




*А. М. Карюк, Р. А. Міщенко, В. В. Козлов*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,  
м. Полтава, Україна*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4839-024X> – А. М. Карюк  
<https://orcid.org/0000-0003-1027-0541> – Р. А. Міщенко  
<https://orcid.org/0009-0009-6928-6530> – В. В. Козлов

 [vladislavkozlov2101@gmail.com](mailto:vladislavkozlov2101@gmail.com)

## ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЛАНДШАФТІВ ОСКІЛЬСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ: ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ

Повномасштабна військова агресія проти України спричинила масштабні руйнування гідротехнічної інфраструктури, що призвело до виникнення нових екологічних ризиків на прифронтових територіях. Руйнування греблі Оскільського водосховища у квітні 2022 року оголило близько 9 тисяч гектарів дна, створивши умови для неконтрольованих сукцесійних процесів. В умовах високої мінної небезпеки та неможливості проведення наземних польових досліджень критично важливим стає використання дистанційних методів для оцінки екологічної безпеки та перспектив відновлення постраждалих екосистем. У зв'язку з цим, у роботі здійснено комплексний просторово-часовий аналіз динаміки самовідновлення (ренатуралізації) екосистеми Оскільського водосховища за період 2020-2025 років з метою обґрунтування стратегії «зеленого відновлення» водно-болотних угідь (ветландів) як альтернативи техногенній відбудові.

Методологічну основу дослідження склали обробка часових рядів мультиспектральних супутникових знімків Sentinel-2 MSI Level-2A за літні періоди (червень-серпень). Використання хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) у середовищі QGIS дозволило застосувати комбінацію спектральних індексів: MNDWI (ідентифікація водного дзеркала), SAVI (аналіз ґрунтової вегетації та біомаси), NDMI (оцінка вологості) та NDRE (моніторинг якості води). Статистичний аналіз площ виконано за допомогою зонування та класифікації растрових даних, що дозволило верифікувати процеси без фізичного доступу до зони бойових дій.

За результатами моніторингу підтверджено катастрофічну трансформацію об'єкта: від стабільного водного дзеркала площею 9685 га (99,6% покриття) у довоєнний період (2020-2021 рр.) до критичного осушення у 2024 році, коли площа води скоротилася до 1629,65 га (28,5%). Встановлено, що процес деградації глибоководних екосистем змінився фазою активної ренатуралізації. У 2025 році зафіксовано інтенсивну регенерацію: індекс SAVI показав консолідацію стійких рослинних угруповань (верба, очерет) на площі 4854,41 га, що становить 66,4% від досліджуваної території. Виявлено феномен гідрологічної конвергенції, за якого високі показники вологості (NDMI ~78,9%) утримуються не завдяки відкритій воді, а завдяки транспіраційній здатності новоствореної біомаси. Просторова диференціація показала, що північна частина водосховища трансформувалася у піщано-мулові ари, тоді як центральна та південна частини (район с. Піски-Радківські) сформували складну мозаїку мілководних лагун із високим біорізноманіттям, що підтверджується зростанням стандартного відхилення індексу NDRE (109,3 у 2025 р.). Це свідчить про формування екосистеми типу «Великий Луг» із високим потенціалом до самоочищення та кліматичної регуляції.

Доведено, що на місці зруйнованого водосховища сформувався стійкий природний водно-болотний комплекс, який виконує функції фітофільтрації та терморегуляції ефективніше за техногенну водойму. Результати дослідження дають підстави рекомендувати перегляд планів щодо відбудови греблі у попередніх параметрах на користь надання новоствореним ветландам природоохоронного статусу та їх інтеграції у стратегію екологічної безпеки регіону. Запропонований методологічний підхід є універсальним інструментом для моніторингу деградованих гідроекосистем у зонах збройних конфліктів.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, Sentinel-2, Оскільське водосховище, екологічна безпека, ренатуралізація, водно-болотні угіддя, спектральні індекси, MNDWI, SAVI, моніторинг наслідків війни.

## **REMOTE MONITORING OF THE OSKIL RESERVOIR LANDSCAPE TRANSFORMATION DUE TO MILITARY ACTIONS: A SPATIOTEMPORAL ANALYSIS**

The full-scale military aggression against Ukraine has caused unprecedented destruction of hydraulic infrastructure, leading to the emergence of environmental risks in frontline territories. The destruction of the Oskil Reservoir dam in April 2022 exposed approximately 9,000 hectares of the reservoir bed, creating conditions for uncontrolled successional processes. Given the high mine contamination and the impossibility of conducting ground-based field research, the use of remote sensing methods becomes critically important for assessing environmental safety and the prospects for restoring affected ecosystems. In this regard, the paper provides a comprehensive spatiotemporal analysis of the self-restoration (renaturalization) dynamics of the Oskil Reservoir ecosystem for the period 2020–2025 to justify a "green recovery" strategy for wetlands as an alternative to industrial reconstruction.

The methodological framework of the study is based on the processing of time series from Sentinel-2 MSI Level-2A multispectral satellite imagery during summer periods (June–August). The use of the Google Earth Engine (GEE) cloud platform within the QGIS environment allowed for the application of a combination of spectral indices: MNDWI (water mirror identification), SAVI (analysis of soil vegetation and biomass), NDMI (moisture assessment), and NDRE (water quality monitoring). Statistical analysis of the areas was performed through zoning and classification of raster data, enabling the verification of processes without physical access to the combat zone.

Monitoring results confirmed a catastrophic transformation of the site: from a stable water surface of 9,685 ha (99.6% coverage) in the pre-war period (2020–2021) to critical drainage in 2024, when the water area decreased to 1,629.65 ha (28.5%). It was established that the degradation of deep-water ecosystems has been succeeded by a phase of active renaturalization. In 2025, a "regeneration leap" was recorded: the SAVI index indicated the consolidation of stable plant communities (willow, reed) over an area of 4,854.41 ha, representing 66.4% of the study area. A phenomenon of hydrological convergence was identified, where high moisture levels (NDMI ~78.9%) are maintained not by open water, but through the transpiration capacity of the newly formed biomass. Spatial differentiation showed that the northern part of the reservoir transformed into sand-silt arenas, while the central and southern parts (near the village of Pisky-Radkivski) formed a complex mosaic of shallow lagoons with high biodiversity, as evidenced by the increase in the standard deviation of the NDRE index (109.3 in 2025). This indicates the formation of a "Velykyi Luh" (Great Meadow) type ecosystem with high potential for self-purification and climate regulation.

It is proven that a stable natural wetland complex has formed on the site of the destroyed reservoir, performing phytofiltration and thermoregulation functions more effectively than a man-made body of water. The study results provide grounds for recommending a revision of plans to rebuild the dam to its previous parameters in favor of granting the newly formed wetlands a protected status and integrating them into the regional environmental safety strategy. The proposed methodological approach serves as a universal tool for monitoring degraded hydro-ecosystems in conflict zones.

**Keywords:** remote sensing, Sentinel-2, Oskil Reservoir, environmental safety, renaturalization, wetlands, spectral indices, MNDWI, SAVI, war impact monitoring.

### **Вступ**

Повномасштабна військова агресія проти України призвела до безпрецедентної трансформації гідрографічної мережі, особливо в прифронтових та прикордонних регіонах. Одним із найбільш критичних екологічних інцидентів стало руйнування гідротехнічних споруд Оскільського водосховища у квітні 2022 року [1-3]. Об'єкт розташований у межах Харківської та Донецької областей у нижній течії р. Оскіл (басейн Сіверського Дінця). Регіон характеризується помірно-континентальним кліматом із жарким літом та нерівномірним розподілом опадів. Такі природно-кліматичні умови в поєднанні з наявністю потужних мулових відкладень обумовили специфіку трансформації: катастрофічне скидання водного масиву призвело до оголення близько 8-9 тисяч гектарів колишнього ложа, що в умовах високої літньої інсоляції та залишкової вологості субстрату запустило процеси надзвичайно швидкої спонтанної ренатуралізації [4, 26].

Проблема полягає у виникненні дестабілізованого ландшафту на територіях, де проведення польових досліджень є неможливим або вкрай обмеженим через близькість до зони бойових дій та високу мінну небезпеку. Відсутність чіткої стратегії відновлення техногенного водосховища чи ренатуралізація території у формі водно-болотних угідь (ветландів) створює ризик некерованих екологічних процесів. Виникає гостра потреба розробити об'єктивну систему моніторингу, яка дозволить оцінити динаміку самовідновлення екосистем та їх здатність виконувати екосистемні послуги (терморегуляція, фітофільтрація, утримання вологи) в умовах воєнного стану [5].

Актуальність теми зумовлена необхідністю пошуку нових стратегій екологічного відновлення України у поствоєнний період [6]. Традиційні методи гідротехнічного управління в умовах прифронтових регіонів виявляються вразливими та економічно затратними [7; 8].

Катастрофа Оскільського водосховища є унікальним явищем для світової практики повернення річки до природного стану (ревайлдингу) внаслідок бойових дій.

По-перше, в умовах обмеженого доступу до замінованих та прикордонних територій, використання методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на основі супутникових даних Sentinel-2 стає єдиним валідним інструментом для отримання оперативної екологічної інформації [9].

По-друге, формування на місці колишнього водосховища нових водно-болотних угідь відповідає світовим трендам кліматичної адаптації та виконанню вимог Бернської конвенції та Рамсарської конвенції. Дослідження процесів сукцесії та динаміки зволоження (індекси SAVI, NDMI) дозволяє обґрунтувати доцільність збереження ветландів як природних буферів, що забезпечують очищення води та стабілізацію мікроклімату в регіонах, які найбільше постраждали від воєнного впливу. Таким чином, аналіз можливостей відновлення водно-болотних угідь стає фундаментом для нової екологічної політики «зеленого відновлення» України.

Представлене дослідження безпосередньо інтегроване у реалізацію Національного плану відновлення України [10] та Стратегії екологічної безпеки і адаптації до зміни клімату [11]. В умовах триваючого воєнного конфлікту, авторський доробок вирішує низку пріоритетних завдань.

Зокрема, розробка методики дистанційного моніторингу територій з обмеженим фізичним доступом [12; 13]. Використання комбінації індексів MNDWI (1) (динаміка дзеркала води) та SAVI (2) (аналіз біомаси) дозволяє верифікувати процеси самовідновлення екосистем без ризику для життя дослідників, що є критично важливим для замінованих прибережних зон Осколу.

Водночас, з огляду на практичне завдання для прифронтових регіонів – це оцінка здатності новостворених водно-болотних угідь до фітофільтрації. Оскільки очисна інфраструктура багатьох населених пунктів Харківщини та Донеччини зазнала пошкоджень, аналіз якості та стану водної маси через індекс NDRE (4) дає практичні рекомендації щодо використання природного потенціалу ветландів для очищення річкових вод.

Дослідження сприяє виконанню зобов'язань України в межах Угоди про асоціацію з ЄС (зокрема Директиви 2000/60/ЄС [14] та Оселищної директиви [15]). Авторський аналіз динаміки вологості через NDMI дозволяє обґрунтувати створення нових природоохоронних об'єктів на місці колишнього водосховища, що є

стратегічним кроком до зеленої трансформації прикордонних регіонів.

Таким чином, результати дослідження слугують науково-методичним підґрунтям для ухвалення рішень органами місцевого самоврядування та Міністерством захисту довкілля щодо доцільності (або недоцільності) відбудови гідротехнічних споруд у зоні бойових дій.

Питання трансформації гідроекосистем внаслідок збройних конфліктів та можливості їх подальшого відновлення перебувають у центрі уваги як українських, так і міжнародних науковців. Проблема воєнного впливу на водні ресурси України ґрунтовно висвітлена у працях В. Дочинця, Т. Шуплат, О. Бондаря [16], а також у звітах екологічних організацій, таких як UNCG (Українська природоохоронна група) [17] та Ecoaction [18].

Окремий пласт досліджень присвячений концепції ревайлдингу та ренатуралізації територій після спуску великих водосховищ. Зокрема, академік Я. Дідух у своїх працях обґрунтовує високу фітоценотичну цінність нових екосистем, що формуються на місці колишніх техногенних об'єктів [19]. Зарубіжні дослідники (наприклад, у межах моніторингу конфліктів для Environmental Peacebuilding) наголошують на важливості використання Sentinel-2 для оцінки екологічних збитків у зонах, де наземний моніторинг неможливий.

Щодо методологічного аспекту, використання індексів MNDWI (1), NDMI (3), NDRE (4) та SAVI (2) для аналізу водно-болотних угідь є стандартом у працях таких науковців, як G. Kaplan та інших, проте їх адаптація до специфічних умов швидкого осушення водосховищ у прифронтовій смузі є відносно новим напрямом [20; 9]. Попри наявність загальних оглядів екологічних наслідків війни, бракує комплексних просторово-часових аналізів, які б базувалися на довгострокових рядах даних (2020-2025 рр.) та інтегрували показники зволоження ґрунту (NDMI) з якісними характеристиками водної товщі (NDRE (4)) саме для Оскільського регіону.

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених екологічним наслідкам руйнування гідроспоруд, більшість досліджень фокусується на стадії деструкції (2022-2023 рр.) та оцінці завданих збитків [21]. Поза увагою науковців часто залишається перехід від фази катастрофічного осушення до стадії спонтанної регенерації та формування нових екосистемних зв'язків у 2024-2025 роках.

Основними невирішеними аспектами, на яких акцентує увагу наше дослідження, є:

-відсутність комплексного порівняння довоєнного стану (2020 р.) з фазою активного відновлення біомаси (2025 р.) на конкретних ділянках Оскільського водосховища;

-недостатня вивченість кореляції між індексами зволоження (NDMI) та індексами вегетації (SAVI) саме в умовах швидкого формування ветландів на мулових відкладеннях. Більшість стандартних моделей розраховані на стабільні природні угіддя, а не на динамічні антропогенно-змінені ландшафти в зоні бойових дій;

-невизначеність щодо функціонального стану новостворених залишкових мілководних водойм. Залишається відкритим питання: чи є ці об'єкти деградованими залишками водосховища, чи вони вже трансформувалися у стійкі екотони з високим самоочисним потенціалом (NDRE (4)).

Саме заповненню прогалин через інструментарій ДЗЗ присвячене наше дослідження, що дозволяє перейти від констатації збитків до аналізу можливостей відновлення водно-болотних угідь як стратегічного екологічного ресурсу прифронтових територій.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у першому комплексному просторово-часовому аналізі динаміки спонтанного відновлення Оскільського водосховища, що охоплює повний цикл трансформації: від довоєнного стану (2020 р.) через стадію катастрофічного осушення (2022-2024 рр.) до фази активної ренатуралізації (2025 р.).

Вперше встановлено та обґрунтовано:

1. Ефект регенераційного стрибка за допомогою індексу SAVI зафіксовано критичний поріг консолідації рослинних угруповань у 2025 році (до 66.4%), що науково підтверджує перехід системи від стадії оголеного дна до фази формування сталого водно-болотного угіддя за типом плавневої системи.

2. Методику оцінки резильєнтності через гетерогенність, використовуючи стандартне відхилення (StDev) індексу NDRE (4) як показник екологічної стійкості прифронтових територій. Доведено, що висока ландшафтна строкатість (показник 109.3 у 2025 р.) є ознакою формування нових екологічних ніш, які підвищують здатність екосистеми до самовідновлення після бойових дій.

Вперше для умов прифронтового Осколу виявлено закономірність, за якої високі показники вологості (NDMI  $\sim$  78.9%) утримуються не завдяки відкритому дзеркалу води, а через транспіраційну здатність новоствореної біомаси. Це змінює уявлення про осушення як виключно негативний процес, трактуючи його як етап гідрологічної ревіталізації.

Таким чином, новизна дослідження полягає у переході від описового аналізу збитків до кількісного моделювання потенціалу зеленого

відновлення прифронтових регіонів за допомогою передових методів ДЗЗ.

Методологічне значення дослідження полягає у розробці та апробації алгоритму комплексного екологічного моніторингу територій із обмеженим фізичним доступом. В умовах прифронтової зони, де традиційні методи гідробіологічних та ґрунтових досліджень є неможливими через безпекові ризики, запропонований підхід на основі мультиспектральних даних Sentinel-2 стає методологічним еталоном для оцінки стану довкілля в зонах збройних конфліктів.

Загальнонаукове значення роботи визначається такими аспектами:

1. Розвиток теорії сукцесії доповнюють наукові уявлення про швидкість та спрямованість вторинних сукцесій у штучно створених гідроекосистемах після їх раптової деградації. Це дозволяє моделювати майбутні зміни ландшафтів на інших територіях, де можливі аналогічні руйнування гідротехнічної інфраструктури.

2. Інтеграція спектральних індексів довела ефективність синергетичного використання індексів MNDWI (1), SAVI (2), NDMI (3) та NDRE (4) для ідентифікації прихованих екологічних станів. Зокрема, методологічно обґрунтовано, що аналіз лише дзеркала води є недостатнім для оцінки відновлення; лише врахування вологості едотопу та якості біомаси дає повну картину формування ветланду [22].

Робота закладає наукове підґрунтя для зміни парадигми управління водними ресурсами України – від жорсткого гідротехнічного регулювання до підтримки природних механізмів самовідновлення. Це має фундаментальне значення для розробки стратегій екологічної безпеки прикордонних та прифронтових регіонів.

#### **Методи дослідження**

Просторово-часова динаміка стану Оскільського водосховища була проаналізована за допомогою інструментарію геоінформаційної системи QGIS [23]. Для забезпечення наукової релевантності та нівелювання сезонних коливань, для аналізу відбиралися супутникові знімки Sentinel-2 за літні періоди (червень-серпень) 2020-2025 рр. Такий вибір зумовлений піком вегетаційної активності та стабільністю гідрологічного режиму в межах меженого періоду.

Дослідження базується на комплексному моніторингу Оскільського водосховища за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Обробка та аналіз даних проводилися з використанням хмарної платформи Google Earth Engine (GEE), інтегрованої в середовище QGIS 3.40.14 за допомогою плагіна Earth Engine Python API.

Як векторна основа використано часові ряди знімків Sentinel-2 MSI Level-2A (атмосферно скоригований продукт) за період 2020-2025 рр. Для мінімізації сезонних коливань та забезпечення максимальної репрезентативності вегетаційного покриття, аналіз проводився на основі знімків, отриманих у червні-серпні кожного року.

Процес аналізу включав автоматизовану фільтрацію хмарності (канал QA60) та розрахунок мультиспектральних індексів. Кількісні показники (Mean, StDev, Min, Max) отримані шляхом зональної статистики (Zonal Statistics) у QGIS на основі експортованих GeoTIFF-файлів.

Для ідентифікації процесів відновлення водно-болотних угідь та диференціації ландшафтних зон було застосовано чотири базові спектральні індекси.

Для виділення відкритого дзеркала води та окреслення меж акваторії розраховувався модифікований нормалізований різницевий водний індекс (MNDWI) за формулою (1) [20; 24]:

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)}, \quad (1)$$

де Green – спектральний канал видимого зеленого світла (Band 3, довжина хвилі ~560 нм); SWIR – короткохвильовий інфрачервоний канал (Band 11, ~1610 нм).

Для оцінки біомаси з мінімізацією впливу відкритого ґрунту, що є критичним для моніторингу оголеного дна водосховища, застосовано ґрунтовий індекс вегетації (SAVI), представлений у формулі (2):

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} * (1 + L), \quad (2)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал (Band 8, ~842 нм); RED – видимий червоний канал (Band 4, ~665 нм); L – коефіцієнт корекції ґрунтового фону (для умов розрідженої рослинності прийнято L = 0.5).

Аналіз вологовмісту рослинного покриття та поверхневих шарів ґрунту здійснено за допомогою нормалізованого різницевого індексу вологості (NDMI) згідно з формулою (3):

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)}, \quad (3)$$

де SWIR1 – короткохвильовий інфрачервоний канал (Band 11, ~1610 нм).

Для визначення якості вегетації та вмісту хлорофілу, особливо на етапах раннього розвитку рослинності, використано нормалізований

різницевий індекс червоного краю (NDRE), який розраховується за формулою (4):

$$NDRE = \frac{(NIR - Re)}{(NIR + Re)} \quad (4)$$

де Re (Red Edge) – канал червоного краю спектра, чутливий до вмісту хлорофілу (Band 7, ~783 нм).

Для перетворення результатів дистанційного зондування у статистичні дані площ було застосовано алгоритм обробки растрових даних. Спочатку на основі гістограми розподілу значень індексу SAVI було проведено їх дискретизацію на три функціональні класи. Діапазон від -10000 до 0 віднесено до класу «Вода» (глибоководні ділянки та русло), інтервал від 0 до 2000 – до класу «Мул/Голий ґрунт» (перехідні зони та оголене дно), а значення від 2000 до 10000 ідентифіковано як «Рослинність» (активна біомаса новоствореного ветланду).

Далі для отримання кількісних показників було використано інструмент просторової агрегації (Zonal Histogram). В якості векторної основи слугував контур водного дзеркала водосховища, в межах якого алгоритм підраховував кількість пікселів для кожного з виділених класів за кожен рік дослідження. На завершальному етапі перераховано кількість пікселів в одиниці площі (гектари). Розрахунок базувався на просторовій розрізненості даних Sentinel-2, де один піксель відповідає 100 м<sup>2</sup> поверхні.

#### Результати дослідження

Аналіз динаміки дзеркала води за допомогою індексу MNDWI (1) підтверджує катастрофічну трансформацію об'єкта. Якщо у 2020-2021 рр. спостерігалася гомогенна водна поверхня (99,6%), то після руйнування гідротехнічних споруд у 2022 р. розпочався процес фрагментації акваторії. У 2024 р. зафіксовано стан максимального осушення (28,5%), що призвело до деградації глибоководних екосистем. Проте дані за 2025 р. вказують на суттєву регенерацію (66,8%), що пов'язано не з підйомом рівня до проектних відміток, а з вторинним обводненням заплавної ділянок та формуванням розгалуженої мережі проток.

Аналіз динаміки Оскільського водосховища за період 2020-2025 рр. виявив чіткі етапи трансформації екосистеми.

Для візуалізації динаміки використано колірну модель RGB: синій канал застосовано для індексів MNDWI (1) та NDMI (3), бо він найкраще відображає наявність відкритої води та рівень зволоження мулу; зелений канал використано для SAVI (2), оскільки він чітко фіксує появу живої рослинності (біомаси) на оголеному дні; а червоний канал прив'язано до NDRE (4), бо він чутливий до мілководдя, процесів замулення та наявності фітопланктону.

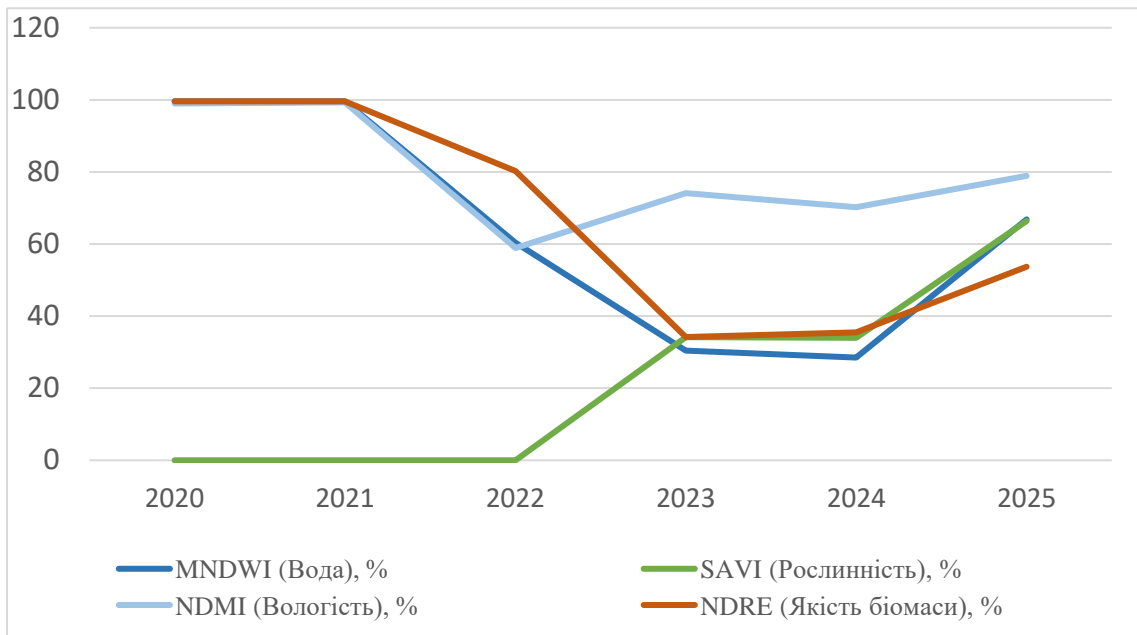
Таблиця 1

Аналіз динаміки Оскільського водосховища за період 2020- 2025 рр. виявив чіткі етапи трансформації екосистеми

| Рік  | Індекс | Середнє | StDev | %     | Комплексний аналіз структури ландшафту   |
|------|--------|---------|-------|-------|--|
| 2020 | MNDWI  | 253,9   | 1,1   | 99,6% | Стабільне суцільне дзеркало води (гомогенна глибока вода з високим вмістом фітопланктону). Повна відсутність суші та вегетуючої рослинності на ложі. Рівномірне максимальне зволоження всієї території.                            |
|      | SAVI   | 0,0     | 0,0   | 0,0%  |  |
|      | NDMI   | 252,5   | 7,3   | 99,0% |  |
|      | NDRE   | 254,0   | 0,3   | 99,6% |  |
| 2021 | MNDWI  | 253,9   | 1,1   | 99,6% | Максимальний підпірний рівень водосховища. Гомогенна водна поверхня зі стабільним гідрологічним режимом (повне насичення вологою) та абсолютною відсутністю фотосинтезуючої біомаси під товщею води.                               |
|      | SAVI   | 0,0     | 0,0   | 0,0%  |  |
|      | NDMI   | 253,2   | 4,8   | 99,3% |  |
|      | NDRE   | 253,9   | 0,5   | 99,6% |  |
| 2022 | MNDWI  | 154,0   | 87,1  | 60,4% | Початок фрагментації акваторії та зменшення об'єму чистої води. Формування мілководдя та значних ділянок оголеного дна (фаза відкритого ґрунту без рослинності) з нерівномірним висиханням поверхневих шарів мулу.                 |
|      | SAVI   | 0,0     | 0,0   | 0,0%  |  |
|      | NDMI   | 150,2   | 78,2  | 58,9% |  |
|      | NDRE   | 204,7   | 79,4  | 80,3% |  |
| 2023 | MNDWI  | 77,4    | 106,3 | 30,4% | Глибока деградація і трансформація у мілководну систему (вода лише в руслі). Перехід у стан ветланду: висока вологість мулових відкладень запобігає ерозії та сприяє осередковому заростанню дна (пооява перших лук).              |
|      | SAVI   | 87,1    | 105,6 | 34,2% |  |
|      | NDMI   | 188,9   | 60,8  | 74,1% |  |
|      | NDRE   | 87,1    | 108,5 | 34,2% |  |
| 2024 | MNDWI  | 72,6    | 97,8  | 28,5% | Стан максимального осушення з формуванням ізольованих лагун та високою строкатістю мілководдя. Стабілізація трав'яного покриву (стійкі угруповання), який успішно утримує вологу в біомасі та верхньому горизонті ґрунту.          |
|      | SAVI   | 86,6    | 104,4 | 34,0% |  |
|      | NDMI   | 179,0   | 60,8  | 70,2% |  |
|      | NDRE   | 90,6    | 104,4 | 35,5% |  |
| 2025 | MNDWI  | 170,4   | 100,3 | 66,8% | Суттєва регенерація акваторії (обводнення заплавл, часткове відновлення глибин у руслі). Формування плавневої системи (консолідація зарослів верби та очерету). Максимальне зволоження завдяки синергії води та соковитої біомаси. |
|      | SAVI   | 169,4   | 44,7  | 66,4% |  |
|      | NDMI   | 201,2   | 51,7  | 78,9% |  |
|      | NDRE   | 136,9   | 109,3 | 53,7% |  |

Картографічний аналіз у QGIS дозволив виявити значну територіальну неоднорідність процесів ренатуралізації: Північна частина (вище с. Комарівка), де фіксується найбільш інтенсивне обміління [25]. Територія трансформувалася у відкриті піщано-мулові ариени з поступовим переходом до лучної рослинності. У 2024 році тут спостерігалися найнижчі значення MNDWI (1).

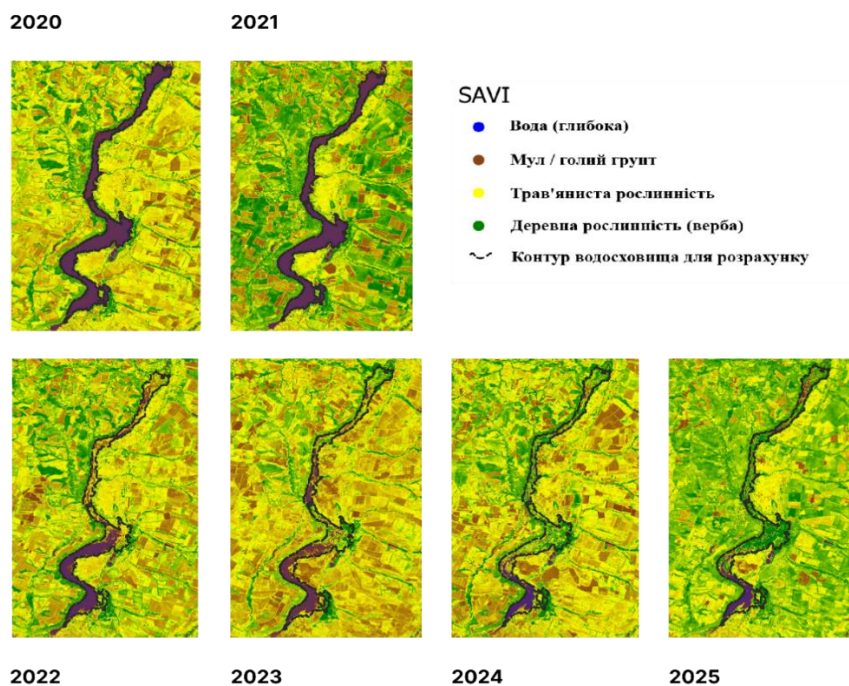
Центральна та південна частини (район Нижче Солоне та Піски-Радківські), де спостерігається формування складної ландшафтної мозаїки. Завдяки меандруючому руслу Осколу та нерівномірному рельєфу дна, тут утворилися численні мілководні лагуни, оточені густими зарослями макрофітів. Саме в цій зоні індекс SAVI (2) у 2025 році демонструє найвищу неоднорідність (StDev), що свідчить про активну фазу формування ветланду.



**Рисунок 1** – Багаторічна динаміка трансформації ложа Оскільського водосховища за показниками спектральних індексів (2020–2025 рр.)

Для наочної візуалізації багаторічної динаміки трансформації ложа водосховища побудовано лінійний графік зміни площ ключових ландшафтних фацій (рис. 1). Аналіз кривих чітко відображає точку біфуркації екосистеми у 2022 році, коли після руйнування греблі розпочалося стрімке скорочення площі водного дзеркала (індекс MNDWI (1)). Графік демонструє різноспрямовану динаміку у 2023-2024 роках: на тлі досягнення критичного мінімуму відкритої води (28,5 %), фіксується різкий висхідний тренд розвитку піонерної вегетації (SAVI (2)). Особливу увагу

науковців привертає поведінка тренду вологості (NDMI). Як видно з діаграми, починаючи з 2023 року, крива зволоженості території відокремлюється від показників наявності води у руслі і починає синхронно зростати разом із накопиченням біомаси (SAVI (2) та NDRE (4)), досягаючи 78,9 % у 2025 році. Це наочно ілюструє феномен гідрологічної конвергенції: новостворений водно-болотний комплекс здатний самостійно утримувати високий рівень вологи завдяки транспірації рослинності, компенсуючи втрату суцільної акваторії.



**Рисунок 2** - Візуалізація індексу SAVI (2) (2020–2025 рр.). Відображає динаміку колонізації ложа водосховища піонерною рослинністю

Застосований метод Singleband Pseudocolor Renderer у QGIS дозволив чітко розмежувати зони активного вегетування від вологих субстратів,

підтверджуючи концепцію плавневої системи як екологічно стійкої альтернативи техногенному водоймищу в умовах прифронтової смуги.

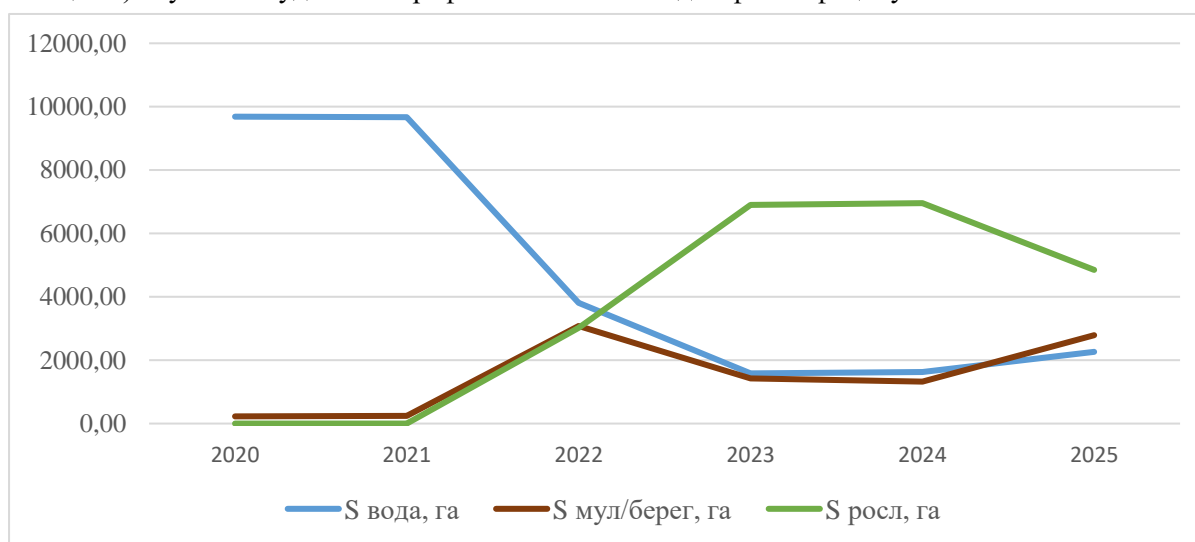
**Таблиця 2**

Динаміка трансформації ложа Оскільського водосховища за результатами класифікації індексу SAVI (2020–2025 рр.)

| Рік  | S вода, га | S мул/берег, га | S росл, га |
|------|------------|-----------------|------------|
| 2020 | 9685,00    | 226,89          | 0,00       |
| 2021 | 9670,61    | 241,28          | 0,00       |
| 2022 | 3807,73    | 3079,30         | 3024,86    |
| 2023 | 1583,83    | 1427,34         | 6900,72    |
| 2024 | 1629,65    | 1326,85         | 6955,39    |
| 2025 | 2266,48    | 2791,00         | 4854,41    |

Для наочної візуалізації темпів ренатуралізації та оцінки масштабів втрати водного дзеркала на основі розрахованих площ (Таблиця 2) було побудовано графік часової

динаміки. Графічне представлення дозволяє чітко простежити точку біфуркації екосистеми у 2022 році та подальшу зміну домінуючих ландшафтних фацій у межах колишньої акваторії.



**Рисунок 3** – Динаміка площинної трансформації підстильної поверхні Оскільського водосховища у 2020-2025 рр. (за результатами класифікації індексу SAVI (2))

### Обговорення

Результати комплексного моніторингу підтверджують успішну первинну сукцесію та формування стійкої плавневої системи. Динаміка індексу MNDWI (1) зафіксувала радикальну трансформацію об'єкта: від гомогенного водного дзеркала (99,6% у 2021 р.) до фрагментованої акваторії (28,5% у 2024 р.), що стало каталізатором процесів ренатуралізації. Класифікація індексу SAVI (2) свідчить, що якщо у 2021 році вегетуюча біомаса була відсутня, то у 2024 році вона охопила 6955,39 га, а у 2025 році консолідувалася на площі 4854,41 га. Висока вологість мулів (NDMI (3) = 78,9 %) у поєднанні з вегетацією створює ефект мікрокліматичної стабілізації. Якісний стан новостворених екосистем підтверджується індексом NDRE (4), висока варіативність якого (StDev 109,3 у 2025 р.)

вказує на формування складної ландшафтної мозаїки (лагуни, мілководдя), що мають вищу здатність до самоочищення порівняно з попередньою техногенною водоймою. Цей механізм утримання вологи є критично важливим для кліматичної адаптації прифронтового регіону в умовах глобального потепління.

Просторова диференціація процесів відновлення демонструє формування складного екотону. Північна частина (район с. Комарівка) зазнала максимального осушення, перетворившись на піщано-мулові арени. Натомість центральна та південна зони (Нижче Солоне, Піски-Радківські) утворили високомозаїчну ландшафтну структуру. Саме ці залишкові мілководні водойми, меандруюче русло Осколу та зони замулення мають найвищу екологічну цінність як нові осередки біорізноманіття.

Аналізуючи ці зміни, можна стверджувати, що спонтанна ренатуралізація Осколу за принципом природоорієнтованих рішень (Nature-based Solutions) виявилася екологічно ефективнішою за жорстке техногенне управління. Сформовані водно-болотні угіддя (ветланди) здатні виконувати функції природних бар'єрів та потужних фітофільтрів, що підвищує загальну екологічну безпеку та стійкість регіону до наслідків воєнних дій.

З огляду на це, стратегія «нульової альтернативи» (відмова від відбудови Оскільського гідровузла у його довоєнних параметрах) постає економічно вигіднішим та кліматично резильєнтним рішенням. Виявлена висока мозаїчність ландшафтів створює наукове підґрунтя для розширення Смарагдової мережі (Emerald Network) та виконання міжнародних природоохоронних зобов'язань України. Крім того, високий потенціал новостворених фітоценозів до депонування вуглецю відкриває перспективи для залучення міжнародних зелених інвестицій з метою відновлення постраждалих територій.

#### Висновки

На основі проведеного просторово-часового аналізу Оскільського водосховища за період 2020-2025 років доведено високу ефективність методів дистанційного зондування Землі. Інтеграція хмарної платформи Google Earth Engine та геоінформаційної системи QGIS із застосуванням комбінації спектральних індексів (MNDWI (1), SAVI (2), NDMI (3), NDRE (4)) дозволила достовірно верифікувати екологічні процеси в умовах відсутності безпечного доступу для проведення польових досліджень.

Встановлено, що гідроекосистема пройшла повний цикл трансформації, багаторічна динаміка якої чітко фіксується за зміною площ основних ландшафтних фацій. Від довоєнної стабільності у 2020-2021 роках (площа водного дзеркала 9670-9685 га), система після руйнування греблі у 2022 році перейшла до фази фрагментації акваторії (скорочення площі води до 3807,73 га та оголення мулових відкладень на площі 3079,30 га). У 2023-2024 роках зафіксовано стадію глибокої деградації та критичного осушення: площа води досягла мінімуму (1629,65 га у 2024 р.), натомість відбувся різкий стрибок розвитку піонерної лучної рослинності (до 6900–6955 га). Станом на 2025 рік зафіксовано перехід до стадії активної біологічної регенерації та вторинне обводнення заплавної ділянок, площа яких зросла до 2266,48 га.

Дослідження підтвердило феномен гідрологічної конвергенції та успішну первинну сукцесію. На місці зруйнованого водосховища сформувався стійкий природний водно-болотний комплекс, де площа стабільної рослинності

(консолідація зарослів верби та очерету) у 2025 році стабілізувалася на рівні 4854,41 га (66,4 % досліджуваної території). Високий рівень вологості (NDMI ~ 78,9%) наразі підтримується не завдяки відкритій воді, а завдяки транспіраційній здатності новоствореної біомаси. При цьому процеси ренатуралізації мають виражену просторову неоднорідність: від формування сухих піщано-мулових арен на півночі до складної мозаїки мілководних лагун у центральній та південній частинах колишнього ложа. Високий рівень біорізноманіття та формування нових екологічних ніш у цих зонах кількісно підтверджується зростанням ландшафтної строкатості (стандартне відхилення індексу NDRE досягло 109,3 у 2025 р.).

Одержані результати дають обґрунтовані наукові підстави рекомендувати перегляд планів щодо техногенної відбудови греблі у її попередніх параметрах. Натомість пропонується надати новоствореним водно-болотним угіддям природоохоронний статус та інтегрувати їх у регіональну стратегію екологічної безпеки як природний механізм самоочищення вод і кліматичної регуляції. Запропонований методологічний алгоритм є універсальним інструментом, який може бути успішно масштабований для моніторингу інших деградованих водойм, зокрема Каховського водосховища.

Враховуючи високу динамічність процесів вторинної сукцесії та формування нових ландшафтів, на цьому етапі дослідження не завершуються. Подальший безперервний супутниковий моніторинг території Оскільського водосховища залишається пріоритетним науковим завданням. Це дозволить відстежувати довгострокові тренди розвитку новостворених екосистем, оцінювати їхню стійкість до кліматичних флуктуацій та своєчасно коригувати стратегії природокористування у поствоєнний період.

#### Список літератури:

1. Dmitriiev S., Reshetchenko S. Natural and social consequences of military actions in the territory of Kharkiv region. *Human Geography Journal*. 2024. Issue 36. P. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-06>
2. Prokopenko N., Nesterenko S., Dorozhko Y. Geodesy and land management in solving problems of stability and safety of hydrotechnical structures, analysis of monitoring and diagnostic methods. *Spatial development*. 2024. Issue 10. P. 519–530. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.519-530>
3. Zaliubovskyi M., Filatova K., Zaliubovska O. Space-time analysis of the impact of military operations on the territory of the Emerald Network

within Kharkiv region. *Geographical Education and Cartography*. 2025. Issue 42. P. 53–63. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2025-42-06>

4. Тягно Ю. В., Дрозд О. М. Стан території Оскільського водосховища в результаті воєнних дій. *Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України*: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. Харків, 2023. С. 190–191. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/65638/> (дата звернення: 02.03.2026).

5. Scientific aspects of conserving and restoring natural resources under the modern development of society. Baltija Publishing, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-511-2>

6. Устінова І., Власенко Н. Екоцид та повоєнне відновлення білігеративних ландшафтів України: проблеми, досвід, перспективи. *Grail of Science*. 2023. Issue 27. P. 558–668. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.113>

7. Development of water protection in European countries: relevance for Ukraine / O. Stepova, S. Shara et al. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, Issue 4. P. 249–253. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.249>

8. Monitoring and revitalization technologies of Dnipro reservoirs / O. Stepova, S. Shara et al. *Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, Issue 4. P. 319–324. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.04.319>

9. Супутникові технології в оцінці екологічних наслідків війни та управлінні відновленням земельних ресурсів / Т. Калина, І. Островський, І. Підберезних та ін. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*. 2026. Vol. 350, Issue 1. P. 613–620. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-83>

10. План відновлення України: вебсайт. URL: <https://recovery.gov.ua/> (дата звернення: 02.03.2026).

11. Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/proshvalennya-strategiyi-ekologichno-a1363r> (дата звернення: 02.03.2026).

12. Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review / G. Kaplan, T. Rashid, M. Gasparovic et al. *Land Degradation & Development*. 2022. Vol. 33, № 10. P. 1513–1526. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>

13. Braslavskaya O., Nesterenko S., Herasychuk O. Remote geodetic monitoring: a key tool for sustainable land management. *Urban development and spatial planning*. 2025. Issue 89. P. 488–502. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.488-502>

14. Директива Європейського Парламенту і Ради про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики від 23 жовт. 2000 р. № 2000/60/ЄС. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/go/994\\_962](https://zakon.rada.gov.ua/go/994_962) (дата звернення: 02.03.2026).

15. Директива Ради про охорону природних оселищ та дикої фауни і флори від 21 трав. 1992 р. № 92/43/ЄС. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/go/987\\_004-92](https://zakon.rada.gov.ua/go/987_004-92) (дата звернення: 02.03.2026).

16. Velychko S., Dupliak O. The impact of full-scale armed conflict on water bodies as water supply sources. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*. 2023. Issue 45. P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14>

17. Водно-болотні угіддя. *Українська природоохоронна група*: вебсайт. URL: <https://uncg.org.ua/vbu/> (дата звернення: 02.03.2026).

18. Публікації Екодії. *Екодія*: вебсайт. URL: <https://ecoaction.org.ua/publication> (дата звернення: 02.03.2026).

19. Дідух Я. П. Екосистемний підхід до оцінки збитків, завданих воєнними діями. *Visnik Nacional noi akademii nauk Ukraini*. 2022. Issue 6. P. 16–25. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.016>

20. Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEL for Estimating Erosion and Deposition in Ping River in Thailand / J. Laonamsai, P. Julphunthong, T. Saprathet et al. *Hydrology*. 2023. Vol. 10, № 3. P. 70. DOI: [10.3390/hydrology10030070](https://doi.org/10.3390/hydrology10030070).

21. Safranov T., Chugai A., Stepova O. Impact of military activities and hostilities on the ecosystem services of the North-Western Black Sea coastal zone. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2024. Issue 33. P. 81–87. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.06>

22. Fusion of Satellite and Drone Images for Identifying Water Bodies / A. Paula Barros, E. Jussara Dos Santos, F. Kristen Da Silva Pedro et al. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*. 2025. Vol. 32, Issue 1. P. 121–127. DOI: <https://doi.org/10.22456/2175-2745.143523>

23. Algaillani E., Hayder G. Assessment and spatial mapping of water quality parameters using QGIS: Creating a dynamic map. *Water Quality Research Journal*. 2025. Vol. 60, № 1. P. 109–123. DOI: <https://doi.org/10.2166/wqrj.2024.036>

24. Delimitação da área de reservatório de água utilizando técnicas de sensoriamento remoto no semiárido do Brasil / D. N. O. D. Almeida, D. C. D. S. Araújo, D. R. Soares et al. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*. 2023. Vol. 58, Issue 1. P. 20–29. DOI: <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781524>

25. Combining multiple shaded reliefs with hypsometric colouring and digital orthophotos using free and open-source software / A. Vinković, R. Župan, S. Frangeš et al. *Proceedings of the ICA*. 2021. Vol. 4. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-111-2021>

26. Вишневецький В. І. Річки і водойми України. Стан і використання. Київ : Віпол, 2000. 376 с.

### References:

1. Dmitriiev, S., & Reshetchenko, S. (2024). Natural and social consequences of military actions in the territory of Kharkiv region. *Human Geography Journal*, (36), 63–74. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-36-06>

2. Prokopenko, N., Nesterenko, S., & Dorozhko, Y. (2024). Geodesy and land management in solving problems of stability and safety of hydrotechnical structures, analysis of monitoring and diagnostic methods. *Spatial development*, (10), 519–530. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.519-530>

3. Zaliubovskiy, M., Filatova, K., & Zaliubovska, O. (2025). Space-time analysis of the impact of military operations on the territory of the Emerald Network within Kharkiv region. *Geographical Education and Cartography*, (42), 53–63. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2025-42-06>

4. Tiahno, Iu. V., & Drozd, O. M. (2023). Stan terytorii Oskil'skoho vodokhovyshcha v rezultati voien'nykh diy [The state of the territory of the Oskil reservoir as a result of military actions]. *Ekolohichno stalyi rozvytok urbosystem: vyklyky ta rishennia v konteksti yevrointehratsii Ukrainy: materialy Vseukr. nauk.-prakt. internet-konf.* (pp. 190–191). Kharkiv. <https://eprints.kname.edu.ua/65638/> [in Ukrainian].

5. *Scientific aspects of conserving and restoring natural resources under the modern development of society.* (2024). Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-511-2>

6. Ustinova, I., & Vlasenko, N. (2023). Ekotsyd ta povoienne vidnovlennia belihertatnykh landshaftiv Ukrainy: problemy, dosvid, perspektyvy [Ecocide and post-war restoration of belligerent landscapes of Ukraine: Problems, experience, prospects]. *Grail of Science*, (27), 558–668. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.113> [in Ukrainian].

7. Stepova, O., Shara, S., et al. (2024). Development of water protection in European countries: Relevance for Ukraine. *Environmental Problems*, 9(4), 249–253. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.249>

8. Stepova, O., Shara, S., et al. (2025). Monitoring and revitalization technologies of Dnipro

reservoirs. *Environmental Problems*, 10(4), 319–324. <https://doi.org/10.23939/ep2025.04.319>

9. Kalyna, T., Ostrovskiy, I., Pidbereznykh, I., et al. (2026). Suputnykovi tekhnolohii v otsyntsi ekolohichnykh naslidkiv viiny ta upravlinni vidnovlenniam zemelnykh resursiv [Satellite technologies in assessing the environmental consequences of war and managing the restoration of land resources]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*, 350(1), 613–620. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-83> [in Ukrainian].

10. *Plan vidnovlennia Ukrainy* [Ukraine recovery plan]. (n.d.). Retrieved March 2, 2026, from <https://recovery.gov.ua/> [in Ukrainian].

11. *Pro skhvalennia Stratehii ekolohichnoi bezpeky ta adaptatsii do zminy klimatu na period do 2030 roku* [On approval of the Environmental Security and Climate Change Adaptation Strategy until 2030]. (n.d.). Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy. Retrieved March 2, 2026, from <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-ekologichno-a1363r> [in Ukrainian].

12. Kaplan, G., Rashid, T., Gasparovic, M., et al. (2022). Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review. *Land Degradation & Development*, 33(10), 1513–1526. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>

13. Braslavskaya, O., Nesterenko, S., & Herasychuk, O. (2025). Remote geodetic monitoring: A key tool for sustainable land management. *Urban development and spatial planning*, (89), 488–502. <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2025.89.488-502>

14. *Dyrektyva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady pro vstanovlennia ramok zakhodiv Spivtovarystva v haluzi vodnoi polityky* [Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy]. (2000). Dyrektyva vid 23.10.2000 r. № 2000/60/YeS. Retrieved March 2, 2026, from [https://zakon.rada.gov.ua/go/994\\_962](https://zakon.rada.gov.ua/go/994_962) [in Ukrainian].

15. *Dyrektyva Rady pro okhoronu pryrodnykh oselyshch ta dykoi fauny i flory* [Council Directive on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora]. (1992). Dyrektyva vid 21.05.1992 r. № 92/43/YeES. Retrieved March 2, 2026, from [https://zakon.rada.gov.ua/go/987\\_004-92](https://zakon.rada.gov.ua/go/987_004-92) [in Ukrainian].

16. Velychko, S., & Dupliak, O. (2023). The impact of full-scale armed conflict on water bodies as water supply sources. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (45), 5–14. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14>

17. *Ukrainska pryrodoookhoronna hrupa.* (n.d.). *Vodno-bolotni uhiddia* [Wetlands]. Retrieved March 2, 2026, from <https://uncg.org.ua/vbu/> [in Ukrainian].

18. Ekodiia. (n.d.). *Publikatsii Ekodii* [Ecoaction publications]. Retrieved March 2, 2026, from <https://ecoaction.org.ua/publication>
19. Didukh, Ia. P. (2022). Ekosystemnyi pidkhd do otsinky zbytkiv, zavdanykh voennyimi diiamy [Ecosystem approach to assessing damage caused by military actions]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (6), 16–25. <https://doi.org/10.15407/visn2022.06.016> [in Ukrainian].
20. Laonamsai, J., Julphunthong, P., Saprahet, T., et al. (2023). Utilizing NDWI, MNDWI, SAVI, WRI, and AWEI for estimating erosion and deposition in Ping River in Thailand. *Hydrology*, 10(3), 70. <https://doi.org/10.3390/hydrology10030070>
21. Safranov, T., Chugai, A., & Stepova, O. (2024). Impact of military activities and hostilities on the ecosystem services of the North-Western Black Sea coastal zone. *Ukrainian hydrometeorological journal*, (33), 81–87. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.06>
22. Paula Barros, A., Jussara Dos Santos, E., Kristen Da Silva Pedro, F., et al. (2025). Fusion of satellite and drone images for identifying water bodies. *Revista de Informática Teórica e Aplicada*, 32(1), 121–127. <https://doi.org/10.22456/2175-2745.143523>
23. Algailani, E., & Hayder, G. (2025). Assessment and spatial mapping of water quality parameters using QGIS: Creating a dynamic map. *Water Quality Research Journal*, 60(1), 109–123. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2024.036>
24. Almeida, D. N. O. D., Araújo, D. C. D. S., Soares, D. R., et al. (2023). Delimitação da área de reservatório de água utilizando técnicas de sensoriamento remoto no semiárido do Brasil [Delimitation of the water reservoir area using remote sensing techniques in the Brazilian semiarid region]. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 58(1), 20–29. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781524>
25. Vinković, A., Župan, R., Frangeš, S., et al. (2021). Combining multiple shaded reliefs with hypsometric colouring and digital orthophotos using free and open-source software. *Proceedings of the ICA*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-111-2021>
26. Vyshnevskyi, V. I. (2000). *Richky i vodoimy Ukrainy. Stan i vykorystannia* [Rivers and reservoirs of Ukraine. State and use]. Vipol [in Ukrainian].

© А. М. Карюк, Р. А. Міщенко, В. В. Козлов, 2026

**Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 16.03.2026.

Прийнята до друку 29.04.2026.

Опублікована 25.05.2026.