

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07>

УДК (UDC): 504.4.064:528.8

**В. О. МАКСИМЕНКО**

аспірант кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи  
e-mail: [maksymenko.vladyslav.o@gmail.com](mailto:maksymenko.vladyslav.o@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна

**В. Л. БЕЗСОННИЙ**, д-р. техн. наук, доц.,

професор кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій

e-mail: [vitalii.bezsonnyi@hneu.net](mailto:vitalii.bezsonnyi@hneu.net) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця,  
пр. Науки, 9а, Харків, 61165, Україна

**ДИСТАНЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ  
КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ  
ЗА ДАНИМИ SENTINEL-2**

**Мета.** Виявити та охарактеризувати просторово-часову трансформацію Каховського водосховища та прилеглих ландшафтів після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року за даними дистанційного зондування Землі шляхом індикації змін відкритої водної поверхні, просторової структури осушеного ложа водосховища та ознак ранньосукцесійного заростання оголених донних відкладів у післяаварійний період.

**Методи.** Індексний, порівняльно-часовий, візуально-дешифрувальний та частотний аналізи даних дистанційного зондування Землі.

**Результати.** Інформаційною основою дослідження – малохмарні сцени Sentinel-2 MSI рівня L2A за 2023 рік, отримані через Copernicus Data Space Ecosystem. Для індикації відкритої водної поверхні розраховано NDWI, а для виявлення фотосинтетично активного рослинного покриву – NDVI. Просторово-часові зміни оцінювали шляхом зіставлення ключових часових зрізів до та після руйнування греблі Каховської ГЕС, візуального дешифрування зображень у природних кольорах і аналізу частотного розподілу значень пікселів. За даними NDWI встановлено різке скорочення та фрагментацію відкритої водної поверхні Каховського водосховища протягом перших тижнів після руйнування греблі. Суцільне водне дзеркало, характерне для передаварійного стану водосховища, трансформувалося у вузьке русло Дніпра, систему залишкових водойм і значні площі оголених донних відкладів. Аналіз NDVI за осінній період 2023 року виявив появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Додатні значення NDVI та зміщення частотного розподілу пікселів у бік вегетованих поверхонь свідчать про швидке піонерне заростання ділянок, які до руйнування греблі перебували під водою.

**Висновки.** Руйнування Каховської ГЕС спричинило швидку перебудову гідроекосистеми нижнього Дніпра з переходом від штучного водного об'єкта до складної мозаїки руслових, болотних, лучних і оголених субстратних ділянок. Дані Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI дають змогу об'єктивно документувати такі зміни навіть за відсутності безпечного доступу до території дослідження. Виявлене ранньосукцесійне заростання осушеного ложа водосховища має неоднозначне екологічне значення: воно може свідчити про часткове відновлення заплавлених біотопів, але водночас супроводжується ризиками вторинного забруднення, пилового перенесення донних відкладів, пожежної небезпеки та неконтрольованої трансформації ландшафтів. Подальший моніторинг території потребує поєднання оптичних і радарних супутникових даних, часових рядів NDWI/NDVI та, за можливості, наземної валідації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Каховське водосховище, Sentinel-2, дистанційне зондування Землі, NDWI, NDVI, екосистемна трансформація

**Як цитувати:** Максименко В. О., Безсонний В. Л. Дистанційне оцінювання просторово-часової трансформації Каховського водосховища після руйнування греблі за даними Sentinel-2. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 79–91. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07>

**In cites:** Maksymenko, V. O., & Bezsonnyi, V. L. (2026). Remote sensing assessment of the spatio-temporal transformation of the Kakhovka reservoir after dam destruction using Sentinel-2 data. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 79–91. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-07> (in Ukrainian)

© Максименко В. О., Безсонний В. Л., 2026



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0

### Вступ

Річкові та водосховищні геосистеми належать до найбільш динамічних природно-антропогенних комплексів, стан яких визначається взаємодією гідрологічного режиму, рельєфу, донних відкладів, рослинного покриву, кліматичних чинників і господарського використання території. Будівництво великих гідротехнічних споруд істотно змінює природний режим річкового стоку, трансформує заплавні ландшафти, змінює умови акумуляції наносів, функціонування водних і прибережно-водних екосистем, а також характер взаємодії поверхневих і підземних вод [1, 2].

Одним із найбільш трансформованих великих річкових басейнів Європи є басейн Дніпра. Упродовж XX століття його русло було зарегульоване каскадом водосховищ, що суттєво змінило природний гідрологічний режим річки, структуру заплавних ландшафтів і характер природокористування в прибережних регіонах [3]. Каховське водосховище, створене у 1956 році в нижній частині Дніпра, було одним із ключових елементів цього каскаду. Воно забезпечувало регулювання стоку, зрошення, водопостачання, енергетичні та господарські функції, однак водночас спричинило затоплення значних площ природних заплав, сільськогосподарських земель і територій історичного Великого Лугу [4].

Руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року стало однією з найбільших гідроекологічних катастроф у сучасній історії України. Подія призвела до різкого спрацювання водосховища, затоплення територій нижче за течією, оголення великих площ донних відкладів, порушення водопостачання, втрати водних і прибережно-водних біотопів, а також формування нових довгострокових екологічних загроз [5-8]. Наслідки цієї події охоплюють не лише гідрологічний, а й геоморфологічний, ґрунтовий, біотичний, санітарно-екологічний та соціально-економічний виміри.

Особливістю дослідження наслідків руйнування Каховської ГЕС є обмежена можливість проведення традиційних польових спостережень. Значна частина території колишнього водосховища та прилеглих ландшафтів перебуває в зоні впливу бойових дій, мінної небезпеки та обмеженого доступу. За таких умов дистанційне зондування Землі набуває особливого значення як безпечний, оперативний і відтворюваний інструмент екологічного моніторингу. Супутникові дані дають

змогу оцінювати просторовий масштаб змін, порівнювати стан території у різні часові періоди, фіксувати динаміку відкритої водної поверхні, оголених субстратів і рослинного покриву без безпосереднього перебування дослідника в небезпечній зоні [9-11].

Серед відкритих супутникових місій особливе значення для моніторингу таких процесів мають дані Sentinel-2. Мультиспектральний сенсор MSI забезпечує просторову роздільність до 10 м у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах, що є достатнім для аналізу великих водних об'єктів, прибережних територій, рослинного покриву та змін земної поверхні. Відкритий доступ до архіву Sentinel-2 через Copernicus Data Space Ecosystem дає можливість здійснювати ретроспективний аналіз території до та після катастрофічної події, а також використовувати стандартизовані індексні методи для інтерпретації змін [11-13].

Для оцінювання трансформації водних і рослинних покривів найбільш поширеними є нормалізовані різниці спектральні індекси. Індекс NDWI застосовується для виявлення відкритих водних поверхонь і розмежування води та суходолу за рахунок контрасту між відбиттям у зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах [14]. У випадках складної межі між водою, мокрим мулом і забудованими поверхнями можуть використовуватися також модифіковані або альтернативні індекси, зокрема MNDWI та AWEI [15-17]. Індекс NDVI використовується для оцінювання наявності та інтенсивності фотосинтетично активної рослинності, що робить його придатним для виявлення рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища [18].

Попри значну суспільну та наукову увагу до Каховської катастрофи, питання просторово-часової індикації трансформації ложа водосховища на основі відкритих супутникових даних залишається актуальним. Останні дослідження підтверджують значний потенціал Sentinel-2, NDWI та пов'язаних водних масок для аналізу наслідків руйнування Каховської греблі [21-26]. Водночас важливим є застосування доступної та прозорої методики, яка може бути відтворена для моніторингу інших воєнно-техногенних або гідроекологічних катастроф.

Метою є виявлення та характеристика просторово-часової трансформації Каховсь-

кого водосховища та прилеглих ландшафтів після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року за даними Sentinel-2 L2A шляхом застосування спектральних індексів NDWI і NDVI для індикації змін відкритої водної поверхні, оголених донних відкладів і рослинного покриву.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

- відібрати придатні для аналізу сцени Sentinel-2 L2A за ключові часові періоди до та після руйнування греблі;

### Об'єкт та методи дослідження

Об'єктом дослідження є територія Каховського водосховища та прилеглі ландшафти нижньої течії Дніпра, що зазнали різкої трансформації після руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року. До зони аналізу включено акваторію колишнього водосховища, основне русло Дніпра, залишкові водойми, оголені донні відклади та прибережні ділянки, на яких після спрацювання водосховища відбувалися зміни поверхневого покриву.

Предметом дослідження є просторово-часові зміни спектральних характеристик земної поверхні, що відображають перехід території від стану штучного водного об'єкта до мозаїки руслових, залишково-водних, оголених і вегетованих ділянок. Розглянуто дві групи змін: скорочення та фрагментація відкритої водної поверхні після руйнування греблі й формування рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища в післяаварійний період.

Для аналізу використано мультиспектральні супутникові знімки Sentinel-2 MSI рівня обробки L2A, отримані через платформу Copernicus Data Space Ecosystem. Дані рівня L2A містять атмосферно скориговані значення поверхневого відбиття, що забезпечує коректніше порівняння сцен різних дат порівняно з даними рівня L1C. Для розрахунку спектральних індексів використано канали Sentinel-2 із просторовою роздільністю 10 м: зелений канал B3, червоний канал B4 та ближній інфрачервоний канал B8 [11-13].

Відбір супутникових сцен здійснювався за такими критеріями: мінімальна хмарність у межах території дослідження, відсутність значних хмарних тіней над колишньою акваторією водосховища, наявність повного покриття зони аналізу та відповідність ключовим

- розрахувати NDWI для індикації відкритої водної поверхні та оцінити просторові зміни акваторії Каховського водосховища;

- розрахувати NDVI для виявлення рослинного покриву на осушених ділянках ложа водосховища;

- проаналізувати частотний розподіл значень пікселів NDWI і NDVI для підтвердження виявлених змін;

- інтерпретувати отримані результати у контексті геоекологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС.

етапам розвитку події. Для порівняльного аналізу використано три часові зрізи: 25 травня 2023 року - передаварійний стан; 25 червня 2023 року - післяаварійний стан на 19-й день після руйнування греблі; 3 жовтня 2023 року – осінній стан території для індикації рослинного покриву на осушених ділянках.

Для індикації відкритої водної поверхні застосовано нормалізований різницевий індекс води NDWI, запропонований S. K. McFeeters [14]. Індекс розраховувався за формулою:

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{NIR}) / (\rho_{Green} + \rho_{NIR}),$$

де  $\rho_{Green}$  – поверхневе відбиття у зеленому каналі Sentinel-2 B3,

$\rho_{NIR}$  – поверхневе відбиття у ближньому інфрачервоному каналі Sentinel-2 B8.

Фізична основа використання NDWI полягає в тому, що відкриті водні поверхні зазвичай мають підвищене відбиття у зеленому діапазоні та низьке відбиття у ближньому інфрачервоному діапазоні. Унаслідок цього значення NDWI для води переважно є додатними, тоді як для ґрунтів, рослинності та штучних поверхонь вони здебільшого знижуються до нульових або від'ємних значень. У цьому дослідженні NDWI використовувався насамперед для просторової індикації відкритої водної поверхні та порівняння її конфігурації між ключовими часовими зрізами. Порогове значення  $NDWI > 0$  застосовувалося як орієнтовний критерій віднесення пікселів до водної поверхні.

Для виявлення рослинного покриву на осушеному ложі водосховища використано нормалізований різницевий індекс рослинності NDVI [18]. Індекс розраховувався за формулою:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}),$$

де  $\rho_{NIR}$  – поверхневе відбиття у ближньому інфрачервоному каналі Sentinel-2 B8,  $\rho_{Red}$  – поверхневе відбиття у червоному каналі Sentinel-2 B4.

NDVI використано як індикатор наявності фотосинтетично активної рослинності. Низькі та від'ємні значення індексу інтерпретувалися як водні поверхні, оголені ґрунти, донні відклади або штучні покриття. Додатні значення NDVI вказували на наявність рослинного покриву різної щільності. У дослідженні NDVI не використовувався для визначення видового складу рослинності, а лише для просторового виявлення ділянок із фотосинтетично активним покривом. Тому отримані результати інтерпретувалися як ознаки ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації, а не як безпосереднє встановлення конкретних рослинних угруповань.

Через відсутність повної векторної маски досліджуваної території, власних точних площинних розрахунків і незалежної польової валідації результати NDWI та NDVI інтерпретувалися як індикативні та не розглядаються як остаточна кількісна класифікація площ води, рослинності або оголених субстратів. Основний акцент зроблено на порівнянні просторової конфігурації поверхневих класів між певними часовими зрізами.

Додатково для інтерпретації змін застосовано аналіз частотного розподілу значень пікселів NDWI і NDVI. Гістограми розподілу дозволяли оцінити зміну домінуючих спектральних характеристик поверхні між різними датами. Для передаварійного стану очікуваним є переважання значень, характерних для відкритої водної поверхні. Для післяварійного стану

– збільшення частки пікселів, що відповідають оголеному субстрату, залишковим водоймам і русловим ділянкам. Для осіннього періоду – зміщення розподілу NDVI у бік додатних значень, що свідчить про збільшення частки вегетованих поверхонь.

Інтерпретація результатів виконувалася шляхом поєднання індексного аналізу, візуального дешифрування зображень Sentinel-2 у природних кольорах та аналізу просторового розташування змінених ділянок. Результати NDWI використовувалися для оцінки втрати просторової цілісності відкритої водної поверхні та формування залишкової гідрографічної структури. Результати NDVI використовувалися для виявлення просторових проявів рослинного покриву на оголених донних відкладах.

Під час інтерпретації результатів враховувалися методичні обмеження дослідження. По-перше, використання оптичних супутникових даних залежить від хмарності, атмосферних умов і наявності хмарних тіней.

По-друге, просторової роздільності Sentinel-2 у 10 м достатньо для аналізу великомасштабних змін водосховища, але вона обмежує можливості детального дешифрування вузьких русел, дрібних залишкових водойм і мозаїчних рослинних угруповань.

По-третє, порогове виділення води за NDWI може давати похибки на ділянках мілководдя, мокрому мулу, турбідної води та змішаних пікселів у прибережній зоні.

По-четверте, NDVI є індикатором фотосинтетично активної рослинності, але не дозволяє самостійно визначити видовий склад, вік або фітоценотичну структуру рослинного покриву.

### *Результати дослідження*

**Передаварійний стан Каховського водосховища за даними Sentinel-2 від 25.05.2023.** Аналіз сцени Sentinel-2 L2A від 25 травня 2023 року засвідчив, що напередодні руйнування греблі Каховської ГЕС водосховище зберігало просторову цілісність як великий штучний водний об'єкт. У візуалізації природних кольорів водна поверхня простежувалася як суцільне аквально дзеркало, що займало основну частину простору між береговими лініями та мало чітко виражену видовжену форму вздовж долини Дніпра.

Розрахунок NDWI для передаварійного знімка показав переважання додатних

значень індексу в межах акваторії водосховища. Це відповідає спектральним властивостям відкритої водної поверхні, яка характеризується відносно вищим відбиттям у зеленому каналі та низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному діапазоні. За критерієм  $NDWI > 0$  основна частина колишньої акваторії класифікувалася як водна поверхня.

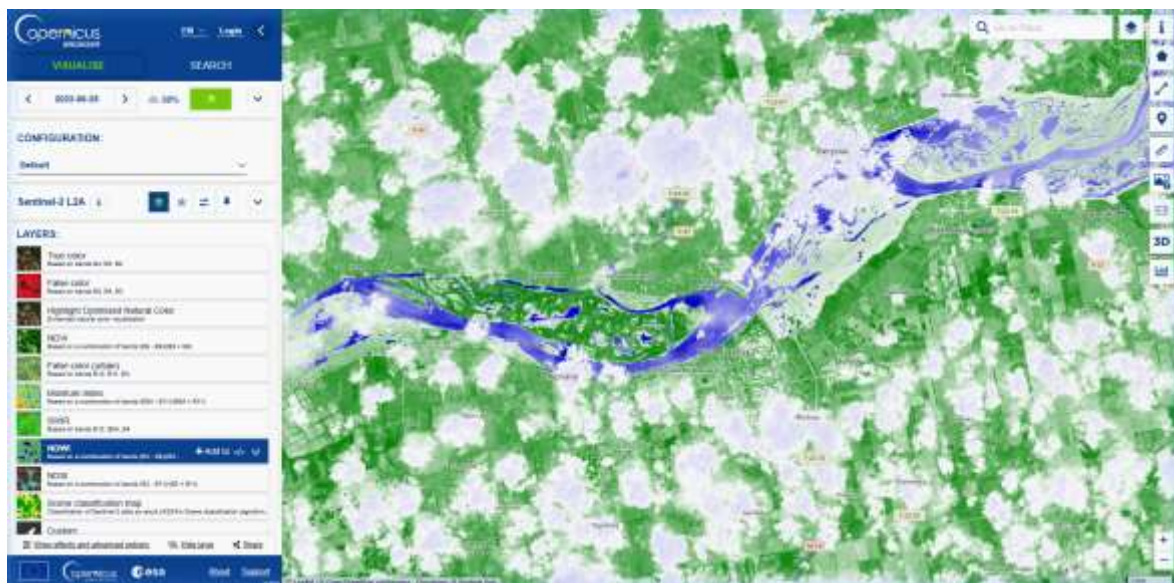
Прибережні ділянки та прилеглі агроландшафти мали інші спектральні характеристики. Вони відрізнялися від акваторії нижчими або від'ємними значеннями NDWI та додатними значеннями NDVI на ділянках із рослинним покривом. У межах прибережної

смуги простежувалися локальні ділянки прибережно-водної рослинності, а на прилеглих територіях – мозаїка сільськогосподарських угідь, населених пунктів, лісосмуг і відкритих ґрунтів.

Таким чином, сцена від 25.05.2023 була використана як базовий часовий зріз, що характеризує стан водосховища до катастрофічного спрацювання. Вона дала змогу зафіксувати вихідне співвідношення основних типів поверхні: домінування відкритої водної поверхні в межах акваторії та наявність рослинного й аграрного покриття переважно за її межами.

**Післяаварійна трансформація водної поверхні за даними Sentinel-2 від 25.06.2023.** Сцена Sentinel-2 L2A від 25 червня 2023 року відображає стан території на 19-й день після руйнування греблі. Порівняння цього знімка з передаварійною сценою показало різку зміну просторової організації водної поверхні. Суцільне водне дзеркало, яке фіксувалося в травні 2023 року, до кінця червня було замінене мозаїкою залишкових водних ділянок, оголених донних відкладів і руслових форм (рис. 1).

NDWI-карта за 25.06.2023 виявила суттєве скорочення площі пікселів із додатними



**Рис. 1** – Візуалізація індексу NDWI зони Каховського водосховища після руйнування греблі, Sentinel-2 L2A, 25.06.2023: синій колір - відкрита водна поверхня, буро-сірі тони - оголені донні відклади

**Fig. 1** – NDWI visualization of the Kakhovka Reservoir area after dam destruction, Sentinel-2 L2A, 25 June 2023: blue colour indicates open water surface, brown-grey tones indicate exposed bottom sediments

значеннями індексу. У межах колишньої акваторії водосховища додатні значення NDWI зберігалися переважно в межах активного русла Дніпра, залишкових водойм, понижених ділянок рельєфу та окремих фрагментів затопленої або перезволоженої поверхні. Натомість значна частина території, яка на травневому знімку класифікувалася як вода, на червневому знімку відповідала від'ємним або близьким до нуля значенням NDWI, що свідчить про оголення донних відкладів.

У просторовій структурі післяаварійного стану можна виділити кілька основних типів поверхні. Активне русло Дніпра після спрацювання водосховища зосередилося у відносно вузькій смузі, яка простежується

вздовж колишнього ложа водосховища. Окремі додатні NDWI-ділянки зафіксовано у пониженнях рельєфу колишнього дна водосховища, що відповідають залишковим водоймам, старичним формам, тальвегам колишніх приток і локальним депресіям.

Найбільшу площу в межах колишньої акваторії становили ділянки з від'ємними або близькими до нуля значеннями NDWI. У візуалізації природних кольорів вони проявлялися як світло-бурі, сірі або темно-сірі поверхні. Такі спектральні ознаки відповідають оголеним мулистим, піщаним і глинистим донним відкладами, що залишилися після швидкого відходу води. Частина території мала проміжні спектральні характеристики, що може

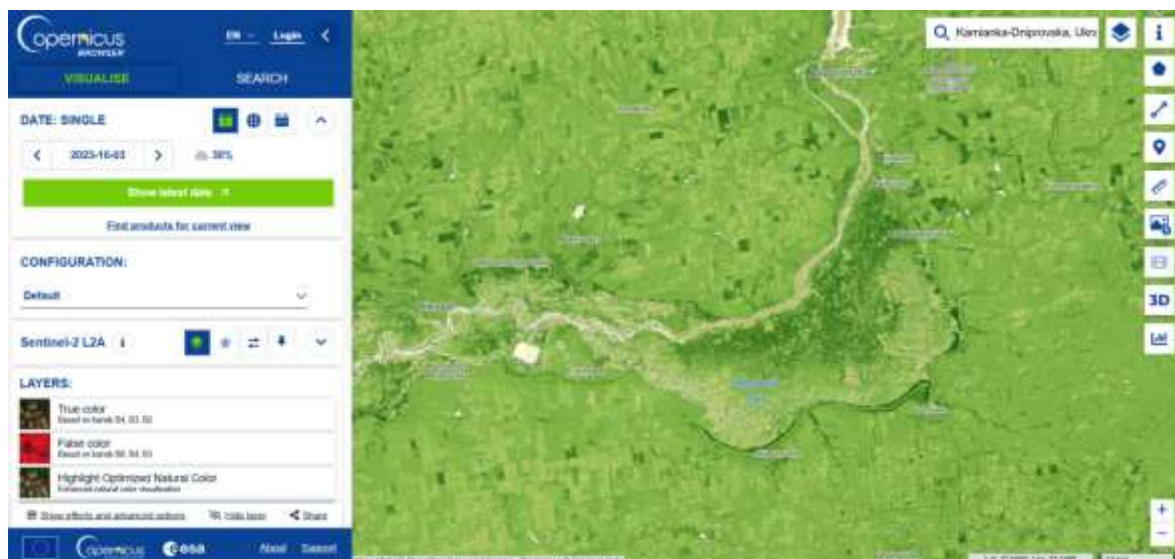
відповідати мокрому мулу, мілководдю, тимчасово перезволоженом поверхням або змішаним пікселям на межі води й оголеного субстрату.

Порівняння сцен 25.05.2023 та 25.06.2023 засвідчило, що основна просторова зміна полягала не лише у зменшенні відкритої водної поверхні, а й у зміні самого типу функціонування території. Водосховище як суцільний штучний водний об'єкт трансформувалося у просторово неоднорідну систему, де поєдналися русловий стік, залишкові водойми, оголені донні відклади та перезволожені ділянки.

**Формування рослинного покриву на осушеному ложі водосховища восени 2023 року.** Аналіз осінньої сцени Sentinel-2 L2A за 3 жовтня 2023 року показав подальшу зміну спектральних характеристик колишньої акваторії. Якщо в червні значна частина осушеного ложа водосховища відповідала оголеним донним відкладами з низькими значеннями NDVI, то восени на багатьох ділянках було зафіксовано додатні значення NDVI, характерні для фотосинтетично активної рослинності (рис. 2).

Просторовий розподіл NDVI свідчить, що рослинний покрив формувався нерівномірно. Найбільш виразні додатні значення індексу спостерігалися на ділянках із достатнім залишковим зволоженням, поблизу руслових і залишково-водних форм, а також у межах понижених частин колишнього дна. Менш виражені значення NDVI були характерні для сухіших або менш стабільних субстратів, де процес заростання відбувався повільніше або мав фрагментарний характер.

Фіксація додатних значень NDVI на території, які у травні 2023 року відповідали відкритій водній поверхні, вказує на формування фотосинтетично активного рослинного покриву на частині колишньої акваторії. Водночас ці результати не слід ототожнювати з визначенням видового складу або фітоценотичної структури рослинності. За даними одного оптичного індексу неможливо достовірно розмежувати окремі види, рослинні угруповання чи стадії сукцесії, тому зафіксовані зміни доцільно інтерпретувати як індикативні ознаки ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації осушених донних відкладів.



**Рис. 2** – Візуалізація індексу NDVI осушеного ложа Каховського водосховища, Sentinel-2 L2A, 03.10.2023: зелені тони - ділянки з фотосинтетично активною рослинністю, буро-сірі тони – оголені або слабо вегетовані субстрати

**Fig. 2** – NDVI visualization of the drained Kakhovka Reservoir bed, Sentinel-2 L2A, 3 October 2023: green tones indicate photosynthetically active vegetation, brown-grey tones indicate exposed or sparsely vegetated substrates

У просторовому відношенні вегетовані ділянки утворювали мозаїку з відкритими субстратами, залишковими водоймами та русловими формами. Така мозаїчність

відображає неоднорідність умов після спрацювання водосховища: різний гранулометричний склад донних відкладів, відмінності у зволоженні, мікрорельєфі, близькості до

джерел насінневого матеріалу та тривалості перебування поверхні без водного покриву.

#### Частотний аналіз значень NDVI.

Для додаткової інтерпретації змін поверхневого покриву було проаналізовано частотний розподіл значень NDVI у вибраному вікні території дослідження. Отримана гістограма для жовтневої сцени демонструє зміщення значної частини пікселів у додатний діапазон значень NDVI. Це узгоджується з появою поверхонь із фотосинтетично

активним рослинним покривом порівняно з післяварійним літнім станом (рис. 3).

Наявність пікселів із низькими або від'ємними значеннями NDVI зберігається, що відображає присутність залишкових водойм, відкритих донних відкладів, перезволожених ділянок і слабо вегетованих поверхонь. Водночас збільшення частки додатних значень NDVI вказує на те, що рослинний покрив став одним із помітних типів поверхні на осушених ділянках колишньої акваторії.



Рис. 3 – Частотний розподіл значень NDVI у вибраному вікні території дослідження, Sentinel-2 L2A, жовтень 2023 року: вісь X – значення індексу NDVI, вісь Y – частота / кількість пікселів

Fig. 3 – Frequency distribution of NDVI values within the selected study window, Sentinel-2 L2A, October 2023: X-axis indicates NDVI values, Y-axis indicates frequency / number of pixels

Гістограмний аналіз доповнює візуальне дешифрування NDVI-карт, оскільки дозволяє перейти від якісного опису «позеленіння» території до інтерпретації спектрального розподілу. Зміщення розподілу значень NDVI у додатний діапазон підтверджує, що зміни, зафіксовані на зображенні, не є лише локальним ефектом, а відображають помітну перебудову поверхневого покриву в межах досліджуваної території.

**Узагальнення результатів дистанційного аналізу.** Узагальнення результатів NDWI-, NDVI-аналізу та візуального дешифрування Sentinel-2 свідчить про послідовну просторово-часову трансформацію території Каховського водосховища у 2023 році. Передавній стан характеризувався домінуванням суцільної відкритої водної поверхні. Після руйнування греблі спостерігалось різке

скорочення та фрагментація водного дзеркала, формування залишкового русла Дніпра, локальних водойм і великих площ оголених донних відкладів. В осінній період частина осушеного ложа водосховища набула додатних значень NDVI, що вказує на появу фотосинтетично активного рослинного покриву.

Отримані результати мають індикативний характер і демонструють можливості відкритих даних Sentinel-2 для оперативного геоecологічного моніторингу територій, недоступних для безпечних польових досліджень.

У сукупності результати NDWI, NDVI та гістограмного аналізу підтверджують, що після руйнування греблі відбулася не лише гідрологічна зміна, пов'язана зі зникненням значної частини відкритої водної поверхні, а й ландшафтна перебудова території.

#### Обговорення

Отримані результати свідчать про швидку та просторово виразну трансформацію

Каховського водосховища після руйнування греблі Каховської ГЕС. Індексний аналіз

Sentinel-2 показав послідовну зміну спектрального образу території: від домінування відкритої водної поверхні у передаварійний період до фрагментації водного дзеркала, оголення донних відкладів і подальшої появи рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Така динаміка відображає не лише гідрологічну зміну, пов'язану зі спрацюванням водосховища, а й глибшу ландшафтну перебутову території [5-9].

З геоекологічної точки зору руйнування Каховської ГЕС призвело до різкої зміни функціонування нижньодніпровської геосистеми. Територія, яка протягом десятиліть існувала як велике штучне водосховище, у короткий часовий проміжок почала набувати ознак складної руслово-заплавної системи. На місці колишнього суцільного водного дзеркала сформувалася мозаїка активного русла Дніпра, залишкових водойм, перезволожених ділянок, відкритих донних відкладів і ділянок із рослинним покривом. Саме така мозаїчність є однією з головних ознак післяаварійного стану території.

Використання NDWI дало змогу простежити просторову фрагментацію відкритої водної поверхні. У передаварійний період водосховище мало цілісну просторову структуру, тоді як після руйнування греблі додатні значення NDWI зберігалися переважно в межах руслових і залишково-водних ділянок. Це вказує на перехід від режиму штучного водосховища до значно складнішої просторової конфігурації, у якій водна поверхня вже не є доміантним і суцільним елементом. Водночас слід враховувати, що NDWI є чутливим до стану поверхні й може давати неоднозначні результати на межі води, мокрого мулу, мілководдя та перезволожених донних відкладів [14-17].

Аналіз NDVI за осінній період 2023 року свідчить про появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа водосховища. Це є важливим показником раннього етапу екологічної трансформації території. Поява додатних значень NDVI на ділянках, які до руйнування греблі перебували під водою, вказує на швидку рослинну колонізацію оголених донних відкладів. Водночас NDVI не дозволяє визначити видовий склад рослинності, її фітоценотичну структуру або стабільність сформованих угруповань [18]. Тому коректніше говорити не про повністю сформовану сукцесію, а про ранньосукцесійне заростання або піонерну рослинну колонізацію осушеного субстрату.

Імовірними чинниками швидкої появи рослинного покриву є поєднання кількох умов. По-перше, донні відклади водосховища протягом тривалого часу акумулювали органічну речовину, тонкодисперсний матеріал і поживні елементи, що могло створити сприятливий субстрат для проростання рослин. По-друге, після відходу води частина ложа водосховища зберігала підвищене зволоження, особливо у понижених ділянках, поблизу залишкових водойм і вздовж руслових форм. По-третє, джерелами насінневого матеріалу могли бути прибережні рослинні угруповання, заплавні ділянки, залишки прибережно-водної рослинності та прилеглі агроландшафти.

Разом із тим екологічне значення такого заростання є неоднозначним. З одного боку, воно може свідчити про початок стихійного відновлення окремих заплавних або лучно-болотних біотопів, які історично були характерними для нижнього Дніпра до створення Каховського водосховища. З іншого боку, така трансформація не може оцінюватися однозначно позитивно. Оголені донні відклади можуть містити забруднювальні речовини, накопичені за десятиліття функціонування водосховища. Їх осушення, аерація, переміщення вітром або залучення до поверхневого стоку можуть створювати ризики вторинного забруднення [5, 8, 9].

Окремої уваги потребують залишкові водойми, які були зафіксовані за допомогою NDWI після спрацювання водосховища. Такі об'єкти можуть виконувати різні екологічні функції. Вони можуть бути тимчасовими осередками збереження водної біоти, джерелами вологи для прилеглих ділянок і локальними ядрами подальшої заплавної динаміки. Водночас у залишкових водоймах можливе погіршення якості води через застійні умови, підвищення температури, евтрофування, накопичення органічної речовини та контакт із забрудненими донними відкладами. Для оцінки цих процесів оптичних знімків Sentinel-2 недостатньо; потрібні додаткові дані про якість води, гідрохімічний склад, донні відклади та біоту [19].

Важливим результатом роботи є демонстрація придатності відкритих супутникових даних Sentinel-2 для оперативної індикації великих екологічних змін у зоні, недоступній для безпечних польових досліджень. Умови бойових дій, мінна небезпека та обмежений доступ до території роблять класичний наземний моніторинг фрагментарним або неможливим. У такій ситуації ДЗЗ стає не допоміжним,

а базовим джерелом просторової інформації. Sentinel-2 дозволяє порівнювати стан території у різні часові періоди, фіксувати основні напрями трансформації, виділяти водні, оголені та вегетовані ділянки, а також формувати основу для подальшого детальнішого аналізу [21-26]. До обмежень дослідження слід віднести те, що, по-перше, аналіз базується на окремих часових зрізах, а не на повному часовому ряді з високою частотою спостережень. Це обмежує можливість детального відтворення проміжних етапів спрацювання водосховища та подальшої динаміки заростання; по-друге, використання лише оптичних даних Sentinel-2 залежить від хмарності, атмосферних умов і освітлення; по-третє, просторової роздільності 10 м достатньо для загального аналізу великого водного об'єкта, але недостатньо для детальної оцінки вузьких русел, дрібних водойм, мозаїчних рослинних угруповань і локальних екотонів, по-четверте, відсутність власної польової валідації не дозволяє остаточно підтвердити видовий склад рослинності, стан донних відкладів і якість залишкових вод.

У подальших дослідженнях доцільно розширити часову базу аналізу шляхом вико-

ристання повного ряду Sentinel-2 за 2023-2025 роки. Це дозволить простежити сезонну та міжрічну динаміку рослинного покриву, стабільність залишкових водойм і можливе подальше формування заплавної біотопів. Для подолання обмежень оптичних даних доцільним буде залучити радарні знімки Sentinel-1, які можуть використовуватися незалежно від хмарності та освітлення. Перспективним є також поєднання NDWI, MNDWI, NDVI, індексів вологості, класифікації земного покриву та цифрових моделей рельєфу для точнішого розмежування води, мокрого мулу, сухих донних відкладів і рослинності.

Отримані результати мають індикативний характер, але дають змогу простежити основні напрями змін у межах колишньої акваторії Каховського водосховища. За даними Sentinel-2 встановлено скорочення відкритої водної поверхні, формування оголених ділянок ложа водосховища та появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушених територій. За умов обмеженого доступу до району дослідження такий підхід може бути використаний для подальшого спостереження за станом території.

### **Висновки**

За результатами аналізу мультиспектральних знімків Sentinel-2 L2A встановлено, що руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 року спричинило швидку просторову трансформацію Каховського водосховища та прилеглих ландшафтів. Перед аварійний стан території характеризувався домінуванням суцільної відкритої водної поверхні, тоді як після руйнування греблі водне дзеркало втратило просторову цілісність і трансформувалося у мозаїку активного русла Дніпра, залишкових водойм, перезвожених ділянок і оголених донних відкладів.

Індекс NDWI виявився ефективним інструментом для дистанційної індикації змін відкритої водної поверхні. Порівняння перед аварійної та після аварійної сцен Sentinel-2 засвідчило різке скорочення й фрагментацію водної поверхні в межах колишньої акваторії. Водночас результати NDWI слід інтерпретувати як індикативні, оскільки на ділянках мілководдя, мокрого мулу, перезвожених донних відкладів і змішаних пікселів можливі класифікаційні похибки.

Аналіз NDVI за осінній період 2023 року показав появу фотосинтетично активного рослинного покриву на частині осушеного ложа Каховського водосховища, що

свідчить про початок ранньосукцесійного заростання або піонерної рослинної колонізації донних відкладів, які до руйнування греблі перебували під водою, при цьому NDVI не дозволяє визначити видовий склад рослинності, тому отримані результати потребують подальшого уточнення за допомогою польових спостережень або даних вищої просторової роздільності.

Частотний аналіз значень NDVI підтвердив загальну тенденцію до зміни спектрального образу території в осінній період: поряд із залишковими водоймами, оголеними та перезвоженими субстратами з'явилися ділянки з додатними значеннями індексу, характерними для рослинного покриву. Це узгоджується з візуальним дешифруванням супутникових знімків і свідчить про формування нової мозаїчної структури поверхневого покриву в межах колишньої акваторії.

Після аварійна трансформація Каховського водосховища має неоднозначні екологічні наслідки. З одного боку, поява рослинного покриву на осушеному ложі може бути передумовою часткового стихійного відновлення заплавної, лучних і болотних біотопів нижнього Дніпра. З іншого боку, оголення донних відкладів, можливе вторинне забруднення,

пилове перенесення, погіршення стану залишкових водойм і пожежна небезпека створюють нові екологічні ризики, що потребують тривалого моніторингу.

Відкриті дані Sentinel-2 у поєднанні з індексами NDWI та NDVI є придатним інструментом для оперативної дистанційної індикації масштабних гідроекологічних змін,

особливо в умовах, коли польові дослідження неможливі або небезпечні через бойові дії. Для подальшого підвищення точності оцінок доцільно поєднувати оптичні дані Sentinel-2 із радарними знімками Sentinel-1, часовими рядами за 2023-2025 роки, цифровими моделями рельєфу, гідрохімічними даними та наземною валідацією.

### Конфлікт інтересів

Автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

**Внесок авторів.** Автори зробили рівний внесок в це дослідження.

### Декларація про використання ШІ

Автори використовували ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) виключно для мовного редагування, структурного впорядкування тексту. Весь науковий контент, матеріали та висновки створені авторами. Усі наукові положення, інтерпретації, результати та висновки критично перевірені авторами, які несуть повну відповідальність за зміст рукопису.

### Список використаної літератури

1. Poff N. L., Allan J. D., Bain M. B. et al. The natural flow regime. *BioScience*. 1997. Vol. 47, No. 11. P. 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
2. Tockner K., Stanford J. A. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*. 2002. Vol. 29, No. 3. P. 308-330. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
3. Афанасьев С. О. Проблеми і розвиток досліджень екологічного стану гідроекосистем України в аспекті імплементації директив ЄС в галузі довкілля. *Гідробіологічний журнал*. 2018. Т. 54, № 6. С. 3-17. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj\\_2018\\_54\\_6\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj_2018_54_6_3)
4. Осадчий В.І. Каховське водосховище після катастрофи: сучасний стан, виклики та стратегія відновлення (стендограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 16 квітня 2025 р.). *Вісник НАН України*. 2025. № 7. С. 62-68. <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.062>
5. United Nations Environment Programme. Rapid Environmental Assessment of Kakhovka Dam Breach, Ukraine, 2023. Nairobi: UNEP, 2023. URL: <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>
6. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., Khilchevskiy V., De Meester L., Stepanenko S., Trokhymenko G., Hernández-Agüero J. A., Gleick P. Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 578-586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
7. Spears B. M., Harpham Q., Brown E. et al. A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*. 2024. Vol. 8. P. 834-836. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>
8. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N. et al. 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>
9. Oreshchenko A. Analytical materials of the Ukrainian Hydrometeorological Institute on the explosion of the Kakhovka HPP by the Russian Federation and the desiccation of the Kakhovka Reservoir. Kyiv: Ukrainian Hydrometeorological Institute, 2024. 31 p. URL: <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf>
10. Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 736 p. [https://www.academia.edu/165199688/Lillesand\\_T\\_Kiefer\\_R\\_W\\_and\\_Chipman\\_J\\_2015\\_Remote\\_Sensing\\_and\\_Image\\_Interpretation\\_7th\\_ed\\_John\\_Wiley\\_and\\_Sons\\_New\\_York](https://www.academia.edu/165199688/Lillesand_T_Kiefer_R_W_and_Chipman_J_2015_Remote_Sensing_and_Image_Interpretation_7th_ed_John_Wiley_and_Sons_New_York)
11. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
12. Copernicus Data Space Ecosystem. Sentinel-2 Documentation. URL: <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
13. European Space Agency. Copernicus Browser guide. 2025. URL: [https://www.esa.int/Education/Copernicus\\_Browser\\_guide](https://www.esa.int/Education/Copernicus_Browser_guide)

14. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. Vol. 17, No. 7. P. 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, No. 14. P. 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
16. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2014. Vol. 140. P. 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
17. Huang C., Chen Y., Zhang S., Wu J. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*. 2018. Vol. 56, No. 2. P. 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
18. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
19. Sagan V., Peterson K. T., Maimaitijiang M. et al. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*. 2020. Vol. 205. Article 103187. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
20. Yao F., Livneh B., Rajagopalan B. et al. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*. 2023. Vol. 380, No. 6646. P. 743-749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
21. Lischenko L., Filipovych V. Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2024. Vol. 11, No. 1. P. 21-31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>
22. Lischenko L., Kozlova A., Andreiev A. Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2025. Vol. 12, No. 4. P. 29-37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>
23. Kozlova A., Lischenko L., Andreiev A., Lubyskiy M., Lysenko A. Water Occurrence Mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam Destruction. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*. 2024. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510066>
24. Sazonenko Y., Pidgorodetska L., Kolos L., Fedorov O. Analysis of spatial and temporal changes in the water surface area of the Kakhovka Reservoir based on satellite data. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*. 2024. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510069>
25. Yang Q., Shen X., He K. et al. Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. Article 230. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
26. Tellman B., Sullivan J. A., Kuhn C. et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*. 2021. Vol. 596. P. 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>

Отримано: 02.04.2026 / Переглянуто: 03.05.2026 / Прийнято: 06.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

#### V. O. MAKSYMENKO

PhD Student at the Department of Environmental Monitoring and Protected Areas Management  
e-mail: [maksymenko.vladyslav.o@gmail.com](mailto:maksymenko.vladyslav.o@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5525-2438>

V. N. Karazin Kharkiv National University  
4, Svobody Square, 61022, Kharkiv, Ukraine

#### V. L. BEZSONNYI, DSc (Technics),

Professor of the Department of Hotel, Restaurant Business and Craft Technologies  
e-mail: [vitalii.bezsonnyi@hneu.net](mailto:vitalii.bezsonnyi@hneu.net) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics  
9a, Nauky Ave., Kharkiv, 61165, Ukraine

### REMOTE SENSING ASSESSMENT OF THE SPATIO-TEMPORAL TRANSFORMATION OF THE KAKHOVKA RESERVOIR AFTER DAM DESTRUCTION USING SENTINEL-2 DATA

**Purpose.** To identify and characterise the spatio-temporal transformation of the Kakhovka Reservoir and adjacent landscapes after the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Plant dam on 6 June 2023 using Earth remote sensing data. The study focuses on detecting changes in the open water surface, identifying the spatial structure of the exposed reservoir bed, and assessing early vegetation colonisation of drained bottom sediments

under conditions where field surveys are limited or impossible due to active hostilities, mine contamination and safety risks.

**Methods.** Frequency distribution analysis of pixel values and visual interpretation of natural-colour imagery were used as additional tools to support the interpretation of spectral changes.

**Results.** The study is based on low-cloud multispectral Sentinel-2 MSI Level-2A imagery for 2023 obtained through the Copernicus Data Space Ecosystem. The Normalized Difference Water Index was used to identify open water surfaces and assess the spatial fragmentation of the reservoir water body. The Normalized Difference Vegetation Index was applied to detect vegetation cover and evaluate early plant colonisation on the exposed reservoir bed. Key temporal scenes before and after the dam destruction were compared to determine the main stages of landscape transformation. The NDWI analysis revealed a rapid reduction and fragmentation of the open water surface of the Kakhovka Reservoir during the first weeks after the dam destruction. The continuous water body that had characterised the reservoir before the disaster was transformed into a narrow Dnipro river channel, a system of isolated residual water bodies, and extensive areas of exposed bottom sediments. The NDVI analysis for the autumn period of 2023 showed the formation of vegetation cover across part of the drained reservoir bed. Positive NDVI values and a shift in the frequency distribution of pixel values toward vegetation-covered surfaces indicate rapid pioneer vegetation colonisation of areas that had been submerged only several months earlier.

**Conclusions.** The destruction of the Kakhovka dam caused a rapid reorganisation of the lower Dnipro hydroecosystem, with a transition from an artificial reservoir to a complex mosaic of riverine, wetland, meadow-like and exposed substrate areas. Sentinel-2 imagery combined with NDWI and NDVI indices provides an effective, objective and reproducible tool for documenting such transformations when direct field access is restricted. The detected early vegetation colonisation of the exposed reservoir bed has ambiguous ecological implications. On the one hand, it may indicate partial spontaneous restoration of floodplain habitats similar to those that existed before the reservoir was created. On the other hand, it may be accompanied by risks of secondary pollution, dust transport from contaminated sediments, fire hazards and uncontrolled landscape transformation. Further monitoring should combine optical and radar satellite data, multi-temporal NDWI and NDVI series, and, where possible, field validation.

**KEYWORDS:** *Kakhovka Reservoir, Sentinel-2, Earth remote sensing, NDWI, NDVI, ecosystem transformation*

#### *Conflict of interest*

The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

**Authors Contribution:** all authors have contributed equally to this work.

#### *AI Statement*

The authors used ChatGPT-5.5 (OpenAI, 2026) exclusively for language editing, structural organization of the text. All scientific content, materials and conclusions were created by the authors. All scientific statements, interpretations, results and conclusions have been critically reviewed by the authors, who bear full responsibility for the content of the manuscript.

#### *References*

1. Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
2. Tockner, K., & Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: Present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3), 308-330. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
3. Afanasyev, S. O. (2018). Problems and development of studies of the ecological state of hydroecosystems of Ukraine in the context of implementing EU environmental directives. *Hydrobiological Journal*, 54(6), 3–17. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj\\_2018\\_54\\_6\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/gbj_2018_54_6_3)
4. Osadchyi, V.I. (2025). Kakhovka Reservoir after the disaster: current status, challenges, and recovery strategy (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 16, 2025). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* (7): 62-68. <https://doi.org/10.15407/visn2025.07.062>
5. United Nations Environment Programme. (2023). Rapid environmental assessment of Kakhovka Dam breach, Ukraine, 2023. UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/rapid-environmental-assessment-kakhovka-dam-breach-ukraine-2023>
6. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A., & Gleick, P. (2023). Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578-586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>

7. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., ... & Wood, M. D. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*, 8, 834-836. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>
8. Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., ... & 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>
9. Oreshchenko, A. (2024). Analytical materials of the Ukrainian Hydrometeorological Institute on the explosion of the Kakhovka HPP by the Russian Federation and the desiccation of the Kakhovka Reservoir. Ukrainian Hydrometeorological Institute. <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf>
10. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons. [https://www.academia.edu/165199688/Lillesand\\_T\\_Kiefer\\_R\\_W\\_and\\_Chipman\\_J\\_2015\\_Remote\\_Sensing\\_and\\_Image\\_Interpretation\\_7th\\_ed\\_John\\_Wiley\\_and\\_Sons\\_New\\_York](https://www.academia.edu/165199688/Lillesand_T_Kiefer_R_W_and_Chipman_J_2015_Remote_Sensing_and_Image_Interpretation_7th_ed_John_Wiley_and_Sons_New_York)
11. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
12. Copernicus Data Space Ecosystem. (n.d.). Sentinel-2 Documentation. Retrieved April 27, 2026, from <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
13. European Space Agency. (2025). Copernicus Browser guide. [https://www.esa.int/Education/Copernicus\\_Browser\\_guide](https://www.esa.int/Education/Copernicus_Browser_guide)
14. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
15. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
16. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
17. Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333-360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
18. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
19. Sagan, V., Peterson, K. T., Maimaitjiang, M., ... & Adams, C. (2020). Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205, 103187. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103187>
20. Yao, F., Livneh, B., Rajagopalan, B., & Berge-Nguyen, M. (2023). Satellites reveal widespread decline in global lake water storage. *Science*, 380(6646), 743-749. <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>
21. Lischenko, L., & Filipovych, V. (2024). Operational satellite geomonitoring of the consequences of the destruction of the Kakhovka hydroelectric power plant dam. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 11(1), 21-31. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>
22. Lischenko, L., Kozlova, A., & Andreiev, A. (2025). Mapping of the spatiotemporal transformations of the former Kakhovka reservoir bed after dam destruction using Sentinel-2 satellite imagery. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 12(4), 29-37. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>
23. Kozlova, A., Lischenko, L., Andreiev, A., Lubskiy, M., & Lysenko, A. (2024). Water occurrence mapping of Kakhovka Reservoir after the Dam destruction. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510066>
24. Sazonenko, Y., Pidgorodetska, L., Kolos, L., & Fedorov, O. (2024). Analysis of spatial and temporal changes in the water surface area of the Kakhovka Reservoir based on satellite data. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510069>
25. Yang, Q., Shen, X., He, K., & Anagnostou, E. N. (2024). Pre-failure operational anomalies of the Kakhovka Dam revealed by satellite data. *Communications Earth & Environment*, 5, 230. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01397-5>
26. Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, 596, 80-86. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>

Submission received: 02.04.2026 / Revised: 03.05.2026 / Accepted: 06.05.2026 / Published: 30.05.2026