



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.296>

УДК 556.5: 528.8 (502)

Картування просторово-часових трансформацій ложа колишнього Каховського водосховища після руйнування греблі за супутниковими знімками Sentinel-2

Ліщенко Л. П., <https://orcid.org/0000-0001-6766-6884>

Козлова А. О., <https://orcid.org/0000-0001-5336-237X>

Андреев А. А. *, <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”,
бул. Олеса Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Після руйнування греблі Каховського водосховища 6 червня 2023 р. відбувся швидкий скид води і масштабне оголення його ложа. Просторово-часові трансформації ложа колишнього водосховища тривають і досі, формуючи нові природні комплекси з неоднорідними умовами зволоження. Динаміка розподілу водного покриву в ложі залежить від багатьох чинників – не лише від геоморфологічних особливостей території, але й від кліматичних чинників: сезонних змін температури повітря, кількості опадів та рівня випаровування. Оцінювання цих показників є важливим для прогнозування подальших змін ландшафту та визначення перспектив його використання. Проте в умовах ведення активних воєнних дій наземні дослідження неможливі на обраній території, тому були використані дані дистанційного зондування Землі. Для аналізу просторово-часових трансформацій ложа водосховища розроблено алгоритм побудови карти частоти присутності води (КЧПВ) на основі супутникових багатоспектральних знімків Sentinel-2.

Побудова КЧПВ відбувається в чотири кроки: 1) відбір знімків відповідно до зазначених вимог; 2) розрахунок спектрального індексу NDWI для кожного з відібраних знімків; 3) конвертація кожного отриманого шару індексу в бінарну маску води; 4) об'єднання всіх отриманих масок в КЧПВ, яка відображає частоту, з якою вода була присутня в кожному пікселі. Таким чином, відповідно до розробленого алгоритму було побудовано КЧПВ ложа колишнього Каховського водосховища на основі відібраних 12 безхмарних супутникових знімків Sentinel-2, отриманих за період з 20 червня 2023 до 23 вересня 2024. Для візуалізації і оцінки результатів отримана КЧПВ була розподілена на 6 класів, де 1 клас відповідає пікселям, які ніколи не були вкриті водою, тобто відносяться до суходолу, тоді як 6 клас містить піксели, в яких вода була присутня протягом всього періоду дослідження, тоді як 2–5 класи містять проміжні значення частоти присутності води та відповідають пікселям, де вода була присутня, але не постійно. Для кожного з цих класів було обчислено їхню площу й детально описано екотопи, що їм відповідають, та рослинність, яка там формується. Враховуючи, що метеорологічні умови (опадів та температура повітря) також впливають на водний режим, також було проаналізовано дані з метеостанцій міст Запоріжжя, Нікополь та Херсон і показано відповідність цих даних змінам площі водної поверхні ложа водосховища. Отже, отримана КЧПВ допомагає прогнозувати режим подальшого формування та розвитку екосистем.

Ключові слова: Каховське водосховище, водний режим, частота присутності води, екосистеми, екотопи, дистанційне зондування Землі, Sentinel-2, NDWI.

© Л. П. Ліщенко, А. О. Козлова, А. А. Андреев. 2025

Вступ

Руйнування греблі Каховської ГЕС (6 червня 2023 р.) спричинило неконтрольований скид 18 км³ води, що призвело до різкого осушення ложа водосховища та затоплення значних територій нижнього Дніпра. Ця подія викликала величезний резонанс як в нашій країні, так і у світі і класифікувалася як масштабна екологічна катастрофа. Її вплив на подальший екологічний стан цієї та прилеглих територій спонукає

науковий світ констатувати факти, аналізувати, оцінювати і висувати певні прогнози (Shumilova et al., 2025; Саніна та ін., 2023).

Втрата стабільного водного режиму зумовила кардинальні гідрологічні та екосистемні зміни, вплинувши на структуру новоутвореного рельєфу, склад ґрунтового покриву, активізацію небезпечних геологічних процесів, коливання рівня підземних вод, стан біоти (Попов та ін, 2024).

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: A. Andreiev / А. А. Андреев / artem.a.andreev@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Просторово-часовий розподіл води в ложі колишнього водосховища або частота, з якою вода була присутня на поверхні протягом певного періоду, є важливим чинником формування місцевого клімату, гідрологічного режиму та сценаріїв подальшого зародження та розвитку біоти, а отже утворення певних екосистем (Орещенко, 2024; Василюк та ін., 2025). Таким чином, моніторинг і картування цього параметра сприятиме кращому розумінню шляхів і характеру відновлення екосистеми колишнього ложа в нових умовах, що склалися після руйнування дамби.

Наземні дослідження ложа водосховища є неможливими, з огляду на активні воєнні дії та значну площу території дослідження. Тому єдиним доступним джерелом даних є дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), яке дає змогу безпечно та регулярно отримувати геопросторові дані про стан території (Huang et al., 2018; Pekel et al., 2016; Yang et al., 2020). Для оцінювання просторово-часових змін площі водного дзеркала використаний комплексний підхід, що поєднує аналіз даних ДЗЗ та метеорологічних показників. Дані ДЗЗ, зокрема багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2, дають змогу визначати площу та частоту присутності води територій (Kozlova et al., 2024; Ліщенко та Філіпович, 2024; Huang et al., 2018), тоді як за допомогою метеоданих можна оцінити вплив температури повітря та опадів на водний баланс.

Мета дослідження

Проаналізувати просторово-часові зміни ложа Каховського водосховища після його осушення, а саме динаміку водної поверхні за багатозональними супутниковими даними, перерозподіл вологи та прогноз розвитку рослинного покриву при певній частоті присутності води. Дослідити передумови формування нових природних комплексів і певних екотопів, що залежать від структури рельєфу колишнього дна водосховища, коливання метеорологічних показників та частоти забезпеченості водою.

Методи дослідження

У рамках цієї роботи, для отримання карти частоти присутності води (КЧПВ), були використані багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2. Такий вибір зумовлений тим, що саме ці дані мають найвищу просторову розрізненість (10 м) серед усіх інших супутникових знімків, що є у відкритому доступі. Вибираючи вхідні знімки, необхідно дотримуватися таких вимог:

1) повне охоплення території дослідження (оскільки один знімок Sentinel-2 не завжди охоплює територію дослідження повністю, повне покриття може досягатися шляхом формування мозаїк із кількох суміжних сцен);

2) відсутність хмар та тіней від хмар;

3) рівень оброблення знімків має бути L2A (Gascon et al., 2017).

Блок-схема алгоритму побудови КЧПВ зображена на Рис. 1. Нижче подано покроковий опис запропонованого алгоритму.

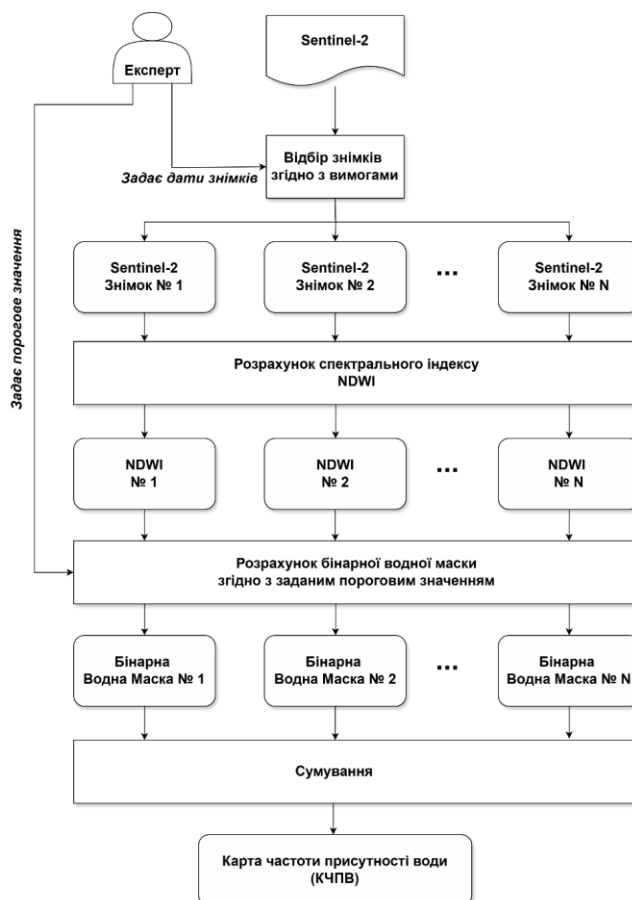


Рис. 1. Блок-схема алгоритму побудови карти частоти присутності води (КЧПВ)

На першому кроці для кожного з відібраних знімків Sentinel-2 розраховується спектральний індекс *NDWI* (Gao, 1996). Цей індекс є найбільш поширеним для картування водної поверхні. Розрахунок цього індексу виконується за формулою:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}, \quad (1)$$

де *Green* – значення в зеленому каналі знімка Sentinel-2, *NIR* – значення в ближньому інфрачервоному каналі знімка Sentinel-2.

Другий крок передбачає розрахунок водної маски на основі отриманого індексу *NDWI*. Ця водна маска є бінарною, де кожен піксел має одне з двох значень: 0 – вода відсутня, 1 – вода присутня. Для розрахунку такої маски експерт має задати порогове значення індексу *NDWI* у такий спосіб, щоб всі значення *NDWI*, які нижче за нього, були віднесені до суші, а значення, що вище за нього, відносяться до води. Попіксельний розрахунок такої водної маски *WM* описано у формулі нижче:

$$WM(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } NDWI(x) \geq T \\ 0, & \text{якщо } NDWI(x) < T \end{cases} \quad (2)$$

де $WM(x)$ – це значення водної маски в пікселі x , $NDWI(x)$ – значення індексу $NDWI$ в пікселі x , T – порогове значення, задане експертом.

Третій крок – власне розрахунок КЧПВ. Для побудови цієї карти виконується попіксельна сума всіх отриманих раніше водних масок. Значення в кожному пікселі КЧПВ розраховується за формулою:

$$SWOM(x) = \frac{\sum_{i=1}^N WM_i(x)}{N} * 100\%, \quad (3)$$

де $SWOM(x)$ – значення частоти присутності води у пікселі x (у відсотках, %); N – загальна кількість днів спостережень; $WM_i(x)$ – значення бінарної водної маски у пікселі x на i -му знімку.

Отримана КЧПВ у кожному пікселі відображає відсоток від загальної кількості днів спостережень, коли вода була присутня в розглянутому пікселі. Тобто пікселі мають значення від 0% до 100%, де 0% – вода була відсутня протягом всіх розглянутих днів спостережень, а 100% – вода була присутня протягом всіх розглянутих днів спостережень.

Включення метеорологічних даних у дослідження дає змогу провести комплексний аналіз, враховуючи не лише поточний стан водної поверхні, а й його залежність від зовнішніх кліматичних факторів. Серед параметрів, які розглядаються в цій роботі: температура повітря та кількість опадів, відхилення цих показників від середньої норми, встановленої за останні 30 років. Джерелом таких даних обрано місцеві метеостанції.

Експеримент

У рамках експерименту відповідно до визначених вимог були відібрані 13 знімків Sentinel-2, отриманих у період з 5 червня 2023 по 23 вересня 2024 р. Слід зазначити, що знімок від 5 червня 2023 р. було використано виключно як базову еталонну сцену для визначення площі водного дзеркала до руйнування (100% покриття водою), але він не включався в побудову КЧПВ. Для кожної дати було відібрано мозаїку Sentinel-2, яка не містила хмар та тіней від хмар у межах території дослідження. Візуальний контроль проводився вручну, що давало змогу виключити сцени з будь-якою хмарністю над територією дослідження.

Таким чином, розрахунок частоти наявності води проводився за 12 знімками, отриманими з 20 червня 2023 по 23 вересня 2024 р. Серед обраних дат 3 знімки за 2023 р.: 20 червня, 13 вересня та 18 жовтня; а також 9 знімків за 2024 р.: 11 березня, 31 березня, 30 квітня, 25 травня, 9 червня, 14 липня, 23 серпня, 7 вересня та 22 вересня. Враховуючи великий обсяг даних, для оброблення та завантаження супутникових знімків було використано хмарну платформу для геопросторового аналізу даних Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017).

На основі кожного з 12 знімків розраховано спектральний індекс $NDWI$, використовуючи формулу (1). Далі для кожного з цих індексів було отримано водну бінарну маску за формулою (2). Для цього експертом було задано порогове значення $NDWI - 0.05$ так, що всі пікселі, значення яких нижче порогового значення, вважаються не водою, а ті пікселі, значення яких вище порогового значення, відносяться до води. На Рис. 2 зображено водні маски за такі дати: 20 червня та 13 вересня 2023 р., 31 березня та 22 вересня 2024 р. Такі дати вибрані, тому що дата 1 – стабілізація рівня після сходу води; дата 2 – мінімальна площа водної поверхні протягом 2023 р., період межені; дата 3 – максимальна площа під час весняного водопілля 2024 р.; дата 4 – мінімальна площа водної поверхні у 2024 р., період межені.

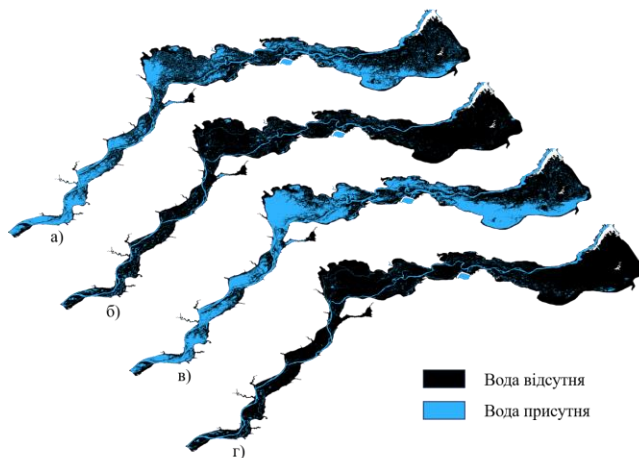


Рис. 2. Водні бінарні маски за
а) 20 червня 2023 р., б) 13 вересня 2023 р.,
в) 31 березня 2024 р., г) 22 вересня 2024 р.

Відповідно до отриманих водних бінарних масок було розраховано площу водної поверхні для кожної з 12 обраних дат спостережень. Ці дані відображені на Рис. 3. Площа кожної дати подана у відсотках, де 100% – це площа водного дзеркала до руйнування дамби (5 червня 2023 р.).

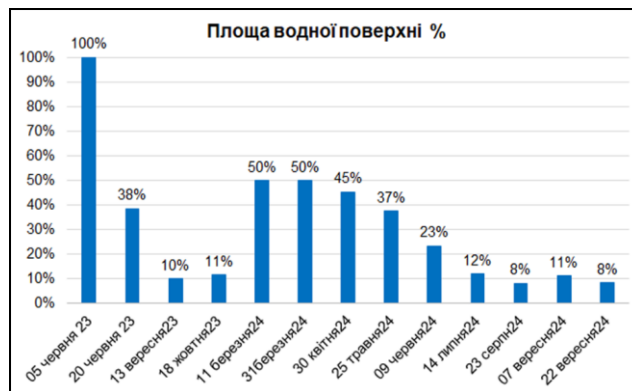


Рис. 3. Розподіл площі водної поверхні за датами спостережень.

На основі отриманих водних масок було побудовано КЧПВ згідно з (3). Ця карта вказує у

відсотках частоту присутності води в кожному пікселі в період з 20 червня 2023 р. по 23 вересня 2024 р. Для оптимізації і візуалізації отриману КЧПВ було розподілено на 6 класів. Клас 1 відповідає пікселям, в яких вода була відсутня протягом усього періоду дослідження, тому пікселі цього класу мають значення 0%. Клас 2 відповідає частоті наявності води від 1% до 25%, клас 3 – від 25% до 50%, клас 4 – від 50% до 75%, клас 5 – від 75% до 99%. Тоді як до класу 6 відносяться пікселі, де вода була присутня на всіх розглянутих водних масах, тому пікселі 6-го класу мають значення 100%. Карту класифікації ложа водосховища за частотою зображено на Рис. 4.

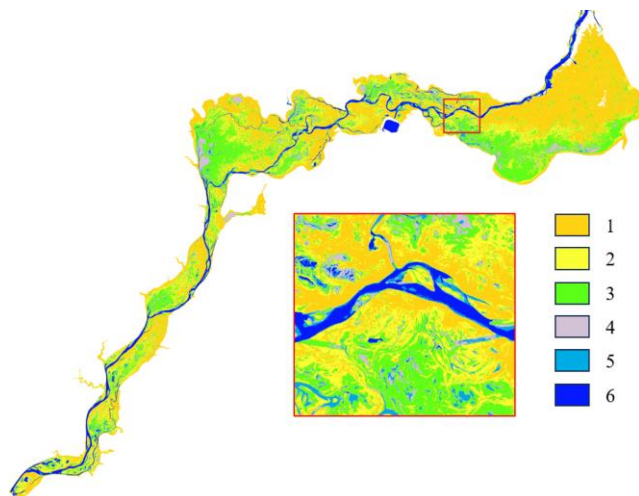


Рис. 4. Карта частоти присутності води ложа водосховища (з 20 червня 2023 р. по 23 вересня 2024 р.)

За отриманою картою було розраховано площу кожного з 6 класів. Ці дані відображені на Рис. 5.

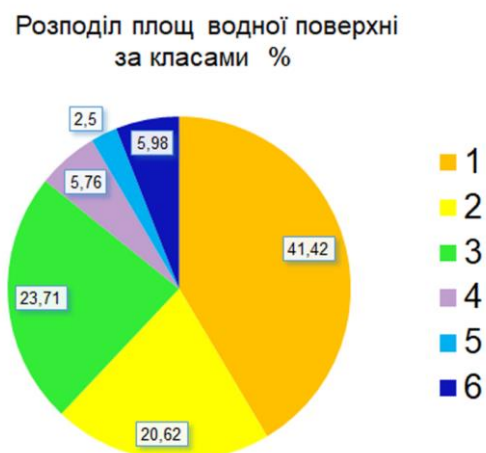


Рис. 5. Розподіл площі водної поверхні за класами частоти присутності води

Крім супутникових даних, також були проаналізовані метеорологічні дані (температура повітря та опади) з червня 2023 до вересня 2024 р. Такі дані були отримані з метеостанцій міст Запоріжжя, Нікополь, а також Херсона, хоча останній і знаходиться нижче водосховища, але має вплив на формування клімату водозбірного басейну Нижнього Дніпра. На поданих графіках (Рис. 6) показано порівняння фактичної, середньої температури та опадів і відхилення цих показників від середніх норм за тридцятирічний період.

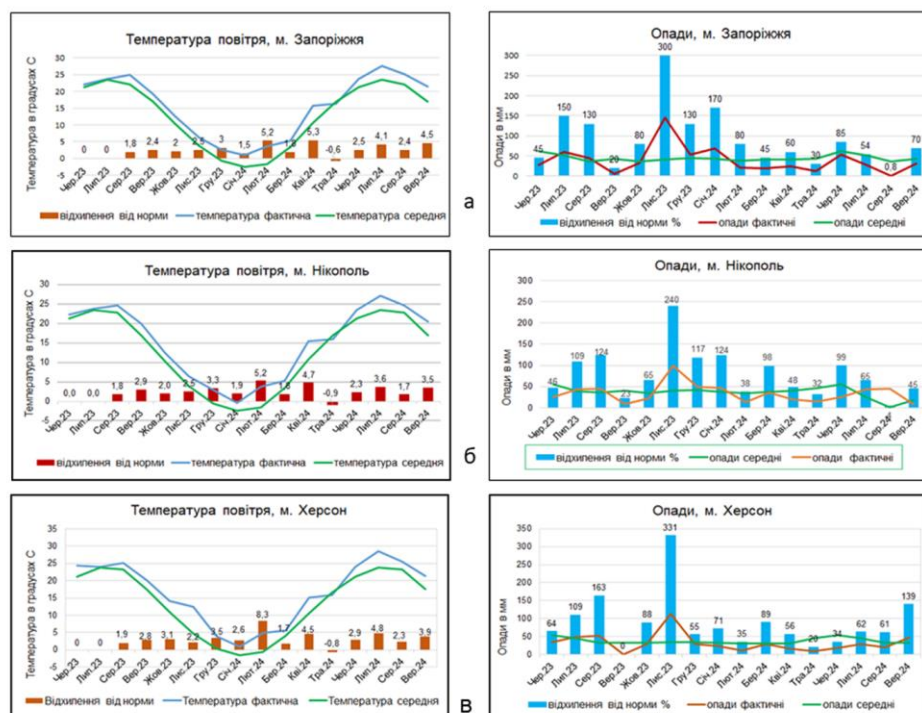


Рис. 6. Дані температури повітря та опадів (фактичні, середні та відхилення від норми) для м. Запоріжжя (а), Нікополь (б), Херсон (в)

Аналіз метеорологічних показників демонструє, що температура повітря, починаючи з серпня 2023 р. і до квітня 2024 р., мала перевищення відносно норми від 2°C до 5°C. Максимальні відхилення температури від середньої норми були зафіксовані у лютому (+5,1°C) та квітні (+4,7°C) 2024 р. Підвищена температура сприяла активному висиханню водойм, що призвело до поступового зменшення площі водного покриття в осінньо-зимовий період.

При цьому, з жовтня 2023 по січень 2024 р. кількість опадів перевищувала норму, а максимальні опади були зафіксовані у листопаді, коли випало 240% місячної норми опадів для Нікополя і більш за 300% для Запоріжжя і Херсона. Це тимчасово затримало процес висихання водойм і накопичення вологості.

Навесні 2024 р. підвищена кількість опадів та інтенсивне танення снігу в басейні Дніпра призвели до короткочасного весняного водопілля. Відповідно до вищезазначених супутникових даних, у цей період площа водної поверхні тимчасово збільшилася досягнувши майже 50% площі колишнього ложа. Однак цей ефект був нетривалим – уже з травня 2024 р. через аномально високі температури (перевищення температури повітря для Нікополя на 3,6°C, а для Запоріжжя і Херсона – на 4,8°C) та дефіцит опадів, площа водної поверхні почала знову скорочуватися.

Обговорення

Просторовий розподіл води та диференціація за частотою присутності її в ложі водосховища залежить від багатьох чинників і є важливим показником для оцінювання екологічної ситуації, що складається при різних умовах забезпечення вологою.

Коливання рівня води, а отже зміна площ, що затоплюються, відбуваються під час періодичних попусків води з верхніх водосховищ, частково дренажування навколишньої території (водозбірного басейну) та в значною мірою залежать від температури та опадів, а також випаровування. Дані про попуски води з верхніх водосховищ є непередбачуваними, але цілком залежать від погодних умов, що склались у всій річковій системі всього Дніпра.

Як свідчать проаналізовані метеодані за досліджуваний період, саме підвищені опади викликали значне водопілля у 2024 р. та значний запас вологості став сприятливим і достатнім для вегетації рослинності в літній період. Проте, температура літніх місяців підвищила евапотранспірацію з ґрунту, рослинності та з поверхні води. А дефіцит опадів в літньо-осінній період 2024 р. викликав суттєве скорочення водної поверхні в колишньому ложі з 37% у травні до 8,2% у вересні, що і зафіксували розрахунки Sentinel-2.

Розподіл води в ложі спущеного Каховського водосховища, глибина та площа водойм залежить від складного рельєфу, який існував до створення водосховища у 1956–1958 роках, а це: висока і низька

заплави, частково перша надзаплавна тераса, острови в заплаві, протоки, рукави, меандри, конуси виносу і делювіальні шлейфи, сформовані схилівими ерозійними та гравітаційними процесами. У процесі експлуатації водосховища існуючі форми рельєфу надалі були перекриті алювіальним осадам з великою кількістю біогенного матеріалу.

Порівняння історичних карт та аерознімання 1943 р. із супутниковим зображенням після підризу дамби в червні 2023 р. засвідчує в цілому успадкованість основних морфологічних особливостей рельєфу, що повно відображено на сайті oldmaps.dn.ua – *Інтерактивні історичні карти Дніпра*. Цей феномен демонструвався неодноразово в багатьох публікаціях, які порівнювали рельєф до затоплення і після осушення ложа водосховища (Попов та ін, 2024; Kozlova et al., 2024; Ліщенко, Філіпович, 2024). На часткову перебудову елементів рельєфу вплинули як природні донні процеси, так і техногенні втручання, такі як створення каналу, що веде до ЗАЕС, побудова ставка-охолоджувача, прокладання ЛЕП через водосховище, облаштування водозаборів води.

Оскільки існуючі до затоплення гіпсометричні та батиметричні карти зазнали змін і є варіабельними в межах колишнього ложа, саме розподіл води по поверхні успадковує і засвідчує особливості будови ложа Каховського водосховища за різних умов водності.

Донні відклади, що накопичені протягом 68 років існування водосховища, розподілені в колишньому ложі також нерівномірно, вони не змогли суттєво знівелювати рельєф. Потужність осаду, його літологічний та гранулометричний склад залежать від проточності, присутності зважених речовин та складу порід берегової лінії та схилів, що розвивалася, і може змінюватися від 0 до 1,5–3,0 м. Геохімічний аналіз, проведений на деяких ділянках за час існування водосховища (Альошина, 2008) і після його осушення, свідчить про високе забруднення осаду сполуками фосфору, азоту, важкими металами (марганець, цинк, кадмій, мідь, свинець, нікель), що є небезпечними (Shumilova et al., 2025). Під час повеней і коливання рівня іде суттєвий перерозподіл мінеральних і органічних донних відкладів та міграція вміщуючих їх токсичних хімічних елементів та сполук в межах ложа. При оголенні окремих ділянок під час тривалої посухи може відбуватися вітрова ерозія і розпилення забруднення по площі.

Тип субстрату, його хімічне забруднення та новоутворювані ландшафтно-геохімічні бар'єри повною мірою залежать від режиму обводнення окремих ділянок. А притаманні кожній ділянці певні умови існування (едафічні умови), зокрема і *частота присутності води*, обумовлюють формування різних швидкозмінюваних гідроморфних біотичних рядів.

Розрахований нами показник частоти присутності води та побудована КЧПВ дали змогу не тільки виділити класи, але й, враховуючи вищезазначені

особливості колишнього ложа та процесів, що в ньому відбуваються, описати екотопи, що можуть характеризувати кожний із класів.

До 1 класу частоти присутності води, який становить 41,62% від усієї площі водосховища, відносяться осушені ділянки, що вже ніколи після підриву дамби не покривались водою. Це підвищені ділянки Кінських плавнів та піщаний соловий масив Великі Кучугури у північно-східній частині, ділянки високих заплав, надзаплавних терас, раніше зайнятих лісом, луками, городами, прибережними селитебними зонами. Вони були слабопроточними мілководдями під час існування Каховського водосховища. Такі ділянки можуть відчувати дефіцит вологи при вегетації в період межень, коли рівень ґрунтових вод знижується. Займаючи великі площі, вони чергуються з мілкими озерами в дефляційних западинах між піщаними кучугурами та пересихаючими водоймами, що розташовуються в центральній субширотній та південній субмеридіальній частині колишнього ложа водосховища. Також до 1 класу відносяться ділянки присхилової смуги вздовж водосховища, які до затоплення були покриті сухопутною деревною рослинністю. Для 1 класу характерне формування біотопів із засухостійкою (псамофітною та ксерофітною) трав'яною та деревною рослинністю.

2 клас з частотою присутності води до 25% за період спостереження займає 20,62% території. Це припідняті ділянки прируслових піщаних та детритових акумулятивних поверхонь у вигляді валів, кіс, банок, вони піддаються швидкій перебудові, локалізуються вздовж проточного русла та уздовж штучно укріпленої берегової лінії водосховища, є нестійким перехідним класом, існування якого суттєво залежить від гідрометеорологічних умов. Вони заростають піонерною ксерофітною рослинністю. В південній субмеридіальній частині ложа водосховища – це перехідні нестабільні зони між підвищеннями і мілководдям, формуються навколо мілких заплавних водойм.

Із 3 класом зіставляються вирівняні, вкриті потужним муловим осадам, поверхні колишніх заплавних лук, що мають частоту присутності води від 25 до 50%, які є сприятливими для вегетації. Наразі вони інтенсивно заростають деревною вологолюбивою рослинністю, переважно самонасивною вербою, тополею, диною грушою. Охоплюють 23,71% території ложа водосховища.

До 4 класу частоти присутності води відносяться невеличкі заплавні озера та понижені ділянки колишніх плавнів (Базавлуцькі, Новопавлівські, пониження Кінських плавнів), прибережні вологі території в місцях, де відбувається розвантаження ґрунтових і поверхневих вод з припливів і ерозійної мережі суходолу. Приурочені до ложа водосховища біля населених пунктів Кушугум, Василівка, Марганець, Новопавлівка, Нововоронцівка. Осокорівка, Дудчани, Кам'янська Січ та ін. Ці ділянки, що пересихають лише у межневий період мають

частоту покриття водою 50–75%. Вони займають 5,76% території ложа водосховища та покриті водно-болотною рослинністю (очерети, водоплавна рослинність).

5 клас частоти присутності водної поверхні займає окремі тимчасово пересихаючі ділянки річищ, стариць або обмілілі ділянки русла. До цього класу також належать окремі протоки, рукави та заростаючі ділянки мілководдя лиманів. Частота присутності води цього класу становить 75–99%. На них припадає лише 2,5% площі ложа водосховища.

До 6 класу відносяться території, на яких вода була присутня протягом всього періоду досліджень. Цей клас включає постійно покриті водою ділянки основного русла Дніпра та деякі не пересихаючі протоки (частково русло Конки у верхній і нижній течії), Білозерський лиман, став-охолоджувач ЗАЕС та окремі успадковані заплавні озера на субмеридіальній ділянці південного відтинку ложа водосховища. Також постійна присутність водної поверхні зберігається в місцях припливів рік Чортомлик. Базавлук та Томаківка та на ділянці Рогачицького лиману. Площа цього класу становила 6% від усієї площі ложа.

Різні режими просторово-часового розподілу води та виділені класи свідчать про тенденцію формування певних едафічних умов та розвиток відповідних екотопів, що надалі створить відповідне біорізноманіття території, яка належала колишньому ложу Каховського водосховища.

Висновки

На основі часового ряду багатоспектральних супутникових знімків побудована *карта частоти присутності води*, яка дає змогу диференціювати територію залежно від режиму зволоження ложа водосховища, що сприяє формуванню певних абіотичних умов та характеру біоти, що буде надалі там розвиватися.

Частота присутності води протягом року залежить від метеорологічних умов (повені, межень) та надходження води з водосховищ верхнього Дніпра. Вони сприяють формуванню водного живлення та екологічних умов для існування біоценозів. Виконавши класифікацію ложа водосховища за частотою присутності води за період з 20 червня 2023 до 26 вересня 2024 р. можна зробити висновок, що слабо заростають лише 2,5% поверхні ложа, що становлять піщані та детритові поверхні, обломковий матеріал та відмерлі біогенні рештки вздовж русла та його обмілілих ділянок. Вони можуть суттєво перебудовуватися у період водопілля, змінюючи конфігурацію та склад відкладів. Після спуску водосховища ніколи не заливалось водою 41,2% площі ложа і тільки на 6% території завжди була вода. Близько 21% площі були забезпечені водою в період водопілля. На чверті площі колишнього ложа вода була присутня від 25 до 50% періоду часу

дослідження. А в період межені пересихало 5,76% площі колишнього ложа, це так звані лимани (4 клас).

Отримана нами карта частоти присутності води допомагає прогнозувати режим подальшого формування та розвитку екосистем. В умовах дефіциту вологи, який притаманний південним районам, найбільш родючими і стійкими виявляються екосистеми, що мають частоту покриття водою 3–4 класу, а це займає до 30% площі ложа Каховського водосховища.

Подальші дослідження потрібно спрямувати на продовження часового ряду спостережень для районування колишнього ложа Каховського водосховища відповідно до режиму обводнення, що допоможе у вивченні новоутворених біоценозів та екосистем, а також у прогнозуванні сценаріїв подальшого існування та функціонального використання ложа. Окрім того, слід залучити дані про тип субстрату та хімічне забруднення, а саме – склад токсичних і поживних елементів та ландшафтно-геохімічні бар'єри, що будуть властиві кожному з виділених класів. Також надалі слід використовувати радіолокаційні дані (Kozlova et al., 2018; Sazonenko et al., 2024) для забезпечення неперервності спостережень, адже ці дані доступні навіть за наявності хмар.

Пропозиції. Майже 42% площі водосховища вже три роки не покривались водою, тому ці території інтенсивно заростають, і у разі побудови нової греблі вони утворюють непроточні мілководдя із застійним режимом.

Тільки ділянки, що відносяться до 4 та 5 класів частоти присутності води, можуть бути задіяні під локальні водосховища. А саме – гирлові частини рік і крупних балок, серед яких Томаківка, Базавлук та Великогорогачицька, де є постійні водотоки, водозбір та надходження води та де можуть бути побудовані захисні дамби.

Внесок авторів: Концептуалізація – Л. П. Ліщенко та А. О. Козлова; методологія – А. А. Андреєв; формальний аналіз та оброблення даних – А. А. Андреєв; дослідження – А. А. Андреєв, Л. П. Ліщенко, підготовка тексту статті – А. А. Андреєв, Л. П. Ліщенко; рецензування та редагування – А. О. Козлова. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження виконано в рамках НДР “Дистанційні методи вирішення задач сталого розвитку і раціонального природокористування, засновані на комплексному аналізі гетерогенних геопросторових даних”, РК 0224U000990.

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні Національній академії наук України за підтримку цього дослідження. Ми також вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Author Contributions: Conceptualization – L. P. Lischenko and A. O. Kozlova; Methodology – A. A. Andreiev; Formal Analysis and Data Processing – A. A. Andreiev; Investigation –

A. A. Andreiev, L. P. Lischenko; Writing – Original Draft Preparation – A. A. Andreiev and L. P. Lischenko; Writing – Review & Editing – A. O. Kozlova. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was carried out within the framework of the R&D project “Remote methods for addressing sustainable development and rational land use issues based on comprehensive analysis of heterogeneous geospatial data”, RC 0224U000990.

Data Availability Statement: Data available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments: The authors are grateful to the National Academy of Sciences of Ukraine for supporting this research. We are also grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest

Література

- Альохіна, Т. М. (2008). Важкі метали у донних відкладах водосховищ. *Геологоекологічні проблеми Каховського водосховища*, 30–32.
- Василюк, О. В., Колодежна, В. В., Бузевич, І. Ю., Демченко, В. О., Куземко, А. А., Максименко, М. Л. ... Філіота, К. О. (2025). *Великий Луг чи Каховське водосховище: сучасне бачення*. Вип. 2. Чернівці: Друк Арт. ISBN 978-617-8501-03-7.
- Ліщенко, Л. П., Філіпович, В. Є. (2024). Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 11(1), 21–31. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2024.11.1.257>.
- Орещенко, А. (2024). *Аналітичні матеріали Українського гідрологічного інституту щодо підриву рф Каховської ГЕС та зневоднення Каховського водосховища*. Київ: УкрГМІ. <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf>.
- Попов, М. О., Ліщенко, Л. П., Філіпович, В. Є., Лубський, М. С., Козлова, А. О., Пестова, І. О. ... Андреев, А. А. (2024). *Катастрофа Каховського водосховища: свідчать супутникові знімки*. (Ред. М. О. Попов) Київ: ТОВ “Українська Картографічна Група”.
- Саніна, І. В., Люта, Н. Г. (2023). Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України*. 2. 50–55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55>.
- Gao, B. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3).
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J. ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products Validation status. *Remote Sensing*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- 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>.
- Kozlova, A., Khyzhniak, A., Piestova, I., & Andreiev, A. (2018). Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for analysis of urban development and green spaces. In *17th International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects*. 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801846>.

- Kozlova, A., Lischenko, L., Andreiev, A., Lubskyi, 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>.
- Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
- 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>.
- Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S. ... Grossart, H. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387(6739), 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>.
- Yang, X., Chen, Y., & Wang, J. (2020). Combined use of Sentinel-2 and Landsat 8 to monitor water surface area dynamics using Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 11(7), 687–696. <https://doi.org/10.1080/2150704x.2020.1757780>.
- Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects.1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801846>.
- Kozlova, A., Lischenko, L., Andreiev, A., Lubskyi, 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>.
- 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/uirs.2024.11.1.257> (in Ukrainian).
- 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*. Kyiv: UkrHMI. <https://uhmi.org.ua/pub/books/Kakhovka-reservoir-annual.pdf> (in Ukrainian).
- Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
- Popov, M. O., Lischenko, L. P., Filipovych, V. Y., Lubskyi, M. S., Kozlova, A. O., Piestova, I. O. ... Andreiev, A. A. (2024). *Kakhovka reservoir disaster: satellite imagery evidence*. (Ed. M. Popov). Kyiv: Ukrainian Cartographic Group LLC.
- Sanina, I., Liuta, N. (2023). Environmental consequences of the Kakhovka hydroelectric power plant dam explosion and ways to improve water supply to the population. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 50–55. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.50-55> (in Ukrainian).
- 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>.
- Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S. ... Grossart, H. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387(6739), 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>.
- Vasyliuk, O. V., Kolodezhna, V. V., Buzevych, I. Yu., Demchenko, V. O., Kuzemko, A. A., Maksymenko, M. L. ... Filiuta, K. O. (2025). *Velykyi Luh or the Kakhovka Reservoir: a modern view*. Issue 2. Chernivtsi: Druk Art. ISBN 978-617-8501-03-7 (in Ukrainian).
- Yang, X., Chen, Y., & Wang, J. (2020). Combined use of Sentinel-2 and Landsat 8 to monitor water surface area dynamics using Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 11(7), 687–696. <https://doi.org/10.1080/2150704x.2020.1757780>.

References

- Aliokhina, T. M. (2008). Heavy metals in bottom sediments of reservoirs. *Geological and ecological problems of the Kakhovka Reservoir*, 30–32. (in Ukrainian).
- Gao, B. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3).
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J. ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A calibration and products Validation status. *Remote Sensing*, 9(6), 584. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- 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>.
- Kozlova, A., Khyzhniak, A., Piestova, I., & Andreiev, A. (2018). Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for analysis of urban development and green spaces. In *17th International*

MAPPING OF THE SPATIOTEMPORAL TRANSFORMATIONS OF THE FORMER KAKHOVKA RESERVOIR BED AFTER DAM DESTRUCTION USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGERY

Lischenko L., <https://orcid.org/0000-0001-6766-6884>

Kozlova A., <https://orcid.org/0000-0001-5336-237X>

Andreiev A., <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Olesia Honchara str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

After the destruction of the Kakhovka Reservoir dam on June 6, 2023, a rapid water outflow occurred, resulting in the extensive exposure of the reservoir bed. The spatiotemporal transformations of this bed are ongoing, resulting in the formation of new natural complexes with heterogeneous moisture conditions. The dynamics of water area distribution within the bed depend not only on geomorphological features but also on climatic factors such as seasonal temperature variations, precipitation levels, and evaporation rates. Assessing these indicators is crucial for forecasting future landscape changes and evaluating their potential use.

However, due to active military actions in the region, ground-based research was not feasible; therefore, remotely sensed data was utilized. An algorithm was developed to construct a Surface Water Occurrence Map (SWOM) using Sentinel-2 multispectral imagery. The SWOM construction involves four steps: 1) selection of satellite images due to the specified requirements; 2) calculation of the NDWI spectral index for each image; 3) conversion of each NDWI layer into a binary water mask; and 4) fusion of all water masks into a single SWOM that reflects the frequency of surface water occurrence in each pixel.

Following this algorithm, the SWOM of the former Kakhovka Reservoir bed was generated based on 12 cloud-free Sentinel-2 images acquired between June 20, 2023, and September 26, 2024. For visualization and interpretation, the obtained SWOM was divided into six classes. Class 1 represents pixels that were never covered by water (dry land), while Class 6 includes those where water was present throughout the entire study period. Classes 2 – 5 reflect intermediate frequencies. For each class, the area and ecological characteristics (i.e., ecotopes and vegetation) were analyzed in detail. Considering that meteorological conditions (precipitation and air temperature) affect the hydrological regime, data from weather stations in the cities of Zaporizhia, Nikopol, and Kherson were also analyzed. The study reveals a correspondence between observed meteorological conditions and the dynamics of the water surface area within the bed.

Thus, the constructed SWOM provides an effective tool for forecasting the regime and development of future ecosystems in the area.

Keywords: Kakhovka Reservoir, hydrological regime, surface water occurrence, ecosystems, ecotopes, remote sensing, Sentinel-2, NDWI.

Рукопис статті отримано 17.11.2025

Надходження остаточної версії: 01.12.2025

Публікація статті: 30.12.2025

Received 17.11.2025

Revised 01.12.2025

Accepted 30.12.2025