

С. М. Бабійчук,
М. С. Шоненко,
О. В. Томченко

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ КАТАСТРОФИ НА КАХОВСЬКІЙ ГЕС МЕТОДАМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ: НАУКОВО-ОСВІТНІЙ АСПЕКТ

Анотація. У статті здійснено комплексний аналіз екологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. із застосуванням матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). На основі багатоспектральних супутникових знімків Sentinel-2 та вегетаційного й водного спектральних індексів проаналізовано динаміку змін площ водної поверхні й новоутворених суходільних ділянок у період з травня 2023 до вересня 2025 р. Встановлено етапи трансформації ландшафту, охарактеризовано формування нового гідрологічного режиму та визначено довгострокові екологічні наслідки. Особливу увагу приділено аналізу події крізь призму сучасної теорії екоциду. Результати дослідження підтверджують масштабність і тривалість екологічної катастрофи й демонструють високу ефективність ДЗЗ як інструменту моніторингу техногенних екологічних подій великого просторового масштабу. У межах цього дослідження особливу увагу приділено поєднанню технологічних і пізнавальних аспектів наукової діяльності. Використання інформаційних технологій, геоінформаційних систем і методів дистанційного зондування Землі формує цілісний дослідницький простір, у якому всі етапи аналізу — від отримання вихідних даних до побудови картографічних і статистичних моделей — реалізуються в єдиному середовищі. Такий підхід забезпечує дослідницьку компактність, що проявляється у зменшенні часових і ресурсних витрат без втрати наукової повноти результатів. Важливо, що використання відкритих супутникових даних має не лише наукове, а й освітнє значення. Наприклад, дані місії Sentinel-2 є загальнодоступними й безкоштовними, їх можна отримати через відкритий хмарний сервіс Європейського космічного агентства — Copernicus Browser. Це створює унікальні можливості для інтеграції сучасних методів аналізу геоданих у навчальний процес: кожен учень чи студент, який володіє базовими навичками роботи з комп'ютером, може самостійно завантажувати супутникові знімки, застосовувати спектральні індекси та проводити дослідження стану довкілля окремих регіонів. Водночас формування дослідницької компетентності відбувається через розв'язання реальної наукової проблеми в умовах обмеженого доступу до об'єкта дослідження. Територія колишнього Каховського водосховища частково розташована поблизу зони бойових дій, що фактично унеможливує систематичні наземні спостереження. За таких умов дистанційний аналіз виступає не допоміжним, а базовим інструментом наукової розвідки, який дає змогу отримувати об'єктивну просторово-часову інформацію та відпрацьовувати навички інтерпретації складних геоecологічних процесів. Окреме значення має прикладний характер дослідження, орієнтований на вивчення природних змін у межах власної держави. Застосування краєзнавчого принципу в навчально-дослідницькій діяльності посилює мотивацію до аналізу, оскільки об'єкт дослідження є соціально та екологічно значущим.

Ключові слова: Каховська ГЕС, дистанційне зондування Землі, MNDWI, дослідницька компетентність, екоцид.

Вступ. Руйнування Каховської гідроелектростанції 6 червня 2023 р. спричинило різку зміну гідрологічного режиму нижньої течії Дніпра та призвело до втрати штучно сформованої водної системи, яка протягом десятиліть визначала екологічні та господарські умови регіону. Масштаб змін проявився не лише у зникненні водосховища як цілісного об'єкта, а й у трансформації ґрунтово-рослинного покриву, водно-болотних угідь і прибережних ландшафтів [1]. Через неможливість повноцінних польових досліджень на частині території ключову роль відведено дистанційному зондуванню Землі як основному джерелу об'єктивної та просторово-репрезентативної інформації.

Ця подія набула значного правового та суспільного резонансу. У наукових і міжнародно-правових дискусіях дедалі частіше порушується питання кваліфікації руйнування Каховської ГЕС як акту екоциду — злочину проти довкілля, наслідки якого є масштабними, тривалими та тяжкими.

Аналіз попередніх досліджень. Багато вчених приділило увагу дослідженню цієї теми, зокрема аналізу екологічних і гідрологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС [2–4]. Так, О. Шумілова та співавтори [2] зосередилися на впливах катастрофи на екосистему, Н. Магась та колеги [3] розглянули зміни гідрологічного режиму у дельті Дніпра та Буга, а В. Вишневський зі співавторами [4] дослідив наслідки для водних ресурсів. О. Томченко та колеги [5] виконали порівняльний аналіз зміни об'єму водосховища на основі супутникових даних, тоді як О. Трофимчук та співавтори [6] оцінили динаміку змін і вплив на навколишнє середовище. Додатково супутникові знімки й узагальнення даних, представлені М. Поповим [7], дають змогу комплексно оцінити наслідки катастрофи для регіональної екосистеми.

У статті В. Вишневського та С. Шевчук [8] проаналізовано наслідки руйнування Каховської ГЕС для гідрологічного режиму нижнього Дніпра та подальшого розвитку Каховського водосховища. Показано, що швидке спрацювання водосховища спричинило істотні зміни руслової системи, відновлення заплавлених територій і трансформацію екосистем. Автори також розглядають можливі сценарії майбутнього використання та екологічного відновлення території колишнього водосховища.

Дослідження Р. Шульца [9] присвячено аналізу зміни Каховського водосховища на основі супутникових даних Sentinel-2 та методів класифікації зображень. Робота демонструє ефективність використання дистанційного зондування для оцінювання морфометричних і екологічних змін водосховища після катастрофи.

У статті Л. Ліщенко, А. Козлової та А. Андреева [10] проведено аналіз просторово-часових змін ложа Каховського водосховища після руйнування дамби на основі супутникових даних Sentinel-2 та індексу NDWI.

У дослідженні А. Тавакколестабганаті та ін. [11] проаналізовано деформації Каховської греблі у 2017–2023 рр. за допомогою супутникової радарної інтерферометрії SAR на основі даних Sentinel-1. Встановлено, що окремі ділянки греблі демонстрували прискорене вертикальне просідання та горизонтальні зміщення ще з 2021 р., що могло свідчити про структурні проблеми перед руйнуванням у 2023 р.

Метою статті є наукове доведення факту екоциду, що відбувся внаслідок руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 р., шляхом кількісного аналізу просторово-часових змін гідрологічного режиму, ландшафтною структури та спектральних характеристик поверхні на основі супутникових даних дистанційного зондування Землі, а також зіставлення отриманих результатів із критеріями екоциду, визначеними сучасним міжнародним екологічним правом.

З огляду на мету можна виокремити такі дослідницькі завдання: оцінювання гідрологічних змін — кількісний аналіз трансформацій гідрологічного режиму Каховського водосховища й прилеглих водних об'єктів після руйнування дамби (зміни площі водної поверхні, динаміка осушення та затоплення) та правова інтерпретація — зіставлення результатів аналізу, отриманих за супутниковими даними, з критеріями екоциду, визначеними міжнародним екологічним правом.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження виконано з використанням даних супутникових місій Sentinel-2 (Level-2A), отриманих з ресурсу Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>). Аналіз охоплює ділянку колишнього Каховського водосховища від смт Кушугум Запорізької області до с. Козацьке Херсонської області. Виявлення водних і перезвожених поверхонь здійснювалося шляхом

розрахунку спектральних водних індексів, чутливих до співвідношення відбиття в зеленому та інфрачервоному діапазонах. Зокрема, водний індекс MNDWI використовувався як основний індикатор відкритої водної поверхні, тоді як вегетаційний індекс NDVI залучався для корекції впливу рослинного покриву, що відповідає підходам, апробованим у вітчизняних дослідженнях супутникового моніторингу водойм [12].

MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) — модифікований нормований диференційований індекс вологості, який використовують для моніторингу посухи та виявлення відкритої води.

Для розрахунку застосовуємо формулу індексу вологості:

$$MNDWI = (Green - SWIR) / (Green + SWIR),$$

де Green — зелена смуга діапазону, SWIR — середня інфрачервона.

Для Sentinel-2 формула MNDWI матиме такий вигляд:

$$(B3 - B11) / (B3 + B11),$$

де B3 — зелена смуга (Green), B11 — середня інфрачервона смуга (SWIR).

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — нормалізований вегетаційний індекс — простий показник кількості фотосинтетичної активної біомаси (зазвичай називається вегетаційним індексом).

Для розрахунку застосовуємо формулу:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red),$$

де NIR — ближня інфрачервона зона спектра, Red — видима червона зона спектра.

Для Sentinel-2 формула NDVI матиме такий вигляд:

$$(B8 - B4) / (B8 + B4),$$

де NIR — це B8, Red — B4.

У процесі класифікації супутникових знімків використовувалися порогові значення індексу MNDWI для розмежування водних і суходільних поверхонь. Зокрема, пікселі зі значенням MNDWI більше 0 відносилися до водних об'єктів, тоді як значення MNDWI, що дорівнюють або є меншими за 0, інтерпретувалися як території суходолу. Подібний підхід широко застосовується у дослідженнях дистанційного зондування Землі, оскільки дає змогу достатньо надійно виявляти водні об'єкти на основі спектральних характеристик поверхні.

Водночас отримані результати можуть супроводжуватися певними похибками, що зумовлено обмеженнями методу. На точність ідентифікації водних поверхонь впливають атмосферні фактори, зокрема наявність хмарності, яка здатна змінювати спектральні властивості зображення. Додатковим чинником є сезонна мінливість природних умов, оскільки площа водних об'єктів та рівень води у річках і водосховищах можуть суттєво змінюватися протягом року. Урахування цих чинників сприяє підвищенню наукової обґрунтованості та достовірності інтерпретації отриманих результатів.

Ключові часові зрізи включають дати: 06.05.2023, 05.06.2023, 20.06.2023, 05.07.2023, 09.08.2023, 03.10.2023, 09.06.2024, 01.10.2024, 06.06.2025 та 24.09.2025. Оброблення та векторизація результатів класифікації здійснювалися в середовищі QGIS, статистичний аналіз і побудова графіків — у Microsoft Excel.

Результати дослідження. Відповідно до отриманих результатів побудовано графік динаміки змін водної та суходільної площі Каховського водосховища за період 2023–2025 рр. (рис. 1). Він відображає різкі та системні зміни гідрологічного режиму Каховського водосховища після руйнування 6 червня 2023 р. Дані демонструють динаміку трансформації території у часовому розрізі — від повної затопленості до формування стабільних ділянок суші. Динаміка має характер переламної екологічної кризи, за якою слідує формування нової рівноваги.

Аналіз супутникових даних засвідчив різку й системну зміну співвідношення водної та суходільної поверхонь після 6 червня 2023 р. До катастрофи площа акваторії перевищувала 2100 км² і залишалася стабільною. Уже в червні — жовтні 2023 р. площа водної поверхні скоротилася більш ніж в 11 разів — приблизно з 2120 км² до близько 190 км², тоді як площа оголеної суші зросла до майже 1960 км².

У 2024 р. спостерігалось часткове та нестійке відновлення водності: максимальна площа водойми досягала близько 850 км², що становило орієнтовно 40 % рівня, який був до катастрофи. Водночас просторовий розподіл води мав мозаїчний характер із переважанням мілковод-ді і заболочених ділянок.

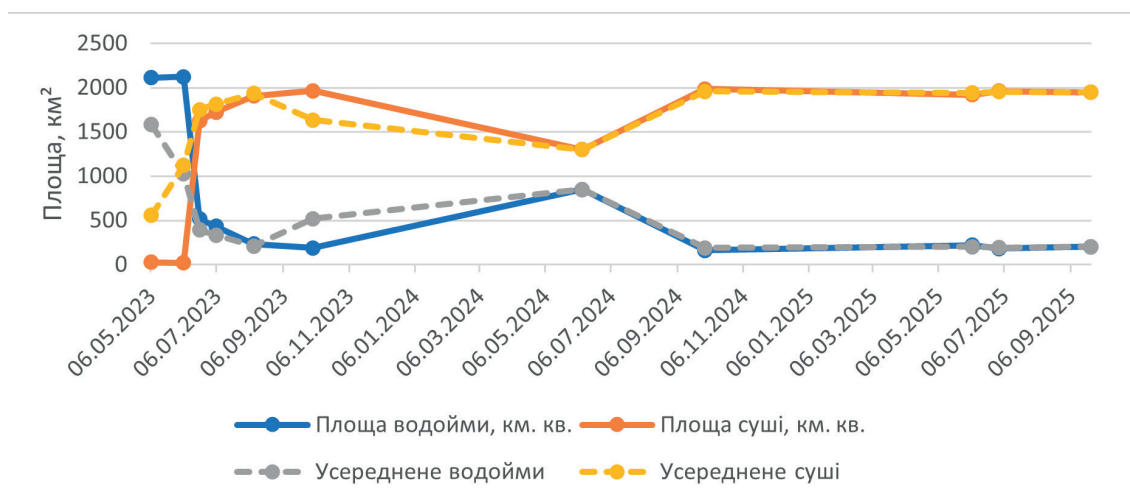


Рис. 1. Динаміка змін водної та суходільної площ Каховського водосховища за період 2023–2025 рр. (дані отримано зі спектральних індексів супутника Sentinel-2 через ресурс <https://dataspace.copernicus.eu/>)

На початку 2025 р. динаміка площ стабілізувалася: коливання водної поверхні відбувалися в межах 170–220 км². Це свідчить про формування нового, деградованого, але відносно стійкого гідрологічного режиму, який суттєво відрізняється від стану до катастрофи.

Теоретичні засади поняття «екоцид». Термін «екоцид» виник у 1970-х рр. у відповідь на масштабне знищення довкілля під час збройних конфліктів, зокрема застосування дефоліантів у В'єтнамі [13]. Сучасне визначення, запропоноване експертною групою Stop Ecocide Foundation у 2021 р., характеризує екоцид як протиправні або свавільні дії, що завдають серйозної, масштабної або тривалої шкоди довкіллю [14]. До ключових критеріїв належать масштаб впливу, тривалість наслідків та глибина порушення природних процесів.

Порівняння цих критеріїв із результатами нашого дослідження дає змогу розглядати руйнування Каховської ГЕС як подію, що відповідає ознакам екоциду. Зокрема, зафіксовано значний просторовий вплив, тривалі зміни гідрологічного режиму й порушення функціонування водно-болотних екосистем нижнього Дніпра [15].

Для більш чіткого обґрунтування цього твердження доцільно розглянути причинно-наслідкові зв'язки між зафіксованими просторово-часовими змінами та критеріями екоциду, що представлені в таблиці 1.

Формування дослідницької компетентності інструментами ДЗЗ. Руйнування Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. стало масштабною техногенною катастрофою, що спричинила глибокі екологічні зміни та людські втрати. Частина території колишнього водосховища опинилася поблизу зони бойових дій, що унеможливило проведення систематичних наземних досліджень. У таких складних умовах супутниковий моніторинг Землі став одним із ключових джерел об'єктивної інформації про стан довкілля, оскільки дав змогу фіксувати просторово-часові зміни ландшафтів, водного режиму й екологічної ситуації загалом.

Формування дослідницької компетентності в освітньому процесі відбувається, зокрема, через залучення учнів і студентів до аналізу реальних екологічних подій, що мають соціальну значущість. Важливу роль у цьому відіграє краєзнавчий принцип навчання, коли об'єктом дослідження стає територія власної країни, міста чи регіону. Робота із супутниковими даними щодо руйнування Каховської ГЕС сприяє розвитку дослідницької компетентності як цілісної, системної та динамічної якості особистості, що проявляється в усвідомленій готовності до дослідження, персональній зацікавленості у пізнанні нового, а також у здатності застосовувати наукові методи для формування нових знань, умінь, навичок і досвіду [16].

Таблиця 1

**Причинно-наслідкові зв'язки
між виявленими просторово-часовими змінами Каховського водосховища
та критеріями екоциду**

Причинно-наслідкова зміна	Конкретні просторово-часові прояви, встановлені за даними ДЗЗ	Потенційний вплив на екосистему	Відповідні критерії екоциду (міжнародне право)
Раптовий спуск води, осушення водосховища	Зменшення площі водної поверхні, оголення дна водойми, зміни берегової лінії (Sentinel-2, NDWI)	Загибель водних організмів, зниження біорізноманіття, руйнування середовища проживання	Ст. 8 Римського статуту Міжнародного кримінального суду — заподіяння шкоди екології в результаті широкомасштабних або довготривалих дій
Затоплення прилеглих територій	Тимчасове або часткове затоплення антропогенних та природних прибережних екосистем	Руйнування наземних екосистем, загибель живих організмів флори і фауни	Міжнародні критерії екоциду — завдання шкоди навколишньому середовищу умисне або з недбалості
Зміна ландшафтної структури	Формування нових русел, ерозія берегів, розмивання ґрунту	Втрата природних біотопів, зміна міграційних шляхів флори і фауни	Екоцид як навмисне або систематичне руйнування екосистем
Зміна спектральних характеристик води	Підвищена мутність, зниження прозорості води, інтенсивний розвиток фітопланктону	Загибель водних тварин через нестачу кисню та зміни водного середовища	Критерії екоциду щодо шкоди водним ресурсам та водним екосистемам
Довгострокові трансформації	Поява нових заболочених територій, заростання оголеного дна, деградація прибережних ландшафтів	Зниження продуктивності екосистем, втрати рекреаційних та сільськогосподарських ресурсів	Ст. 8 Римського статуту — шкода довічлю як наслідок руйнівних дій

Участь у таких проєктах активізує критичне мислення, навички інтерпретації складних гео-екологічних процесів, роботи з великими масивами даних, а також поєднання інформаційного, технічного та пізнавального компонентів. Освітня діяльність, що базується на аналізі супутникових матеріалів, має не лише навчальну, а й просвітницьку цінність, сприяючи формуванню громадянської свідомості. Адже об'єкт дослідження безпосередньо пов'язаний із життям, безпекою та екологічною стабільністю у власній державі.

Дослідження зміни гідрологічного режиму Каховської ГЕС з червня 2023 р. до 2025 р. Для оцінювання розподілу водних і суходільних

територій було розраховано спектральний індекс MNDWI для двох реперних дат: 05.06.2023 (безпосередньо перед руйнуванням Каховської ГЕС) та 06.06.2025 (за два роки після катастрофи) в околицях міст Нікополя та Енергодару. На рисунку 2 представлені супутникові знімки Sentinel-2, що відповідають обраним ключовим датам часових зрізів.

За допомогою QGIS створено растрову гістограму шляхом побудови стовпчикового графіка, де вісь x відображає діапазон значень MNDWI, а вісь y — кількість пікселів у кожному інтервалі. Значення MNDWI варіюють від -1 до +1: негативні значення відповідають територіям суші або забудованим районам, близькі до нуля —

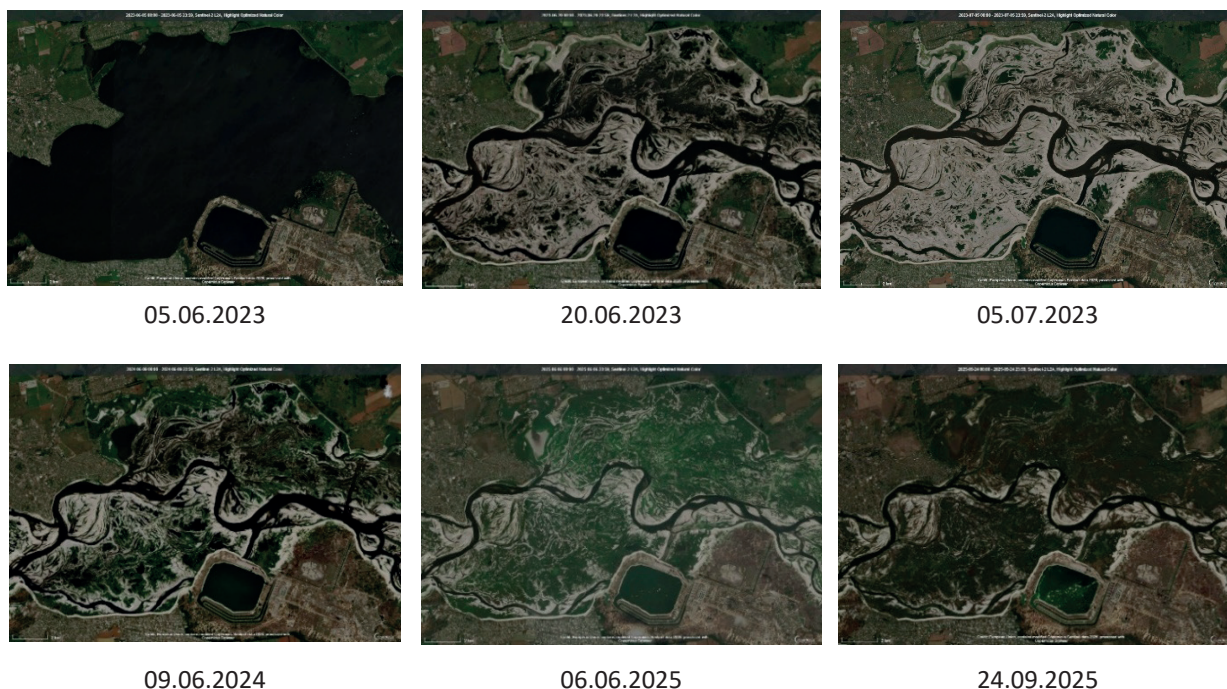


Рис. 2. Вигляд території дослідження в околицях міст Нікополя та Енергодару на супутникових знімках Sentinel-2 у природних кольорах

перехідним зонам, а позитивні значення — водним об'єктам. Растрова гістограма дає змогу візуалізувати просторовий розподіл цих значень і оцінити частку водних площ у досліджуваній області (рис. 3, 4).

Порівняльний аналіз растрових гістограм значень індексу зволоженості свідчить про істотне зниження вологості досліджуваної ділянки. Якщо на першому етапі (зображення зліва) розподіл мав чітко виражений двомодальний характер із значною часткою додатних значень, що відповідають водним та зволеним поверхням (різко виражений пік у позитивній зоні ($NDWI > 0,25$)), то на другому етапі (зображення справа) домінують від'ємні значення індексу (широкий пік у від'ємному та близькому до нуля діапазоні $(-0,35...0,05)$). Це вказує на скорочення площ водної поверхні та деградацію зволених екосистем, а також на загальний процес осушення території.

Для аналізу просторового розподілу водних ресурсів Каховської ГЕС було побудовано кольорові карти зволоженості, датовані 05.06.2023 (до руйнування гідротехнічної споруди) та 06.06.2025 (після тривалого періоду деградації водосховища) (рис. 3, 4). Карті базуються на значеннях індексів зволоженості,

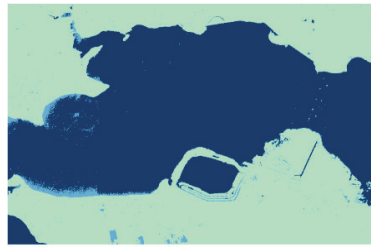
що дають змогу візуально оцінити концентрацію води на різних ділянках території та порівняти міжрічні зміни [17].

Карта за 2023 р. демонструє високі значення індексу зволоженості в межах акваторії Каховського водосховища та прибережних зон. Простежується чітка водна поверхня з рівномірним розподілом вологості, що відповідає нормальному функціонуванню гідровузла. На карті за 2025 р. зафіксовано різке зменшення вологості на більшій частині колишнього водосховища. Території, які раніше були вкриті водою, набули ознак осушених поверхонь із фрагментарними зонами залишкової вологості. Спостерігається мозаїчний характер зволоженості, що вказує на формування нових сухих ділянок.

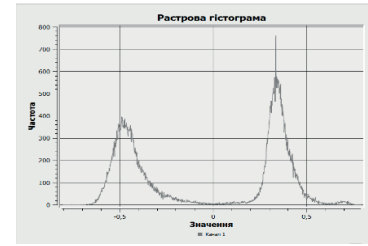
Висновки. Проведене дослідження, що ґрунтується на аналізі супутникових даних дистанційного зондування Землі та оцінці просторово-часових змін гідрологічних і спектральних характеристик поверхні, показало, що підриг Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. спричинив суттєві трансформації природного середовища у нижній течії Дніпра. Встановлено, що внаслідок руйнування гідротехнічної споруди відбулося фактичне зникнення Каховського водосховища, площа якого до події перевищу-



Супутниковий знімок
Sentinel-2

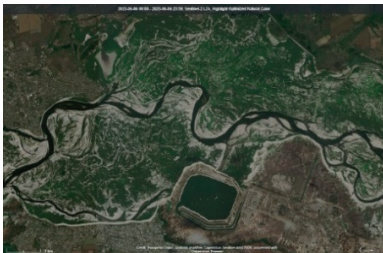


Карта зволоженості

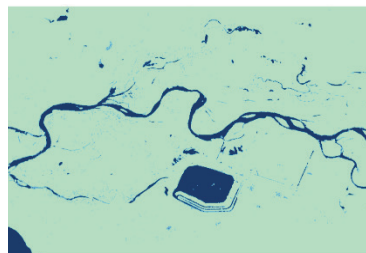


Вигляд гістограми розподілу
MNDWI

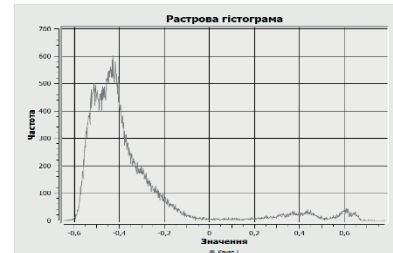
Рис. 3. Вигляд ділянки Каховського водосховища біля м. Енергодару 05.06.2023



Супутниковий знімок
Sentinel-2



Карта зволоженості



Вигляд гістограми розподілу
MNDWI

Рис. 4. Вигляд ділянки Каховського водосховища біля м. Енергодару 06.06.2025

вала 2100 км². На території колишнього водного дзеркала формується новий тип ландшафту, який суттєво відрізняється від попереднього.

Аналіз супутникових спостережень за період 2023–2025 рр. свідчить про відсутність ознак відновлення водосховища у природний спосіб. Площа відкритої водної поверхні залишається значно меншою, ніж у довоєнний період, а водні ділянки мають фрагментований характер. Отримані спектральні характеристики поверхні підтверджують зміну природних умов території та трансформацію гідрологічних і ґрунтових процесів.

Наукова новизна роботи полягає у застосуванні методів аналізу супутникових знімків для оцінки довготривалих екологічних наслідків руйнування великої гідротехнічної споруди. Проведений просторово-часовий аналіз дав змогу виявити масштаби трансформації природних комплексів та зафіксувати зміну структури ландшафту на території колишнього водосховища.

Отримані результати можуть бути використані у дослідженнях з екології, географії та дистанційного зондування Землі, а також у навчальних та науково-дослідницьких проектах. Методика аналізу супутникових даних рекомен-

дована для застосування в освітніх програмах, зокрема у STEM/STEAM-проектах та дослідницькій діяльності учнів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на детальніше вивчення змін рослинного покриву та динаміки трансформації донних відкладень на території колишнього водосховища, а також на довгостроковий моніторинг формування нових природних комплексів. Важливим напрямом є поєднання супутникових спостережень із наземними екологічними та гідрологічними дослідженнями для більш повного оцінювання трансформації природного середовища регіону.

Список використаних джерел

1. Шевчук С. А., Вишневецький В. І., Шевченко І. А., Коziцький О. М. Дослідження водних об'єктів України з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 2. С. 146–156.
2. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine / O. Shumilova et al. *Science*. 2025. Vol. 387. Pp. 1181–1186. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>.
3. Аналіз гідрологічної ситуації у Дніпровсько-Бузькій гирловій області внаслідок руйнування

- греблі Каховської ГЕС / Н. І. Магась та ін. *Екологічні науки*. 2023. № 4 (49). С. 15–25.
DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.2>.
4. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences / V. Vyshnevskiy et al. *Water International*. 2023. Vol. 48 (5). Pp. 631–647.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>.
 5. Tomchenko O., Magas N., Yakovenko M., Stakhiv I. Comparative analysis of the shallowing of the Kakhovska reservoir based on the data of Rs (remote sensing). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Kyiv, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520147>.
 6. Trofymchuk O., Sheviakina N., Tomchenko O. Destruction of the Kakhovka reservoir as a result of hostilities: Dynamics of change and consequences for the environment. *Proceedings of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023*. Vienna, 2023. Pp. 87–94.
DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2023V/3.2/s12.11>.
 7. Катастрофа Каховського водосховища: свідчать супутникові знімки / за заг. ред. М. Попова. Київ : Українська картографічна група, 2024. 92 с.
 8. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81 (1). Pp. 275–288.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>.
 9. Shults R. A complex study of the Kakhovka reservoir changes after dam collapse. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2025. Vol. XLVIII-5/W3-2025. Pp. 117–123.
DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W3-2025-117-2025>.
 10. Ліщенко Л., Козлова А., Андреев А. Картування просторово-часових трансформацій ложа колишнього Каховського водосховища після руйнування греблі за супутниковими знімками Sentinel-2. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2025. Т. 12. № 4. С. 29–37.
DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>.
 11. Tavakkoliestahbanati A., Milillo P., Kuai H., Giardina G. Pre-collapse spaceborne deformation monitoring of the Kakhovka dam, Ukraine, from 2017 to 2023. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. Article 145.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01284-z>.
 12. Шевчук Ю. С., Давидов О. В., Онойко Ю. Ю. Супутниковий моніторинг динаміки площі водної поверхні озера Солонець-Тузли, Причорноморська низовина, Україна (за 2024 рік). *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки*. 2025. Вип. 22. С. 99–109.
DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2025-22-10>.
 13. Higgins P. Eradicating Ecocide: Laws and Governance to Stop the Destruction of the Planet. London : Shephard-Walwyn, 2020. 224 p.
 14. Ecocide: legal definition. *Faith Voices for Ecocide Law* / ed. P. Thiel. TMG Stockholm, 2022. URL: https://www.faithforecodelaw.earth/wp-content/uploads/2022/11/Faith-Voices-for-Ecocide-Law_221107.pdf (дата звернення: 04.01.2026).
 15. Власова О. В., Шевченко А. М., Шевченко І. А., Козицький О. М. Моніторинг водних об'єктів і меліорованих земель, які зазнали впливу бойових дій, за супутниковими даними. *Меліорація і водне господарство*. 2023. № 2. С. 59–68. URL: <https://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/371> (дата звернення: 04.01.2026).
DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202302-371>.
 16. Бабійчук С. Педагогічна концепція «наукова освіта». *Освітній дискурс*. 2020. Вип. 23. С. 14–21.
DOI: [https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.23\(5\)-2](https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.23(5)-2).
 17. Робочий зошит з основ дистанційного зондування Землі. Частина 2. Аналіз космічних знімків у геоінформаційних системах / С. М. Бабійчук та ін. ; за ред. С. О. Довгого. 2-ге вид., доповн. і переробл. Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2024. 452 с.

References

1. Shevchuk, S. A., Vyshnevskiy, V. I., Shevchenko, I. A., & Kozytzkyi, O. M. (2019). Doslidzhennia vodnykh ob'ektiv Ukrainy z vykorystanniam danykh dystantsiinoho zonduvannia Zemli [Research of water objects of Ukraine using the data of remote sensing of the Earth]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo — Land reclamation and water management*, 2, 146–156 [in Ukrainian].
2. Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S. et al. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387, 1181–1186.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>.
3. Magas, N., Khorenzhenko, H., Zamuruieva, K., Beshevets, Yu., Ryndiuk, S., Barkar, V. et al. (2023). Analiz hidrolohichnoi sytuatsii u Dniprovsko-Buzkii hyrlovii oblasti vnaslidok ruinuвання hrebli Kakhovskoi HES [Analysis of the hydrological situation in the Dniro-Bug estuary region following the destruction of the Kakhovka hydroelectric power station dam]. *Ekolohichni nauky — Ecological Sciences*, 4 (49), 15–25.
DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.2> [in Ukrainian].

4. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Yu., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48 (5), 631–647.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>.
5. Tomchenko, O., Magas, N., Yakovenko, M., & Stakhiv, I. (2023). Comparative analysis of the shallowing of the Kakhovska reservoir based on the data of Rs (remote sensing). *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Kyiv.
DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520147>.
6. Trofymchuk, O., Sheviakina, N., & Tomchenko, O. (2023). Destruction of the Kakhovka reservoir as a result of hostilities: Dynamics of change and consequences for the environment. *Proceedings of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023*. Vienna, 87–94.
DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2023V/3.2/s12.11>.
7. Popov, M. O. (Ed.) (2024). *Katastrofa Kakhovskoho vodoskhovyshcha: Svidchat suputnikovyi znimky [Catastrophe of the Kakhovka reservoir: Satellite images testify]*. Kyiv : Ukrainska kartohrafichna hrupa [in Ukrainian].
8. 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.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>.
9. Shults, R. (2025). A complex study of the Kakhovka reservoir changes after dam collapse. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-5/W3-2025, 117–123.
DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W3-2025-117-2025>.
10. Lishchenko, L., Kozlova, A., & Andreiev, A. (2025). Kartuvannia prostorovo-chasovykh transformatsii lozha kolyshnoho Kakhovskoho vodoskhovyshcha pislia ruinuвання hrebli za suputnykovymi znimkami Sentinel-2 [Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannya Zemli — Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12 (4), 29–37.
DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296> [in Ukrainian].
11. Tavakkoliestahbanati, A., Milillo, P., Kuai, H., & Giardina, G. (2024). Pre-collapse spaceborne deformation monitoring of the Kakhovka dam, Ukraine, from 2017 to 2023. *Communications Earth & Environment*, 5, 145.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01284-z>.
12. Shevchuk, Yu. S., Davydov, O. V. & Onenko, Yu. Yu. (2025). Suputnykovyi monitorynh dynamiky ploshchi vodnoi poverkhni ozera Solonets-Tuzly, Prychornomorska nyzovyna, Ukraina (za 2024 rik) [Satellite monitoring of the dynamics of the water surface area of Lake Solonets-Tuzly, Black Sea lowland, Ukraine (for the year 2024)]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriya: Heohrafichni nauky — Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Geographical Sciences*, 22, 99–109.
DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2025-22-10> [in Ukrainian].
13. Higgins, P. (2020). *Eradicating Ecocide: Laws and Governance to Stop the Destruction of the Planet*. London : Shephard-Walwyn.
14. Thiel, P. (Ed.). (2022). *Ecocide: legal definition*. Faith Voices for Ecocide Law. TMG Stockholm. Retrieved from https://www.faithforecodelaw.earth/wp-content/uploads/2022/11/Faith-Voices-for-Ecocide-Law_221107.pdf.
15. Vlasova, O. V., Shevchenko, A. M., Shevchenko, I. A., & Kozitskyi, O. M. (2023). Monitorynh vodnykh obektiv i meliorovanykh zemel, yaki zaznaly vplyvu boiovykh dii, za suputnykovymi danymi [Monitoring of water bodies and reclaimed lands affected by warfare using satellite data]. *Melioratsiia i vodne hospodarstvo — Land Reclamation and Water Management*, 2, 59–68. Retrieved from <https://mivg.iw-pim.com.ua/index.php/mivg/article/view/371>.
DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202302-371> [in Ukrainian].
16. Babiichuk, S. (2020). Pedahohichna kontseptsiiia “naukova osvita” [Pedagogical concept of “science education”]. *Osvitnii dyskurs — Educational discourse*, 23, 14–21.
DOI: [https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.23\(5\)-2](https://doi.org/10.33930/ed.2019.5007.23(5)-2) [in Ukrainian].
17. Babiichuk, S. M., Tomchenko, O. V., Kobliuk, N. S., Kuchma, T. L., Yurkiv, L. Ya., Hordienko, O. V. et al. (2024). *Robochyi zoshyt z osnov dystantsiinoho zonduvannya Zemli. Chastyna 2. Analiz kosmichnykh znimkiv u heoinformatsiinykh systemakh [Workbook on fundamentals of remote sensing of the Earth. Part 2. Analysis of satellite images in GIS]*. S. O. Dovhyi (Ed.). (2nd ed., rev.). Kyiv : Natsionalnyi tsentr “Mala akademiia nauk Ukrainy” [in Ukrainian].

S. M. Babiichuk,
M. S. Shonenko,
O. V. Tomchenko

ANALYSIS OF THE ECOLOGICAL DISASTER AT THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER STATION USING EARTH REMOTE SENSING METHODS: SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL ASPECT

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the ecological consequences of the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Station on June 6, 2023, using Earth remote sensing (ERS) data. Based on multispectral Sentinel-2 satellite imagery and vegetation and water spectral indices, the dynamics of changes in water surface area and newly formed terrestrial zones were analyzed for the period from May 2023 to September 2025. The stages of landscape transformation were identified, the formation of a new hydrological regime was characterized, and long-term ecological consequences were determined. Particular attention is paid to interpreting the event through the lens of contemporary ecocide theory. The results confirm the scale and duration of the ecological disaster and demonstrate the high effectiveness of ERS as a tool for monitoring large-scale anthropogenic environmental events. Within the framework of this study, special emphasis is placed on the integration of technological and cognitive aspects of scientific activity. The use of information technologies, geographic information systems, and remote sensing methods creates a unified research environment in which all stages of analysis — from data acquisition to the construction of cartographic and statistical models — are implemented within a single system. This approach ensures research compactness, manifested in reduced time and resource expenditures without compromising the scientific completeness of the results. At the same time, the development of research competence occurs through addressing a real scientific problem under conditions of limited access to the research site. The territory of the former Kakhovka Reservoir is partially located near active combat zones, which makes systematic field observations virtually impossible. Under such circumstances, remote analysis becomes not a supplementary, but a primary instrument of scientific investigation, enabling the acquisition of objective spatiotemporal information and the development of skills for interpreting complex geoeological processes. The practical significance of research focused on studying natural changes within one's own country is particularly noteworthy. Applying the principles of local studies in educational research activities enhances motivation for analysis, as the research object holds both social and ecological importance.

Keywords: Kakhovka Hydroelectric Power Station, Earth Remote Sensing, research skills, ecocide.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Бабійчук Світлана Миколаївна — д. пед. наук, професорка кафедри ЮНЕСКО, Український державний університет імені Михайла Драгоманова; завідувачка лабораторії «ГІС та ДЗЗ», НЦ «Мала академія наук України», м. Київ, Україна, lana@man.gov.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6556-9351>

Шоненко Марина Сергіївна — здобувач другого (магістерського) рівня освіти спеціальності 011 Освітні, педагогічні науки, Український державний університет імені Михайла Драгоманова, м. Київ, Україна, m.shonenko@man.gov.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9117-859X>

Томченко Ольга Володимирівна — канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу геопросторового моделювання в аерокосмічних дослідженнях, Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», tomch@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Babiichuk S. M. — D. Sc. in Pedagogy, Professor at the UNESCO Chair, Mykhailo Drahomanov Ukrainian State University; Head of the GIS and Remote Sensing Laboratory, NC "Junior Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine, lana@man.gov.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6556-9351>

Shonenko M. S. — candidate for a second (master's) degree in specialty 011 Educational and Pedagogical Sciences, Mykhailo Drahomanov Ukrainian State University, Kyiv, Ukraine, m.shonenko@man.gov.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-9117-859X>

Tomchenko O. V. — PhD in Engineering, Senior Researcher of the Department of Geospatial Modeling in Aerospace Research, State institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine", tomch@i.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099>

Рукопис надійшов до редакції / Received 26.01.2026

Рукопис прийнято до друку / Accepted 27.03.2026

Опубліковано / Available online 30.04.2026



Licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License