravine development intensity before dam destruction; 3 – estimated ravine development intensity after dam destruction)

Відповідно до отриманих побудов прогнозних ділянками розвитку зсувів є борти ярів і балок, переважно по правих берегах річок і берегах колишнього Каховського водосховища.

Активність небезпечних екзогенних геологічних процесів залежить насамперед від збалансованості компонентів геологічного середовища та є дуже чутливою до антропогенного впливу.

З метою оцінки такого впливу було виконано попередню оцінку інтенсивності розвитку ярів до та після руйнування греблі Каховського водосховища. Показано рівень базису ерозії до підірву та після (рівень води у Дніпрі за супутниковими даними 2025 р.), різниця сягає майже 20 м (рис. 7). Наведена схема з рівноважними кривими отримана на основі карти розчленування рельєфу та розрахована за евристичною формулою розвитку ярів.

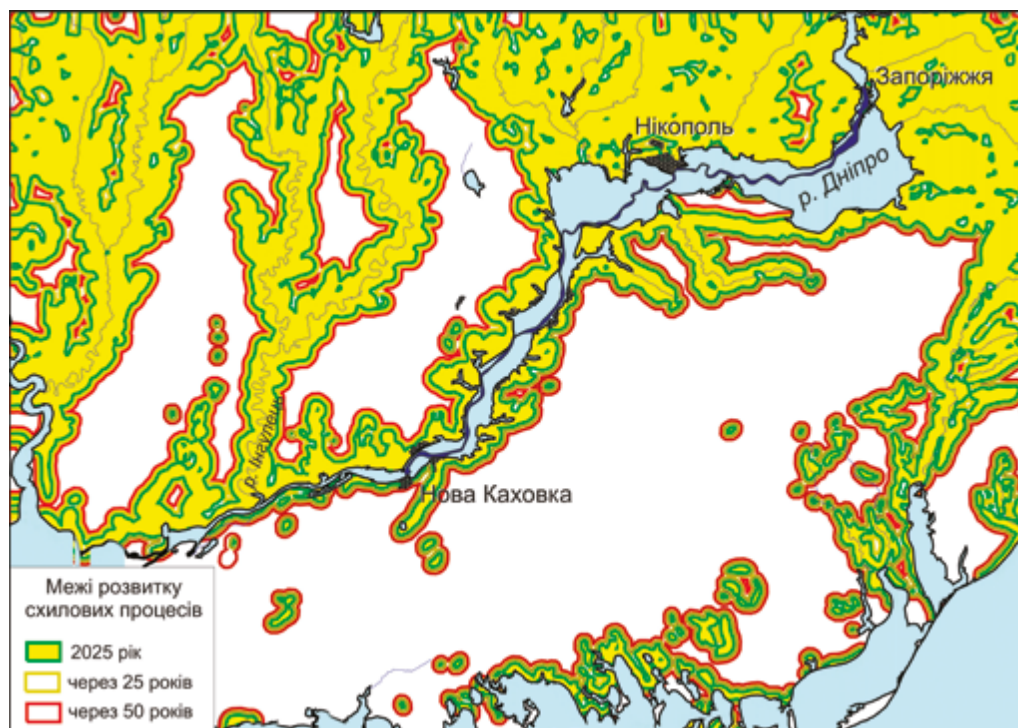


Рис. 8. Прогнозна модель просторово-часового розвитку ярів

Fig. 8. Forecasting Model of spatial and temporal ravine development

Було створено прогнозу модель просторово-часового розвитку ярів (рис. 8). Лінійна швидкість розростання яру прийнята 40 м/рік. Встановлено, що площа, уражена схлизовими процесами, збільшиться на 30 % через 25 років і на 50 % через 50 років.

Таким чином, на основі аналізу факторів розвитку небезпечних геологічних процесів з використанням створеної бази даних було визначено ступінь впливу тектоніки та рельєфу на розвиток схлизових процесів у межах території дослідження. Крутизна схилів (кути нахилу), як і дисперсія рельєфу (середньоквадратичне відхилення), є необхідною умовою утворення зсувів. Наявність тектонічних порушень – одна з достатніх умов. Пов'язана з порушеннями зона тріщинуватості, яка затухає з відстанню від основної траси порушення, покращує умови для інфільтрації атмосферних осадів і сприяє зволоженню зсувного тіла, зменшенню коефіцієнта тертя на поверхні ковзання. Мікросейсми, пов'язані із зоною порушення (активного), полегшують відрив тіла зсуву від основної маси схлизових порід.

У результаті була створена прогнозна модель розвитку схлизових процесів, яка включає такі елементи: карту сприйнятливості до зсувів; карту дисперсії рельєфу (середньоквадратичного відхилення) та прогнозу модель просторово-часового розвитку ярів у межах досліджуваної території.

Статистична оцінка інформативності факторів зсувонебезпеки. В контексті просторово-статистичного підходу до прогнозу силових процесів оцінка інформативності факторів виконується на основі розрахунку помилок 1- та 2-го роду. Помилка 1-го роду – це вірогідність «не помітити» зсувонебезпечну ділянку, коли вона реально існує. Помилка 2-го роду – це вірогідність класифікувати безпечну ділянку як зсувонебезпечну. Помилка 1-го роду має більш важкі наслідки, тому вона повинна мати більшу вагу при оцінці зсувонебезпеки.

Алгоритм розрахунку помилок 1- та 2-го роду полягає в такому:

- вся область дослідження покривається регулярною сіткою з певним кроком, величина якого повинна забезпечувати достатню точність оцінки;
- для кожного фактора формуються вибірки вузлів у полігонах зсувів і за їх межами та будуються гістограми по отриманих вибірках. На рис. 9 наведено гістограми помилок 1- та 2-го роду для кутів нахилу схилу.

Наступним етапом було виконання розрахунків вірогідностей інтервалів гістограм за формулами (Жуков, 1995):

$$P_i = \frac{N_i}{N};$$

$$N = \sum_i (N_i),$$

де n – число інтервалів гістограми; i – номер інтервалу; N_i – кількість вузлів сітки в i -му інтервалі.

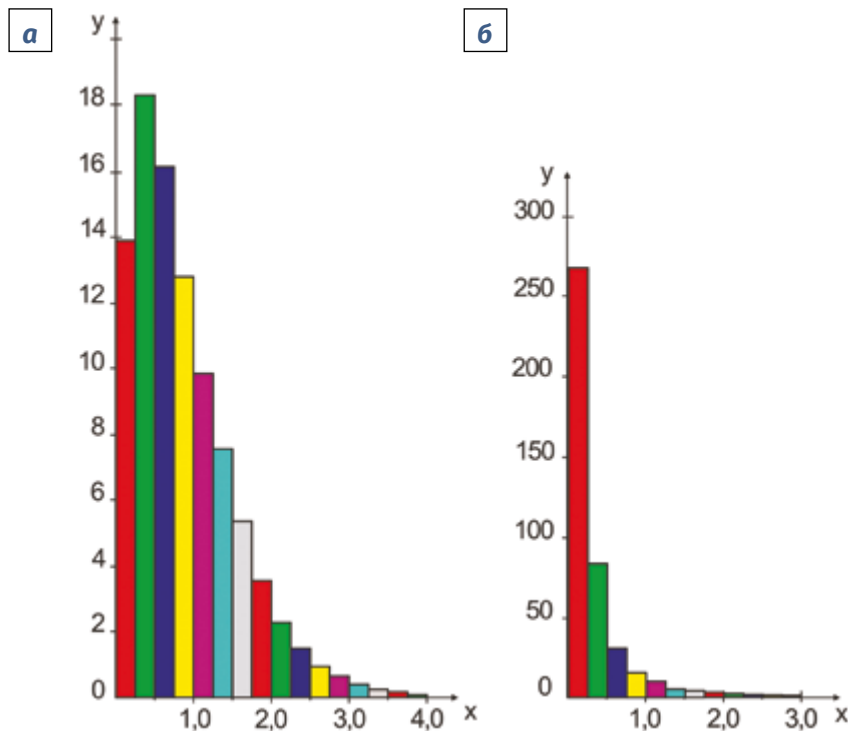


Рис. 9. Гістограма вибірки вузлів у полігонах зсувів і за їх межами для фактора кутів нахилу схилу: а – розподіл фактора в межах полігонів зсувів; б – розподіл фактора поза полігонами зсувів (по осі x відображено інтервал значень фактора, по осі y – кількість вузлів, $n \times 10^3$)

Fig. 9. Histogram of the nodes selected within and outside landslide areas for the slope angle factor: a – distribution of the factor within landslide polygons; б – distribution of the factor outside landslide polygons (the x-axis shows the factor value interval, the y-axis shows the nodes number, $n \times 10^3$)

По гістограмах визначаються дискримінантні (роздільні) значення для кожного фактора:

$$x_i \rightarrow \text{class}_1 \text{ if } P_1 - P_2 > 0, \\ x_i \rightarrow \text{class}_2 \text{ if } P_1 - P_2 < 0,$$

де class_1 – клас інтервалів значень фактора, небезпечних з точки зору зсувоутворення; class_2 – клас безпечних інтервалів значень фактора; X_i – i -й інтервал; P_1, P_2 – вірогідності визначені на гістограмах, отриманих на зсувах і за їх межами, відповідно.

Помилка 1-го роду E_1 :

$$E_1 = \int_{DS}^{\infty} P_1 dx$$

або в дискретному варіанті

$$E_1 = \sum_{i=DS}^n P_1(i).$$

Помилка 2-го роду E_2 :

$$E_2 = \int_0^{DS} P_2 dx$$

або в дискретному варіанті

$$E_2 = \sum_{i=1}^{DS} P_2(i).$$

Тут DS – дискримінантне (роздільне) значення.

Принцип розрахунку помилок 1- та 2-го роду ілюструє рис. 10.

Дискримінант (DS) – це точка на осі X з однаковою вірогідністю обох класів. Щоб зменшити помилку 1-го роду, достатньо зменшити дискримінант. Щоб зменшити помилку 2-го роду, необхідно збільшити дискримінант.

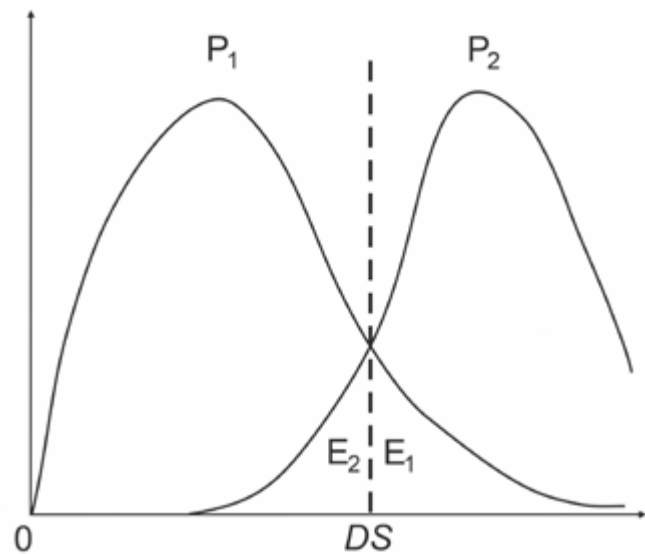


Рис. 10. Принцип розрахунку помилок 1- та 2-го роду

Fig. 10. Principle of calculating errors of the 1st and 2nd order

При картуванні ділянок можливого розвитку зсувних процесів вірогідність зсувонебезпеки та помилки 1- та 2-го роду можуть бути розраховані та закартовані для кожного вузла сітки. В таблиці наведено результати розрахунків помилок 1- та 2-го роду, оцінки параметрів емпіричних розподілів факторів (середнього значення, медіани та середньоквадратичного відхилення).

На підставі зазначеного вище встановлено, що найбільш інформативним фактором є дисперсія (середньоквадратичне відхилення) рельєфу з мінімальною помилкою 1-го роду

Таблиця. Інформативність факторів утворення схилових процесів (зсувів)**Table.** Informativeness of factors contributing to slope processes (landslides)

Фактор	Середнє значення	Медіана	Стандартне відхилення	Помилка 1-го роду, %	Помилка 2-го роду, %
Відстань до розломів (для вузлів у полігонах зсувів)	9691	1000	8719	25.84	60.29
Відстань до розломів (для вузлів за межами полігонів зсувів)	13872	1000	11974		
Кути нахилу схилу (для вузлів у полігонах зсувів)	0.8980	0.25	0.6875	34.19	17.85
Кути нахилу схилу (для вузлів за межами полігонів зсувів)	0.4035	0.25	0.426923		
Середньоквадратичне відхилення висоти (для вузлів у полігонах зсувів)	11.0469	10.5	5.9387	15.48	26.48
Середньоквадратичне відхилення висоти (для вузлів за межами полігонів зсувів)	4.3674	1.5	4.8390		

та невеликою помилкою 2-го роду. Далі за інформативністю знаходяться відстань від тектонічних порушень і кути нахилу рельєфу денної поверхні. В той же час більша частина закартованих як зсувонебезпечні ділянки за відстанню до розломів будуть насправді безпечними.

5 Висновки

Обґрунтовано підходи до аналізу й оцінки розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів для сприяння прийняттю рішень щодо реконструкції території та повоєнної відбудови економіки України.

Здійснено ранжування території за щільністю та частотою прояву різних типів процесів (карст, схилові процеси, підтоплення, просідання лесових ґрунтів) з використанням статистичного аналізу просторових даних у середовищі ArcGIS. Також визначено площу території, що зазнає впливу цих процесів.

На основі аналізу умов і факторів, що впливають на розвиток небезпечних геологічних процесів, з використанням створеної бази даних визначено вплив тектоніки та рельєфу, а також створено прогнозу модель розвитку схилових процесів у межах досліджуваної території. Проведено аналіз розподілу схилових процесів за відстанню від тектонічних порушень. Встановлено прямий вплив порушень на їх розвиток

і зменшення цього впливу з віддаленням від розломів. Виявлено, що області прогнозованих процесів переміщення схилових мас виходять за межі раніше закартованих областей прояву схилових процесів.

Оцінено вплив зниження базису ерозії внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС на інтенсивність розвитку схилових процесів. Побудовано довгострокову прогнозну модель просторово-часового розвитку ярів у зоні впливу Каховського водосховища.

Таким чином, отримані моделі можуть бути використані як інформаційна основа для прийняття рішень і розробки стратегії відновлення території та господарського освоєння регіону. Обґрунтовано, що для розробки й оцінки сценаріїв економічного відновлення території, що зазнала впливу колишнього Каховського водосховища, відповідно до принципу «Build Back Better» та «Build Back Greener» необхідно враховувати проблему активізації небезпечних геологічних процесів шляхом реалізації моніторингу, картування, моделювання та прогнозування.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка та впровадження сучасних методологій моніторингу та стратегій відновлення геологічного середовища для розвитку економіки України» за державною бюджетною програмою КПКВК 6541230.

Військова агресія росії проти України має катастрофічний вплив на геологічне середовище, зокрема руйнування греблі Каховської ГЕС. Метою цього дослідження було обґрунтування підходів до аналізу й оцінки розвитку небезпечних екзогенних геологічних процесів для розробки технологій моніторингу геологічного середовища та підтримки прийняття рішень щодо реконструкції території та післявоєнного відновлення економіки України. Проведено ранжування території за щільністю та частотою прояву різних типів процесів (карст, схливи, процеси, підтоплення, просідання лесових ґрунтів) з використанням статистичного аналізу просторових даних у середовищі ArcGIS, а також визначено площу території, що зазнає впливу цих процесів. Аналіз отриманої карти дозволив оцінити площі, на яких розвинута певна кількість процесів: один – 47550,0 км² (76,8 %), два – 9661,79 км² (15,6 %), три – 4374,38 км² (7,09 %), чотири – 314,782 км² (0,5 %) та п'ять – 6,762 км² (0,01 %). Удосконалено методику оцінки ризиків і прогнозування розвитку схлизових процесів у межах території впливу Каховського водосховища. На основі аналізу умов і факторів, що впливають на розвиток небезпечних геологічних процесів, з використанням створеної бази даних визначено вплив тектоніки та рельєфу, а також створено прогнозну модель розвитку схлизових процесів у межах досліджуваної території. Проведено аналіз розподілу схлизових процесів за відстанню від тектонічних порушень. Виявлено, що області прогнозованих процесів зсувів виходять за межі раніше закартованих областей прояву схлизових процесів. Отримані результати забезпечать науково-методичну підтримку при обліку й оцінці збитків, завданих геологічному середовищу внаслідок російської збройної агресії, а також при розробці ремедіаційних заходів і стратегій управління ураженими територіями.

Список літератури

- Андреева Л.А., Король П.Н., Самулева В.И. Отчет по составлению инженерно-геологических карт районирования территории по условиям развития и интенсивности проявления экзогенных геологических процессов масштаба 1:200 000 в Крымской и Херсонской областях. Київ: ДНВП «Геоінформ України», 1983. Інв. № 57470. Кн. 4. 212 с.
- Бойко К. Затоплено війною: Дослідження руйнування Каховської греблі та його наслідки для екосистеми, аграріїв, цивільного життя та міжнародного правосуддя. Додаток С. Експертний аналіз шкоди, заподіяної водним ресурсам та елементам довкілля внаслідок прориву греблі Каховського гідровузла. *Truth Hounds*. 2024. 40 с. <https://truth-hounds.org/wp-content/uploads/2024/06/zatopleno-vijnoyu-dodatok-c.pdf>
- Гаврилюк Р., Шпак О., Логвиненко О., Запольський І. Методичні аспекти оцінки стану забруднення геологічного середовища нафтопродуктами, спричиненого військовою агресією РФ проти України. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В.Н. Каразіна. Сер. Геологія. Географія. Екологія*. 2024. Т. 61. С. 23–38. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02>
- Государственная геологическая карта Украины масштаба 1:200 000. Заметки с пояснениями. Причерноморская серия. Лист L-36-X (Новая Каховка): Марченко Я.А. (ред.). Мингеологии СССР, Мингеологии Украинской ССР, Трест «Укрпивденгеология». Днепропетровск, 1975. 93 с.
- Государственная геологическая карта Украины масштаба 1:200 000. Заметки с пояснениями. Причерноморская серия. Лист L-36-IX (Николаев): Моляко Г.И. (ред.). Мингеологии СССР, Мингеологии Украинской ССР, Трест «Укрпивденгеология». Днепропетровск, 1976. 85 с.
- Долгополов В.Н. Гидрогеологическая и инженерно-геологическая изученность масштаба 1:200 000 территории г. Херсон на листах L-38-IX, L-36-XV. Київ: ДНВП «Геоінформ України», 1991. Інв. № 57470. Кн. 1–3.
- Жуков М.Н. Статистичний аналіз геологічних даних. Київ, 1995. 551 с.
- Катастрофа Каховського водосховища: свідчать супутникові знімки: Попов М.О. (ред.). Київ: ТОВ «Українська Картографічна Група», 2024. 92 с.
- Климчук Л.М., Драпиковська І.С., Сергієнко А.А. Карта оцінки ймовірності розвитку зсувів на території України. Масштаб 1:1 000 000. Київ: ДНВП «Геоінформ Україна», 2008а.
- Климчук Л.М., Красноок Л.М., Сергієнко А.А. Карта оцінки ймовірності ризику розвитку карстового процесу на території України. Масштаб 1:1 000 000. Київ: ДНВП «Геоінформ Україна», 2008б.
- Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Міндовкілля: «Build Back Better», «Build Back Greener» – ключові принципи відбудови України. *Урядовий портал: єдиний веб-портал органів виконавчої влади України*. 28 листопада 2023. <https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-build-back-better-vuuld-vack-greener-kliuchovi-pryntsypy-vidbudovy-ukrainy>
- Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2022. 514 с. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>
- Ольштинська О.П., Шевченко Т.В., Якушин Л.М., Дернов В.С., Крохмаль О.І., Бояріна Н.І. Втрата геологічної спадщини України на територіях, окупованих російською федерацією. *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України*. 2024. Т. 17, вип. 1. С. 15–34. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.295219>
- Саніна І.В., Люта Н.Г. Екологічні наслідки підризу греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінер. ресурси України*. 2023. № 2. С. 50–55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>
- Саніна І.В., Люта Н.Г. Щодо забезпеченості експлуатаційними запасами питних підземних вод Дніпропетровської, Запорізької, Миколаївської та Херсонської областей. *Мінер. ресурси України*. 2024. № 3. С. 61–68. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.61-68>
- Тектонічна карта України. Масштаб 1:1 000 000. Пояснювальна записка: Гурський Д.С., Круглов С.С. (ред.). Державна геологічна служба. Український державний геологорозвідувальний інститут. Київ: УкрДГРІ, 2007. 132 с.
- Тектонічна карта України. Масштаб 1:100 000: Круглов С.С., Гурський Д.С. (ред.). Державна геологічна служба України. Київ, 2007.
- Черкасов В.О. Моніторинг екзогенних геологічних процесів в Одеській, Миколаївській та Херсонській області за 2001–2006 рр. Київ: ДНВП «Геоінформ України», 2007. Інв. № 60753. Кн. 1–2.
- Шехунова С.Б., Стадніченко С.М., Сюмар Н.П. Оцінка екологічних ризиків та економічних збитків для геологічного середовища та корисних копалин внаслідок збройної агресії росії проти України. Оновлені дані. *Зб. наук. пр. Ін-ту геол. наук НАН України*. 2023. Т. 16, вип. 1. С. 3–23. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.294230>
- 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. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011>
- Asmare D. Application and Validation of AHP and FR Methods for Landslide Susceptibility Mapping Around Choke Mountain, Northwestern Ethiopia. *Scientific African*. 2023. Vol. 19. e01470. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470>

- Cherevko I., Kril T., Bugai D., Shekhunova S. Impact of hydrogeology factors on geotechnical conditions of the heritage Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. 2024. Vol. 13 (3). P. 91–101. <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>
- Kadam B.P., Garg V., Dwivedi S.K., Thakur P., Dhote P.R. Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLVIII-3-2024. 2024. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-251-2024>
- Karamushka V., Khoriev M., Huliaieva O., Kuns B. Water supply ecosystem services of the former Kakhovka Reservoir. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1474, No. 1. P. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1474/1/012014>
- Miccadei E., Carabella C., Paglia G. Landslide Hazard and Environment Risk Assessment. *Land*. 2022. Vol. 11, No. 3. P. 428. <https://doi.org/10.3390/land11030428>
- Pichura V., Potravka L., Kutishchev P. Consequences of sabotage of the Kakhovka dam on the waters of the Dnipro-Buh estuary and the Black Sea. *Natural built social environment health*. 2025. Vol. 1, No. 1. P. 134–160. <https://doi.org/10.63095/nbseh.25.877655>
- Pilatasig L., Torrijo F.J., Ibadango E., Troncoso L., Alonso-Pandaves O., Mateus A., Solano S., Viteri F., Alulema R. Casual-Nuevo Alausí Landslide (Ecuador, March 2023): A Case Study on the Influence of the Anthropogenic Factors. *Geo-Hazards*. 2025. Vol. 6, No. 2. P. 28. <https://doi.org/10.3390/geohazards6020028>
- Shekhunova S., Sanina I., Kril T., Syumar N. Kakhovska hydroelectric power plant dam explosion: impact on water resources and activation of hazardous exogenous geological processes. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2023. 23 (3.2). <https://doi.org/10.5593/sgem2023V/3.2/s12.18>
- Shekhunova S.B., Siumar S.P., Lobasov O.P., Yakovlev E.O., Meijer S., Stadnichenko S.M. GIS tools application for landslides formation factors analysis (Transcarpathian region). *First EAGE Workshop on assessment of landslide and debris flows hazards in the Carpathians*, Lviv, Ukraine, June 17–20, June 2019. Lviv, 2019. L-05. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902160>
- Shekhunova S.B., Stadnichenko S.M., Siumar N.P., Aleksieienkova M.V., Lobasov O.P. Analysis of exogenous hazardous geological processes within the zone affected by the former Kakhovka Reservoir. *XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Kyiv, Ukraine, April 14–17, 2025. Kyiv, 2025a. Mon25-227. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510227>
- Shekhunova S.B., Stadnichenko S.M., Siumar N.P., Lobasov O.P. Slope mass movement processes susceptibility and risk assessment for the territory affected by the former Kakhovka Reservoir. *Fifth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, Kyiv, Ukraine, September 18–21, 2025. Kyiv, 2025b. [Landslide25_32]. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520032>
- Shestopalov V., Rudenko Y., Koliabina I., Stetsenko B., Yaroshenko K. Groundwater for urban water supply in Ukraine: a case study of Mykolaiv (Military challenges and lessons for the future). *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*. 2024. Vol. 13 (3). P. 79–89. <https://doi.org/10.7343/as-2024-772>
- Shevchuk O.A., Boyarina N., Sukhov O., Shevchuk O.I., Vajda V., McLoughlin S. The palaeobotanical heritage of Ukraine and its endangered status following the Russian military invasion. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2024. Vol. 331. 105201. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105201>
- Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., Oreshchenko A., Constantinescu G., Afanasyev S., Koken M., Osadchyi V., Rhoads B., Tockner K., Monaghan M.T., Schröder B., Nabyvanets J., Wolter C., Lietyska O., Van de Koppel J., Magas N., Jähnig S.C., Lakisova V., Trokhymenko G., Venohr M., Komorin V., Stepanenko S., Khilchevskyi V., Domisch S., Blettler M., Gleick P., De Meester L, Grossart H.P. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387, No. 6739. P. 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
- Taye A.J., Tamang R. A conceptual study on methodologies for landslide hazard: inventories, susceptibility, vulnerability, and risk analysis. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 163–174. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v13.i4.2025.6139>
- United Nations Environment Programme. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach; Ukraine, 2023. Nairobi, Kenya, 2023. 130 p. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/4369>
- 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. P. 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Vyshnevskyi V., Shevchuk S. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International journal of environmental studies*. 2024. Vol. 81, No. 1. P. 257–288. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>
- Vyshnevskyi V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., & Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water international*. 2023. Vol. 4, No. 5. P. 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
- Yailymov B., Yailymova H., Kolotii A., Shelestov A., Skakun S., Baber Sh., Becker-Reshef I., Kussul N. Flooded and Irrigation Area Monitoring After the Kakhovka Dam Disaster Based on Machine Learning and Satellite Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2025. Vol. 18. P. 19129–19144. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3592368>

References

- Andreeva L.A., Korol P.N., Samuleva V.I. 1983. Report on the compilation of engineering-geological maps of the zoning of the territory according to the conditions of development and intensity of exogenous geological processes on a scale of 1:200,000 in the Crimean and Kherson regions. Kyiv: DNVP “Geoinform of Ukraine”, inv. No. 57470, book 4, 212 p. (in Russian).
- Asmare D. 2023. Application and Validation of AHP and FR Methods for Landslide Susceptibility Mapping Around Choke Mountain, Northwestern Ethiopia. *Scientific African*, 19, e01470. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01470>
- Boiko K. 2024. Flooded by War: A Study of the Destruction of the Kakhovka Dam and Its Consequences for the Ecosystem, Agriculture, Civil Life, and International Justice. Appendix C. Expert Analysis of Damage Caused to Water Resources and Environmental Elements as a Result of the Breach of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant Dam. *Truth Hounds*. 40 p. <https://truth-hounds.org/wp-content/uploads/2024/06/zatopleno-vijnoyu-dodatok-c.pdf> (in Ukrainian).
- Cherevko I., Kril T., Bugai D., Shekhunova S. 2024. Impact of hydrogeology factors on geotechnical conditions of the heritage Kyiv-Pechersk Lavra Monastery complex: Lessons from three decades of monitoring. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 13 (3), 91–101. <https://doi.org/10.7343/as-2024-765>
- Cherkasov V.O. 2007. Monitoring of exogenous geological processes in Odessa, Mykolaiv, and Kherson regions in 2001–2006. Kyiv: State Scientific and Production Enterprise “Geoinform of Ukraine”, inv. No. 60753, book 1–2 (in Ukrainian).
- Dolgopolo V.N. 1991. Hydrogeological and engineering-geological study of the territory of Kherson at a scale of 1:200,000 on sheets L-38–IX, L-36–XV. Kyiv: DNVP “Geoinform of Ukraine”, inv. No. 57470, books 1–3 (in Russian).

- Gurskiy D.S., Kruglov S.S. (Eds.). 2007. Tectonic map of Ukraine. Scale 1:1,000,000. Explanatory note. Kyiv: UkrDGRI (in Ukrainian).
- Havryliuk R., Shpak O., Lohvynenko O., Zapolskiy I. 2024. Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 61, 23–38. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-02> (in Ukrainian).
- Kadam B.P., Garg V., Dwivedi S.K., Thakur P., Dhote P.R. 2024. Dam Breach Analysis and Damage Assessment of Nova Kakhovka Dam using Satellite data and 1D and 2D Hydrodynamic Modeling. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLVIII-3-2024*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-251-2024>
- Karamushka V., Khoriev M., Huliaieva O., Kuns B. 2025. Water supply ecosystem services of the former Kakhovka Reservoir. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1474, 1, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1474/1/012014>
- Klymchuk L.M., Drapikovska I.S., Sergienko A.A. 2008. Map of the assessment of the probability of the risk of developing landslides in the territory of Ukraine. Scale 1:1,000,000. Kyiv: DNVP “Geoinform of Ukraine” (in Ukrainian).
- Klymchuk L.M., Krasnook L.M., Sergienko A.A. 2008. Map of the assessment of the probability of the risk of the development of the karst process on the territory of Ukraine. Scale 1:1,000,000. Kyiv: DNVP “Geoinform of Ukraine” (in Ukrainian).
- Kruglov S.S., Gurskiy D.S. (Eds.). 2007. Tectonic map of Ukraine. Scale 1:1000000. Ministry of Environmental Protection of Ukraine, State Geological Survey of Ukraine. Kyiv (in Ukrainian).
- Marchenko Ya.A. (Ed.). 1975. State geological map of Ukraine of scale 1:200,000. Explanatory Notes. Prychornomorska series. Sheets L-36-X (Nova Kakhovka). Ministry of Geology of USSR, Ministry of Geology of Ukrainian SSR, Trust “Ukrpivdengeologiya”. Dnepropetrovsk (in Russian).
- Miccadei E., Carabella C., Paglia G. 2022. Landslide Hazard and Environment Risk Assessment. *Land*, 11, 3, 428. <https://doi.org/10.3390/land11030428>
- Ministry of Environmental Protection and Natural Resources. 2023: Build Back Better, Build Back Greener – key principles of Ukraine's reconstruction. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, November 2023. <https://www.kmu.gov.ua/en/news/min-dovkillia-build-back-better-vuild-vack-greener-kliuchovi-pryntsyropy-vidbudovy-ukrainy> (in Ukrainian).
- Moliavko G.I. (Ed.). 1976. State geological map of Ukraine of scale 1:200,000. Explanatory Notes. Prychornomorska series. Sheets L-36-IX (Mykolaiv). Ministry of Geology of USSR, Ministry of Geology of Ukrainian SSR, Trust “Ukrpivdengeologiya”. Dnepropetrovsk (in Russian).
- National Report on the State of the Environment in Ukraine in 2021. 2022. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (in Ukrainian).
- Olshynska O.P., Shevchenko T.V., Yakushin L.M., Dernov V.S., Krokhmal O.I., Boyarina N.I. 2024. Loss of the geological heritage of Ukraine in the territories occupied by the Russian Federation. *Collection of scientific works of Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 17, 2, 15–34. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.295219> (in Ukrainian).
- Pichura V., Potravka L., Kutishchev P. 2025. Consequences of sabotage of the Kakhovka dam on the waters of the Dni-pro-Buh estuary and the Black Sea. *Natural built social environment health*, 1, 1, 134–160. <https://doi.org/10.63095/nbseh.25.877655>
- Pilatasig L., Torrijio F.J., Ibadango E., Troncoso L., Alonso-Pandavenes O., Mateus A., Solano S., Viteri F., Alulema R. 2025. Casual-Nuevo Alausí Landslide (Ecuador, March 2023): A Case Study on the Influence of the Anthropogenic Factors. *Geo-Hazards*, 6, 2, 28. <https://doi.org/10.3390/geohazards6020028>
- Popov M.O. (Ed.). 2024. Kakhovka reservoir disaster: satellite imagery evidence. Kyiv: Ukrainian Cartographic Group, 92 p. (in Ukrainian).
- Sanina I.V., Lyuta N.G. 2023. Environmental consequences of the Kakhovka hydroelectric power plant dam explosion and ways to improve water supply to the population. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 50–55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55> (in Ukrainian).
- Sanina I.V., Lyuta N.G. 2024. On the availability of operational reserves of drinking groundwater in Dnipropetrovsk, Zaporizka, Mykolaivska and Khersonska regions. *Mineral resources of Ukraine*, 3, 61–68. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.61-68> (in Ukrainian).
- Shekhunova S., Sanina I., Kril T., Syumar N. 2023. Kakhovska hydroelectric power plant dam explosion: impact on water resources and activation of hazardous exogenous geological processes. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 23 (3.2). <https://doi.org/10.5593/sgem2023V/3.2/s12.18>
- 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). *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 11–20. <https://doi.org/10.15407/ugz2022.03.011> (in Ukrainian).
- 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*, Lviv, Ukraine, June 17–20, 2019. Lviv, L-05. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902160>
- Shekhunova S.B., Stadnichenko S.M., Siumar N.P. 2023. Assessment of environmental risks and economic losses to geological environment and mineral resources caused by Russia's military aggression against Ukraine. Updated data. *Collection of scientific works of Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 16, 1, 3–23. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.294230> (in Ukrainian).
- Shekhunova S.B., Stadnichenko S.M., Siumar N.P., Aleksieienko M.V., Lobasov O.P. 2025a. Analysis of exogenous hazardous geological processes within the zone affected by the former Kakhovka Reservoir. *XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*, Kyiv, Ukraine, April 14–17, 2025. Kyiv, Mon25-227. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510227>
- Shekhunova S.B., Stadnichenko S.M., Siumar N.P., Lobasov O.P. 2025b. Slope mass movement processes susceptibility and risk assessment for the territory affected by the former Kakhovka Reservoir. *Fifth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*. Kyiv, Ukraine. September 18–21, 2025. [Landslide25_32]. Kyiv. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025520032>
- Shestopalov V., Rudenko Y., Koliabina I., Stetsenko B., Yaroshenko K. 2024. Groundwater for urban water supply in Ukraine: a case study of Mykolaiv (Military challenges and lessons for the future). *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 13 (3), 79–89. <https://doi.org/10.7343/as-2024-772>
- Shevchuk O.A., Boyarina N., Sukhov O., Shevchuk O.I., Vajda V., McLoughlin S. 2024. The palaeobotanical heritage of Ukraine and its endangered status following the Russian military invasion. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 331, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2024.105201>
- Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., Oreshchenko A., Constantinescu G., Afanasyev S., Koken M., Osadchyi V., Rhoads B., Tockner K., Monaghan M.T., Schröder B., Nabyvanets J., Wolter C., Lietytska O., Van de Koppel J., Magas N., Jähnig S.C., Lakisova V., Trokhymenko G., Venohr M., Komorin V., Stepanenko S., Khilchevskiy V., Domisch S., Blettler M., Gleick P., De Meester L., Grossart H.-P. 2025. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387, 6739, 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>

- Taye A.J., Tamang R. 2025. A conceptual study on methodologies for landslide hazard: inventories, susceptibility, vulnerability, and risk analysis. *International Journal of Research – GRANTHAALAYAH*, 13, 4, 163–174. <https://doi.org/10.29121/granthaalayah.v13.i4.2025.6139>
- United Nations Environment Programme. (2023). Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach; Ukraine, 2023. Nairobi, Kenya. 130 p. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/4369>
- Van Westen C.J., Castellanos E., Kuriakose S.L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- Vyshnevskiy V., Shevchuk S. 2024. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International journal of environmental studies*, 81, 1, 275–288. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>
- Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., & Gleick P. 2023. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water international*, 48, 5, 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
- Yailymov B. Yailymova H., Kolotii A., Shelestov A., Skakun S., Baber Sh., Becker-Reshef I., Kussul N. 2025. Flooded and Irrigation Area Monitoring After the Kakhovka Dam Disaster Based on Machine Learning and Satellite Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 19129–19144. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3592368>
- Zhukov M.N. 1995. Statistical analysis of geological data. Kyiv. 551 p. (in Ukrainian).