

УДК 556.5:551.58:581.9:504:528.8

DOI <https://doi.org/10.32782/wba.2024.2.10>

КЛІМАТИЧНО-ГІДРОЛОГІЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ НА ТЕРИТОРІЇ ОСУШЕНОГО КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Пічура В.І. – д. с.-г. н., професор,

Потравка Л.О. – д. е. н., професор,

Херсонський державний аграрно-економічний університет,

pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com

Руйнація російським агресором дамби Каховської ГЕС зумовило осушення водосховища та втрати третини прісноводних запасів України, катастрофічних соціально-економічних та екологічних наслідків. На сьогоднішній день значна увага спрямована дослідженням формування стану природно-рослинного покриву в межах колишнього водосховища. У зв'язку з цим, метою дослідження є встановлення закономірностей вегетації та стійкості рослинного покриву залежно від сучасних кліматично-гідрологічних умов території осушеного Каховського водосховища. Результати та висновки отримані на основі комплексних польових досліджень, калібрування та дешифрування супутникових знімків Sentinel 2 L2A в період 2023-2024 рр. В кінці вересня 2023 року площа території рослин складала 52,4 тис га. Насамперед, добрими умовами розвитку рослинності характеризуються балкові системи, частка рослинного покриву їх територій варіювала від 30,7 % до 60,3 %. Зимово-весняний період 2024 року характеризувався сприятливими кліматичними умовами, що зумовило затоплення весняними паводками до 70 % території водосховища. Це забезпечило високий рівень накопичення вологи у донних відкладах і швидкий приріст рослинної біомаси. На кінець вересня 2024 року площа рослинного покриву в межах колишнього водосховища збільшилася у 2 рази. Встановлено значну варіабельність у вегетації рослин в різних частинах водосховища. Це обумовлено неоднорідністю характеристик гідрологічної мережі і перерозподілом вологи, зв'язком із поверхневими стоками головного русла Дніпра, різним рівнем органіки у донних відкладах. Максимальна площа заростання ложа водосховища за 2023-2024 рр. склала – 135 тис. га, в тому числі 48 тис га – деревовидна рослинність (верба і тополі); 87 тис га – переважно болотна і лучна рослинність з осередками чагарників. Відсутність опадів і аномальне збільшення температури повітря у липні до історичного максимуму +40,5-42,0 °С для регіону досліджень, призвели до пришвидшення евапотранспірації та виснаження запасів вологи з водосховища. Це зумовило погіршення вегетації рослин, їх висихання та часткової деградації. Встановлено, що на кінці вересня 2024 року, 67,3 % рослинного покриву мали різну ступінь порушення вегетації. Значний рівень порушення зафіксовано на 43,5 % площі, в тому числі 19,5 % рослинності деградувало і знаходиться на межі знищення. З 27 липня по 19 серпня у верхній частині водосховища зафіксовані пожежі рослинних осередків площею 320 га. Негативні процеси зумовили зменшення площі здорової рослинності на 26,3 тис га. Доведено, що стабільні тенденції до підсилення негативних кліматичних аномалій і штучне регулюван-

ня малими об'ємами скидів з Дніпро ГЕС до території колишнього Каховського водосховища ускладнюють умови виживання рослин. В подальшому це зменшить щільності рослин з доброю вегетацією, збільшить площі деградованого покриву і сухостою, підвищить частоту пожеж, зумовить втрату стійкості новоствореної екосистеми та призведе до знищення осередків рослин.

Ключові слова: Каховське водосховище, рослинність, клімат, гідрологія, порушення, екоцид, Sentinel 2, NDVI, NDMI, NDWI.

Постановка проблеми. 6 червня 2023 року руйнація російським агресором дамби Каховської гідроелектростанції (ГЕС) стала катастрофою національного рівня [1-3]. Втрати водних ресурсів склали більше 17 км³, затоплено 600 км² прилеглих територій, значні втрати рибних ресурсів, знищення флора і фауна. До зони надзвичайної ситуації було віднесено 180 населених пунктів з чисельністю населення понад 900 тис. осіб. В результаті катастрофи більше 6,0 млн втратили доступ до водних ресурсів. Збитки від руйнації дамби склали понад 18 мільярдів доларів США [4]. Відповідно до прийнятої резолюції Генеральної Асамблеї ООН № 64/292 від 28 липня 2010 року країною-агресором було порушено право громадян України на безпечну воду та санітарію, яке є базовим правом людини, основою повноцінного життя та забезпечення всіх інших прав [5, 6].

На сьогоднішній день значна увага спрямована дослідженням та встановленню закономірностей формування стану природно-рослинного покриву в межах осушеного Каховського водосховища [3, 7, 8]. Проведені на сьогодні дослідження мають локальний характер і не мають комплексних фактичних досліджень реального стану території Каховського водосховища. Це пов'язано з обмеженим доступом до території досліджень у зв'язку з активними бойовими діями. У зв'язку з цим, актуальним є використання супутникових знімків, співставлення їх із результатами польових досліджень на доступних територіях водосховища, їх коректне дешифрування.

Практичне застосування дистанційного зондування надає можливість відстежувати реальний стан важкодоступних або недоступних територій. Джерелом актуальних даних дистанційного зондування є супутник Sentinel-2, який у вільному доступі забезпечує зображення із часовою роздільною здатністю близько п'яти діб і просторовою роздільною здатністю 10м×10м на піксель [3, 5]. Sentinel-2 входить до сімейства супутників дистанційного зондування Землі Європейського космічного агентства (<https://www.esa.int/>), які створені в рамках проекту глобального моніторингу довкілля та безпеки компанією Copernicus (<https://www.copernicus.eu/>). Sentinel-2 призначений для моніторингу земель, рослинності, лісових та водних ресурсів, застосовуються при ліквідації наслідків стихійних лих та національної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Dovhanenko D. O. у співтворстві [9] на основі супутникових знімків Sentinel 2, Landsat 8 і 9, встановив, що просторову неоднорідну структуру ґрунтового покриву висушеного пласта водойми формують чотири типи ґрунтів: евтричні реліктиглієві флювізоли, евтричні флювіцеві флювізоли, евтричні флювікоглієві глейсоли, евтричні флювіко-субаквальні глейсоли. У ложі водосховища найпоширенішими ґрунтами виявились евтричні глейові флювізоли. Ґрунти характеризуються різноманітним гранулометричним складом (піски, супіски, суглинки, глини) і різним ступенем вологості. Визначено вплив гранулометричного складу та вологості ґрунту на інтенсивність заростання ложа водойми. Заростання відбувалося у напрямку від берегової лінії до центральної зони водосховища. Вчені відмічали, що щільне заростання прибережної лінії відбувалося вищою рослинністю. Найбільше збільшення рослинного покриву спостерігалось з кінця серпня до кінця вересня 2023 р., коли поверхня ложа водосховища характеризувалася добрим зволоженням. Активна вегетація рослин продовжувалася до початку листопада 2023 року.

У роботі [7] наведені результати польових досліджень формування стану рослинного покриву в межах балок Кам'янка і Мілове, які розташовані на правобережній частині Каховського водосховища Національного природного парку «Кам'янська Січ». Вченими було встановлено, що з 30 червня по 19 жовтня 2023 року кількість судинних рослин на територіях балок зросла майже в сім разів і склала 68 видів. Рослинність характеризувалася домінуванням верби гібриду місцевого виду *Salix alba* та давно натуралізованого чужорідного виду *Salix fragilis*. У жовтні середня висота дерев становила 190 см із середньодобовим приростом 1,7 см. Максимальна висота дерев була зафіксована на відмітці 309 см. За думкою вчених, швидке заселення вербами новоутворених субстратів відбулося завдяки збігу часу руйнування дамби та дозрівання насіння верби.

Подібні закономірності формування рослинного покриву та приросту верби було зафіксовано В. Вишневським і С. Шевчуком [8]. Вченими 21 червня 2024 року було проведено польове обстеження верхньої частини колишнього водосховища на двох прибережних ділянках біля села Малокатеринівка і села Біленьке. Встановлено, що добре зволоження ложа водосховища, сприятливі погодні умови в період з липня 2023 до червня 2024 року, сприяли швидкому приросту верби на піщаних відкладах – 1,2 см/добу, на органічних відкладах – 2,0 см/добу. Середня висота верби станом на 21.06.2024 року на органічних відкладах склала 4,5 метри. Діаметр молодих дерев на висоті 1,5 м становив близько 25 мм, щільність заростання верб сягало 30–40 шт/м². За думкою вчених, в майбутньому, зміна клімату, зменшення вологості донних відкладів, внутрішньовидова конкуренція дерев зумовить зменшення швидкості росту дерев, збільшення

частини тополь і зменшення площ верби, часткове пригнічення вегетації і висихання прибережної рослинності. Зокрема, ситуацію ускладнюють воєнні дії, які призводять до пожеж в межах осушеного водосховища. Вчені у своїх дослідженнях також використовували супутникові знімки для моніторингу стану рослинності в межах колишнього водосховища.

Постановка завдання. В результаті реконструкції історичної карти, встановлено, що лісистість території Великого Лугу становила не більше 10 % [8]. Тобто за сприятливих природно-кліматичних умов функціонування Великого Лугу, лісистість території була незначною, що спростовує припущення про можливість формування великих площ лісу в ложі водосховища. У зв'язку з цим, метою дослідження є встановлення закономірностей вегетації та стійкості рослинного покриву залежно від сучасних кліматично-гідрологічних умов території осушеного Каховського водосховища.

Матеріали та методи досліджень. Джерелом актуальних даних дослідження стану рослинного покриву в межах колишнього Каховського водосховища (рисунок 1) були польових спостереження на доступних територіях балки Кам'янка правобережної частини річки Дніпро, дані аеророзвідки водосховища на відрізку село Республіканець → місто Берислав Херсонської області. Супутникові знімки Sentinel 2 L2A використані для дешифрування і розрахунку індексів вегетації рослинності і зволоження в період 20.06.2023-22.09.2024рр. Досліджувалися безхмарні періоди.

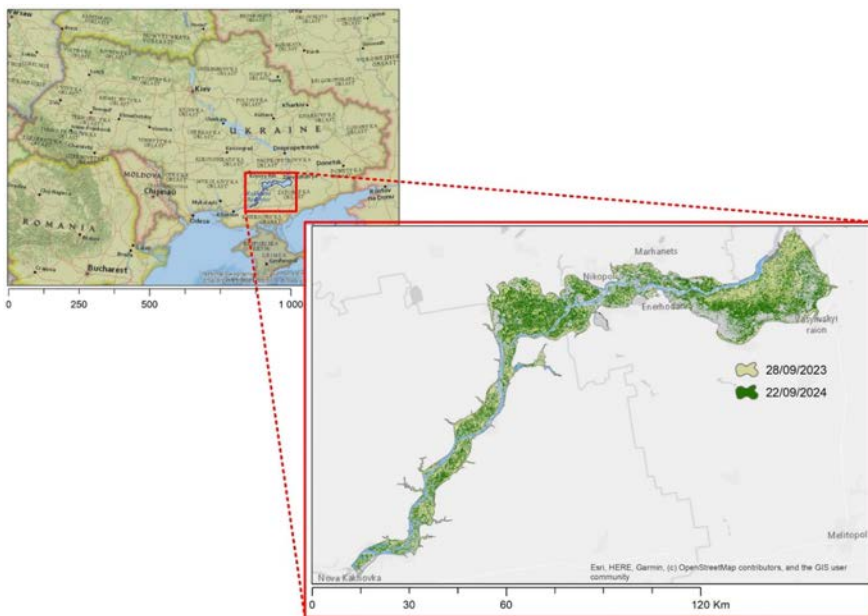


Рис. 1. Територія дослідження осушеного Каховського водосховища

Нормований індекс різниці зволоження (Normalized Difference Moisture Index, NDMI) використаний для визначення рівня зволоження рослин осушеного водосховища у відповідних діапазонах Sentinel 2 L2A [10]

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

де, діапазони спектру NIR – ближній інфрачервоний і SWIR – короткохвильовий інфрачервоний.

Діапазон значень NDMI становить від –1 до 1. Від’ємні значення NDMI (значення, що наближаються до –1) відповідають неродючому ґрунту – без рослинності. Значення близько нуля (від –0,032 до 0,032) відповідають водному стресу. Від 0,032 до 0,24 характеризує задовільне зволоження рослинного покриву, від 0,24 до 0,80 – добре зволоження, більше 0,80 – високий рівень зволоження.

Нормований індекс різниці вегетації (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) використаний для визначення стану вегетації і здоров’я рослин осушеного водосховища у відповідних діапазонах Sentinel 2 L2A [12]:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

де, діапазони спектру NIR – ближній інфрачервоний і Red – червоний.

Діапазон значень NDVI становить від –1 до 1. Від’ємні значення формуються хмарами, водою та снігом, а значення, від 0 до 0,4 переважно камінням та оголеними ґрунтами. Значення NDVI більше 0,4 ідентифікує рослинність.

Враховуючи відмінності спектральних характеристик донних відкладів від типового ґрунтового покриву, нами за результатами польових досліджень здійснено калібрування супутникових знімків, що забезпечило об’єктивне розпізнавання оголених і рослиннокритих територій ложа Каховського водосховища. Зокрема, визначена класифікація характеристик вегетації і структури рослин за NDVI. Встановлено, що значення NDVI від 0 до 0,6 відповідали територіям без рослинності, які вкриті мушлями, вони характеризувалися такирами, пісками, каміннями. Значення NDVI більше 0,6 свідчить про присутність рослинності, зокрема: 0,60-0,70 – задовільна рослинність; 0,70-0,85 – добра рослинність; 0,85-1,00 – дуже добра рослинність. Визначено, що в максимальний пік вегетації, значення NDVI від 0,60 до 0,85 – переважно відповідали болотній і лучній рослинності з осередками чагарників; більше 0,85 – вказує на переважну присутність деревних рослин (переважно вербоноси і тополі).

Сезонні характеристики порушення вегетації рослин розраховані за формулою:

$$\Delta NDVI = NDVI_t - NDVI_{t-n} \quad (3)$$

де $NDVI_t$ – стан вегетації на поточну дату дослідження; $NDVI_{t-n}$ – стан вегетації на попередню дату дослідження.

Порушення вегетації рослин $\Delta NDVI$ розраховані за наступними умовами: $\Delta NDVI \geq 0$ – без змін; від 0 до $-0,1$ – низьке; від $-0,1$ до $-0,2$ – середнє, від $-0,2$ до $-0,3$ – високе; $\Delta NDVI < -0,3$ – дуже високе порушення. Дослідження були проведені за результатами дешифрування основних періодів вегетації та активного формування рослинного покриву, а саме: 28.09.2023; 09.06.2024; 14.07.2024; 22.09.2024.

Узагальнення значень порушення вегетації рослин $\Delta NDVI_{GV}$ на території осушеного водосховища здійснено станом на 22.09.2024 року відносно максимальних значень $NDVI_{max}$ (28.09.2023; 09.06.2024; 14.07.2024; 22.09.2024) за формулою:

$$\Delta NDVI_{GV} = NDVI [22.09.24] - NDVI [28.09.23; 09.06.24; 14.07.24; 22.09.24]_{max} \quad (4)$$

Растр максимальних значень $NDVI_{max}$ (28.09.2023; 09.06.2024; 14.07.2024; 22.09.2024) розраховано із використанням робочого інструменту Cell Statistics of ArcToolbox, ArcGIS.

Індекс нормалізованої різниці води (Normalized Difference Water Index, NDWI) використаний для визначення площ водних об'єктів та затоплення весняними паводками ложа колишнього водосховища [12]:

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad (5)$$

де, діапазони спектру Green – зелений і NIR – ближній інфрачервоний

Вкриті водою території відповідають значенню NDWI більше $-0,2$.

Обробку зображень, картографування та просторово-часовий аналіз проводили за допомогою ArcGis 10.6.

Результати досліджень. Зневоднення Каховського водосховища призвело до оголення донних відкладів та природно-кліматичної трансформації осушеної території, яка характеризується показниками просторово-часової відмінності сезонної диференціації вологозабезпечення та фіто-кліматичних умов водосховища. Рослинна біомаса являється важливим індикатором відновлення та подальшої екологічної стійкості порушених територіальних ландшафтів, прояву опустелення, накопичення і збереження вологи, забезпечення ґрунтово-відтворюваних процесів і властивостей у донних відкладах осушеної території водосховища.

У вересень 2023 року добрими умовами розвитку рослинності характеризуються балкові системи (рисунок 2), частка рослинного покриву їх територій варіювала від 30,7 % до 60,3 %.

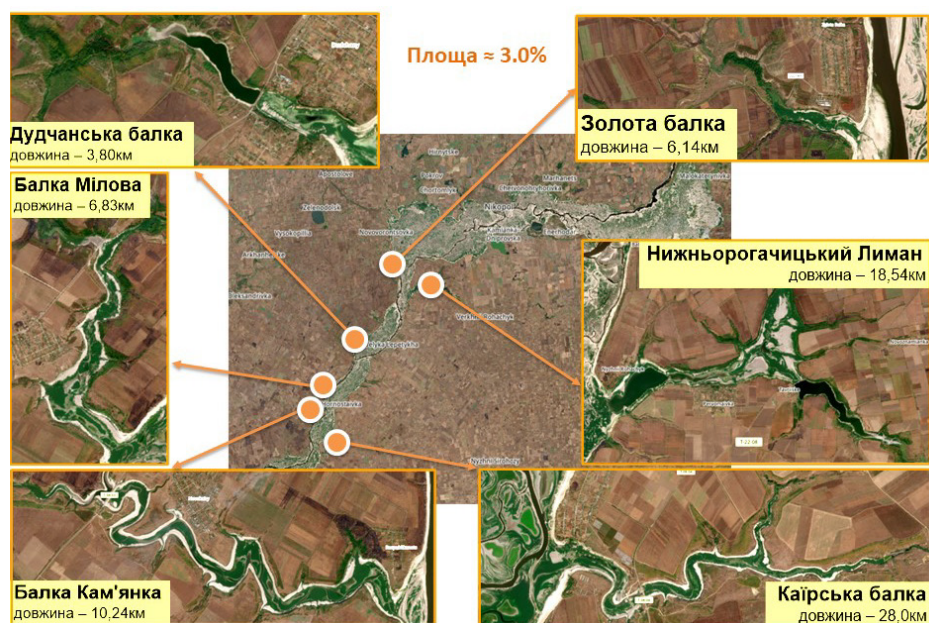


Рис. 2. Балки осушеного Каховського водосховища

Стан рослинного покриву характеризувався як задовільний, добрий і дуже добрий. Задовільний стан мали території із середньою щільністю низькорослої рослинності; добрий стан – мозаїчно-неоднорідні щільні осередки чагарників (переважно верболози) висотою до 1,0-1,3 м, дуже добрий стан – території із верболозами більше 1,3 м.

Частка територій балок (рисунок 3), вкритих верболозами, характеризувалися такими значеннями: Золота балка – 67,4%, Балка Мілова – 45,1%, Балка Кам'янка – 42,5%, Каїрська балка – 37,8%, Нижньорогачицький лиман – 34,2%, Дудчанська балка – 24,5%. В цілому, у вересні 2023 році загальна площа балок, вкритих верболозами, склала 1193 га (36,5%). Площа з низькорослою рослинністю становила 580,8 га (17,8%), територія без рослинності склала 27,1%, а водні об'єкти займали 18,6%.

На рисунку 4 представлено Балку Кам'янка станом на 21 квітня 2024 року на різних мозаїчно-неоднорідних ділянках. Більша частина території без рослинності вкрита мушлями, характеризується такирами, пісками, камінням, мілководдями. У структурі рослинності переважають верболози висотою 1,3-1,8 м. Близько 15 % площі займають верболози висотою більше 1,8 м. Варто наголосити, що за високих температур повітря у перші 4 місяці після осушення Каховського водосховища, близько 52 % рослинного покриву прибережної території (рисунок 5) втратили

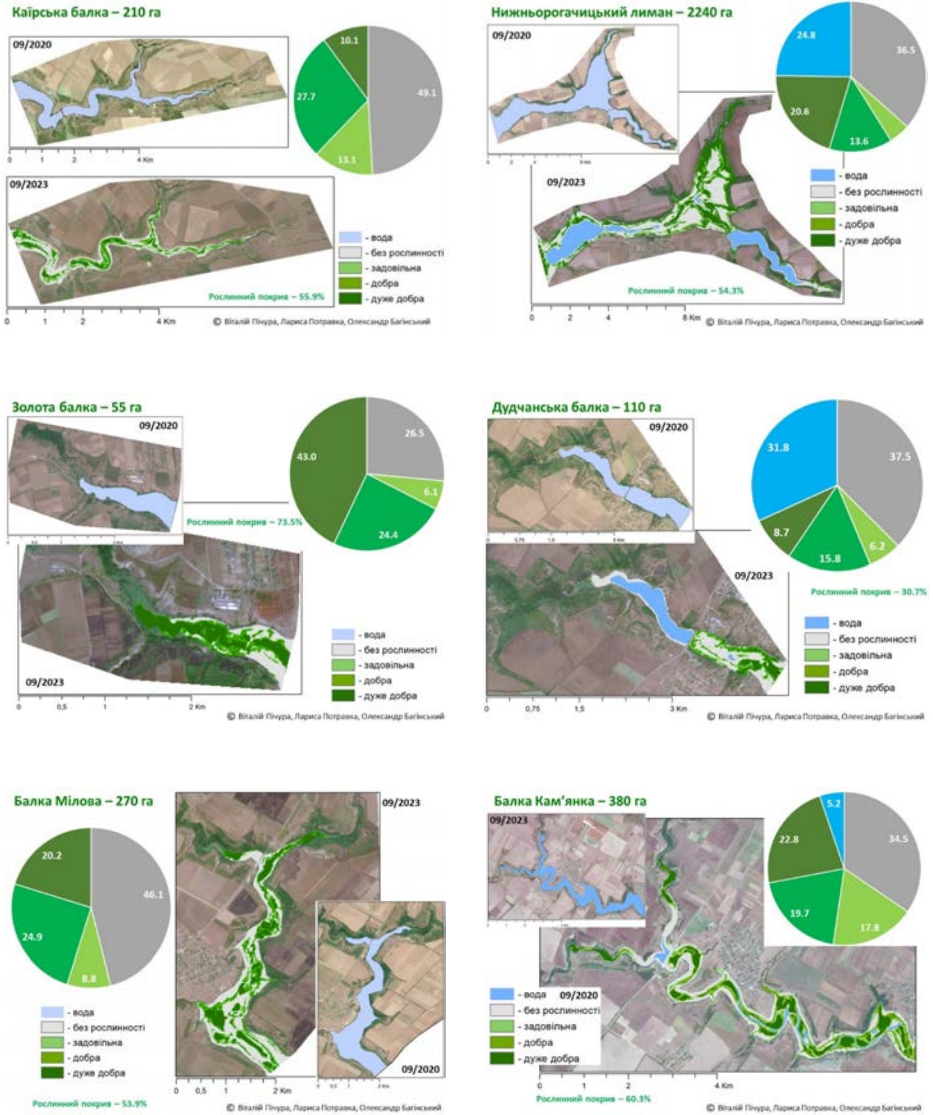


Рис. 3. Структура розподілу площ балок осушеного водосховища станом на вересень 2023 року

добрі вегетатійні властивості. На сьогоднішній день більша частина прибережної рослинності деградувала.

Слід акцентувати, що загальна площа балок складає лише 3,0 % території осушеного Каховського водосховища. Це спростовує можливість їх використання у якості індикатора сприятливості природно-кліматичних



Рис. 4. Мозаїчна неоднорідність різних ділянок балок осушеного водосховища станом на 21 квітня 2024 року

умов для формування рослинної біомаси на основній території осушеного водосховища. Тому, результати польових досліджень стану балок можуть бути корисними для характеристики видового складу флори, оцінювання змін стану рослинності на прилеглих територіях. Результати польових досліджень нами були використані для коректного дешифрування супут-

Балка Кам'янка

рослинність прибережної території, буферна зона 50 м площею 167 га



Рис. 5. Стан прибережної рослинності Балки Кам'янка станом на 21 квітня 2024 року

никових знімків, ідентифікації та дистанційного моніторингу просторово-часової мозаїчної неоднорідності рослин донних ландшафтів на всій території водосховища площею 215,5 тис. га.

За результатами польових досліджень і дешифрування супутникових знімків Sentinel 2 L2A нами були уточнені спектральні характеристики ідентифікації рослинності, динаміка вегетації та коректно визначені площі заростання території ложа водосховища за 2023-2024 рр. (рисунком 6).

В кінці вересня 2023 року площа рослинності склала 52,4 тис. га: задовільну вегетацію мали 37,0 % площі рослинності, добру – 46,7 %, дуже добру – 16,3 %. Після зимового анабіозу і завершення весняних паводків на початок червня 2024 року площа зайнята рослинами становила 78,2 тис. га, в тому числі із задовільною вегетацією 20,3 %, доброю – 38,1 %, дуже доброю – 41,6 %. Станом на 14 липня 2024 року площа вкрита рослинами збільшилася на 26 % і склала 98,5 тис. га, з них із задовільною вегетацією 21,5 %, доброю – 51,2 %, дуже доброю – вегетація 27,4 %. В третій декаді серпня площа рослинно вкритих територій становила 102,0 тис. га, зокрема із задовільною вегетацією 26,5 %, доброю – 67,0, дуже доброю – 6,5 %. В кінці вересня 2024 року площа рослинності склала 110,0 тис. га: із задовільною вегетацією 29,6 %, добру – 64,1 %, дуже добру – 6,3 %.

Швидкий приріст рослинної біомаси можна пояснити поєднанням фактору зволоження та наявності поживних елементів у донних відкладах.

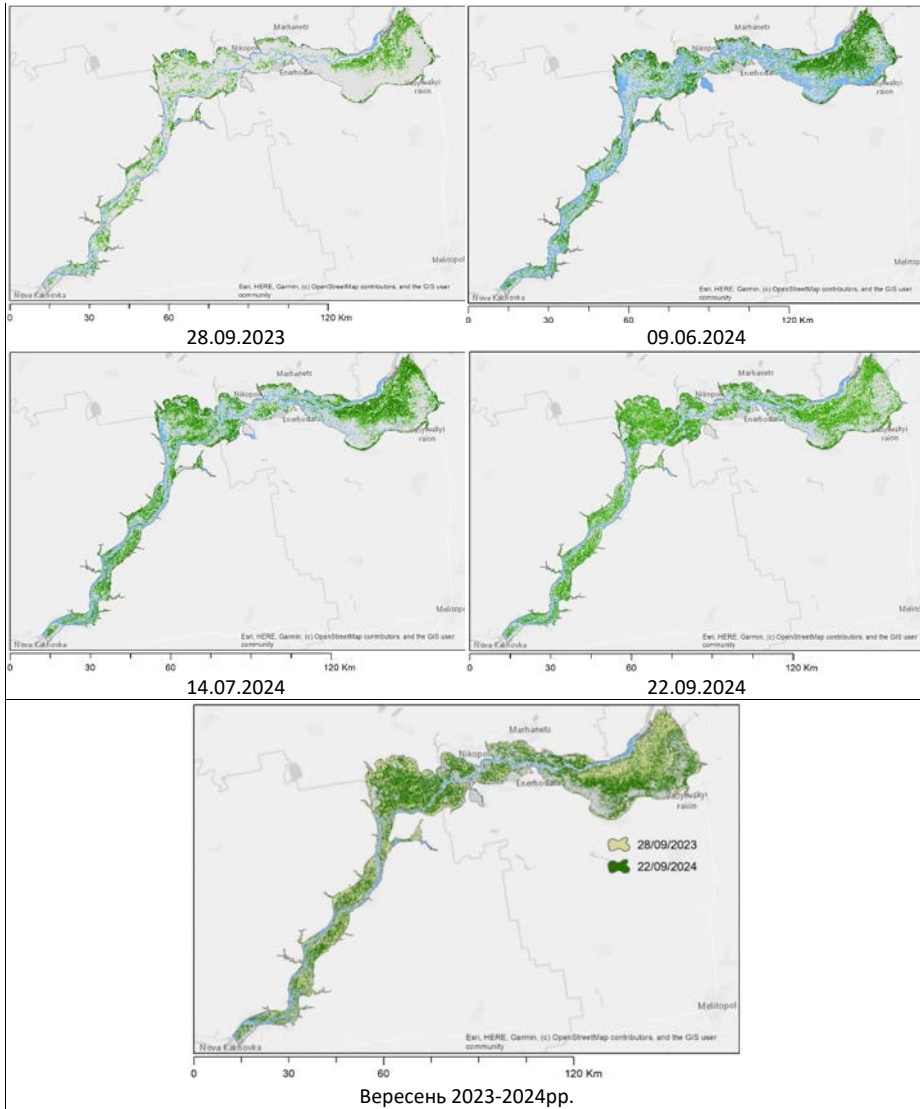


Рис. 6. Формування рослинного покриву за період вересень 2023-2024 рр.

Слід відзначити, що зимово-весняний період 2024 року характеризувався сприятливими кліматичними умовами, які за частотою проявів зволоження можна віднести до аномально сприятливих. Зокрема, схожі умови було зафіксовано у 1982 році (рисунок 7). Сумарне значення відносної вологості повітря у зимово-весняний період 2024 року на 8,8 % перевищувало статистичну норму 1982-2024 рр., у 1982 році перевищення склало 10,1 %.

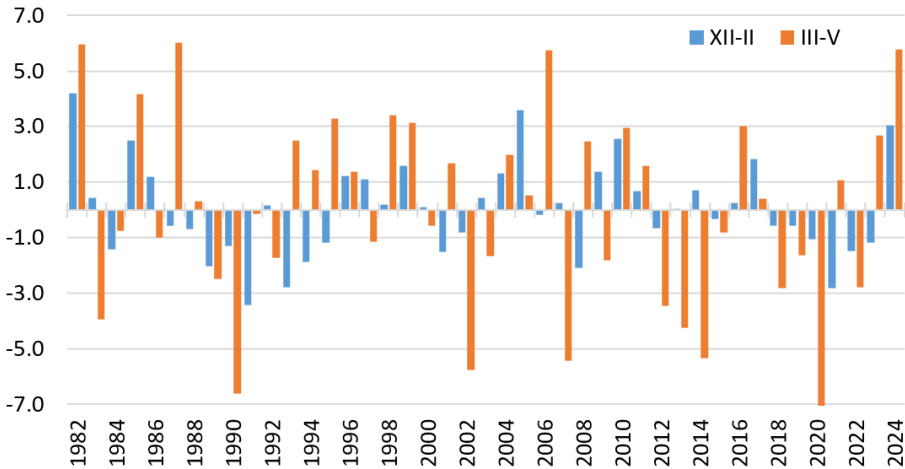


Рис. 7. Динаміка відносної вологості (%) повітря в межах Каховського водосховища за 1982-2024рр.: відхилення від статистичної норми в зимовий (79,8 % заложення) і весняний (68,6 % зволоження) періоди

Аномально високе зволоження фіксувалося на всій водозбірній території річки Дніпро, що призвело до накопичення великих об'ємів води в основному руслі річки, добрих гідрологічних умов та збільшення частоти скидів поверхневих вод з Дніпровської ГЕС до території Каховського водосховища. За даними дешифрування знімків Sentinel 2 L2A нами зафіксовано наповнення території Каховського водосховища на початку березня 2024 року, станом на 11 березня було затоплено 65,0 % території, 31 березня – 70,0 %, 30 квітня – 55,4 %, 25 квітня – 47,3 % (рисунок 8).

За дослідженнями В. Вишневського, С. Шевчука [8], в період весняної повені здійснено дві хвилі максимального попуску води через ДніпроГЕС: перша хвиля була зафіксована 15.03.2024р. – 3500 м³/с, друга хвиля спостерігалася 23.04.2024р. – 4130 м³/с. Науковці встановили, що стік води в нижній течії річки Дніпро з 1 червня 2023 року по 30 червня 2024 року, був більшим, ніж зазвичай. Середнє значення стоку попусків через ДніпроГЕС становило 1730 м³/с (54,6 км³). Тому, сформовані умови можна віднести до нетипових умов зони Степу України, які сприяли виживанню, суттєвому приросту рослин і заростання водосховища.

Для визначення просторово-часових закономірностей формування рослинного покриву з 18 червня 2023 року до 22 вересня 2024 року, нами було обрано три ділянки колишнього водосховища (рисунок 9), які різняться гідрологічною щільністю мережі і залишками органіки у донних відкладах. Представлено динаміку середньозважених значень нормо-

ваного індексу різниці зволоження (NDMI) і нормований індекс різниці вегетації (NDVI) на трьох ділянках спостережень. Зокрема, встановлено тісну залежність між значеннями NDMI і NDVI. Це дало можливість прослідити хронологію вегетації рослин залежно від просторових відмінностей умов зволоження різних частин водосховища. Слід відмітити, що у 2023 році на всіх ділянках фіксувалося високий рівень вологозапасу у донних відкладах, що стимулювало стрімкий приріст і добрий рівень вегетації рослин до початку листопада. На початку першої хвилі весняної повені 15.03.2024 року на всій території ложа водосховища фіксувалося відновлення вегетації на відкритих від води ділянках.

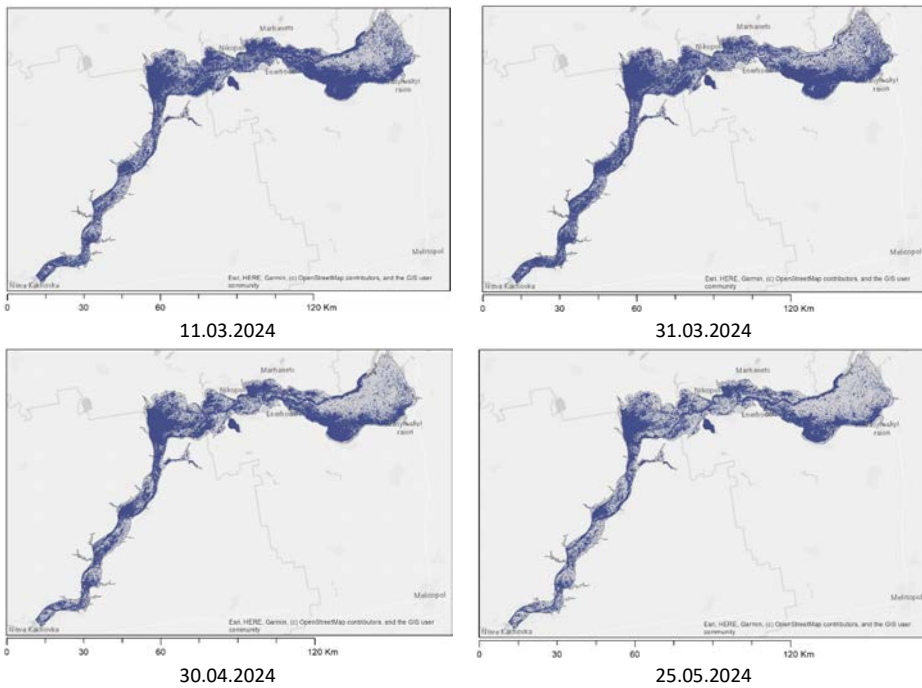


Рис. 8. Весняні паводки в межах Каховського водосховища у 2024 році

Ділянка 1 у верхній частині водосховища характеризується високим рівнем органіки у донних відкладах. До руйнації Каховської дамби ця частина водосховища переважно характеризувалася глибиною акваторії 0,7-2,5 м, містила близько 18 % об'єму води водосховища. Близько 11 % запасів води не приймали участі у регулюванні стоку, що приводило до застою у акваторії, цвітіння води, високого рівня акумуляції органіки і формуванню осередків політрофно-гіпертрофних мас води. Ділянка 1 не

має безпосереднього гідрологічного зв'язку з головним руслом Дніпра. Зволоженість території залежала від запасів вологи після руйнації дамби і весняних паводків. Води весняних паводків до ділянки надходили через природний гідрологічний рукав біля м. Енергодар (правобережна частина водосховища), далі поверхневі води надходили до пониззя ложа осушеного водосховища напроти м. Дніпрорудне, ложе затоплювалося значними об'ємами води. Ширина затопленого ложа від берегової лінії м. Дніпрорудне до ділянки 1 становила більше 14 км.

Вздовж берегової лінії вода розливалася на 65 км – від м. Енергодар до села Плавні Василівського району Запорізької області. Це забезпечувало добре живлення рослин верхньої частини водосховища. З 15 березня до 30 квітня 2024 року на ділянці 1 спостерігався значний приріст рослин. Великі об'єми попусків поверхневих вод з ДніпроГЕС, на рівні 3500-4130 м³/с (110,5-130,3 км³), зумовили підтримку високого рівня зволоження і стрімке підвищення рівня вегетації рослин у 1,6 рази (NDVI – з 0,41 до 0,65). Приріст верби склав 2,0 см/добу. З 30 квітня по 09 червня на ділянці 1 фіксувалося збереження високого рівня зволоження і збільшення значення NDVI з 0,65 до 0,71. На кінець червня висота верби сягала 4,5 м і вище.

По завершенню весняних паводків, з верхньої частини водосховища 09 липня 2024 року відбулося зворотне розвантаження води до головного русла Дніпра і зменшення вологозабезпечення рослина. В період літньо-осінньої межени частка водовкритої території в межах колишнього водосховища (рисунок 10) станом на 14.07.2024 року склала 24,3 %, 23 серпня – 18,2 %, 22 вересня – 16,2 %, 22 жовтня – 16,3 %.

Відсутність атмосферних опадів і попусків з ДніпроГЕС, аномально високі температури повітря і відсутність гідрологічного зв'язку ділянки 1 з головним руслом Дніпра призвели до виснаження вологи і погіршення доброї вегетації рослин. Таким чином, незначне зниження NDVI з 0,71 до 0,68 фіксувалося до 14 липня 2024 року. Збільшення температури повітря у липні до історичного максимуму +40,5-42,0 °C та п'ятикратне зростання частоти прояву аномально високих температур у літній період для регіону досліджень, призвели до пришвидшення евапотранспіраційних процесів, виснаження запасів вологи з ложа водосховища, стрімке погіршення вегетації та висихання рослин. Середнє значення NDVI знизилося на 21 %, з 0,68 до 0,54. Значні осередки рослин повністю втратили вегетацію. З 27 липня по 19 серпня зафіксовані пожежі у верхній частині водосховища на площі 320 га (рисунок 11).

Добрим і стабільним зволоженням характеризувалася ділянка 2 в середній частині водосховища. Ця частина ложа водосховища має добру мережу гідрологічного розвантаження і акумуляцію вод весняних паводків річки Дніпро. Зокрема, ця територія має додаткове живлення водами

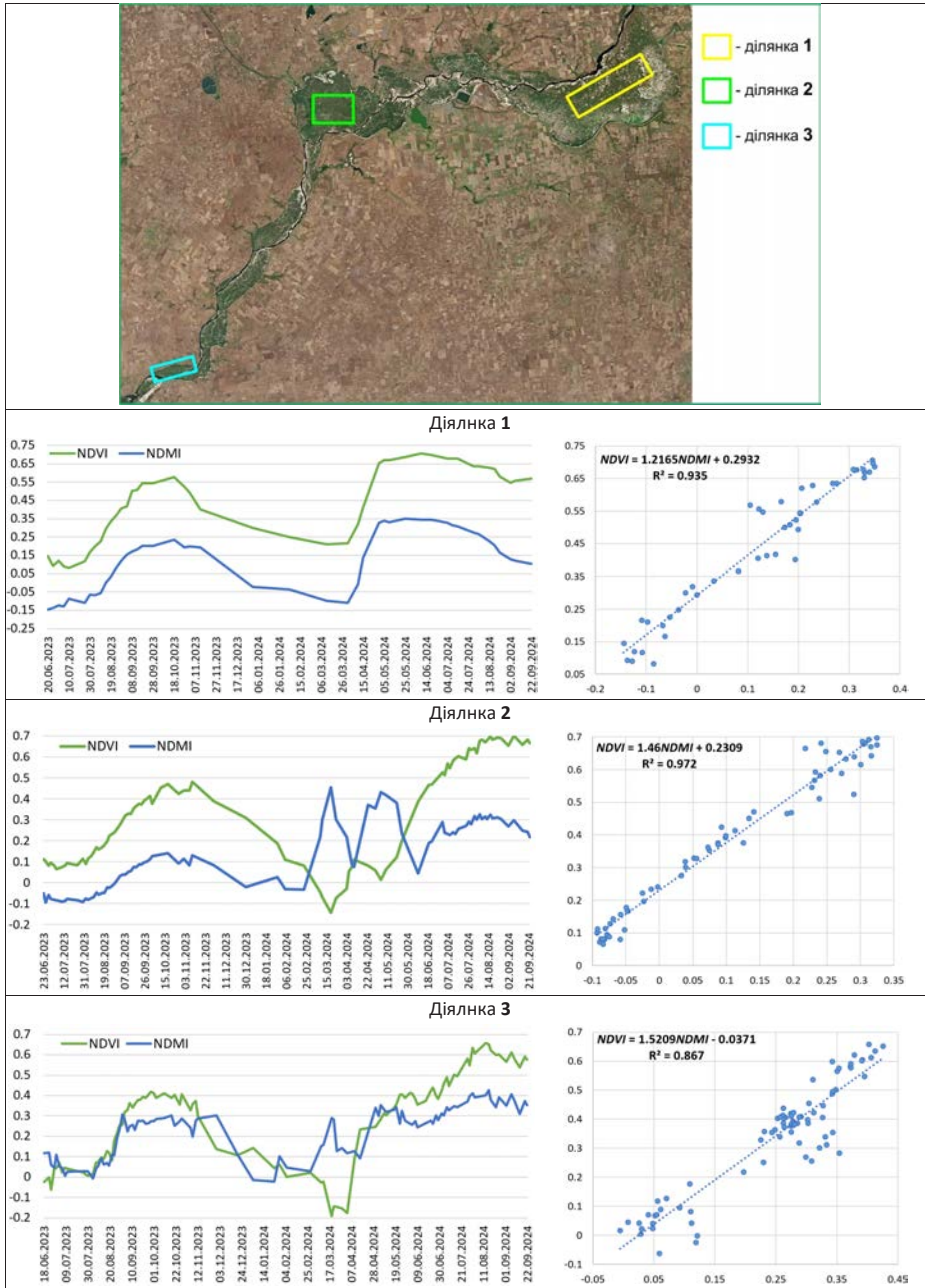


Рис. 9. Просторово-часові закономірності зволоження і вегетації рослинності на території осушеного Каховського водосховища

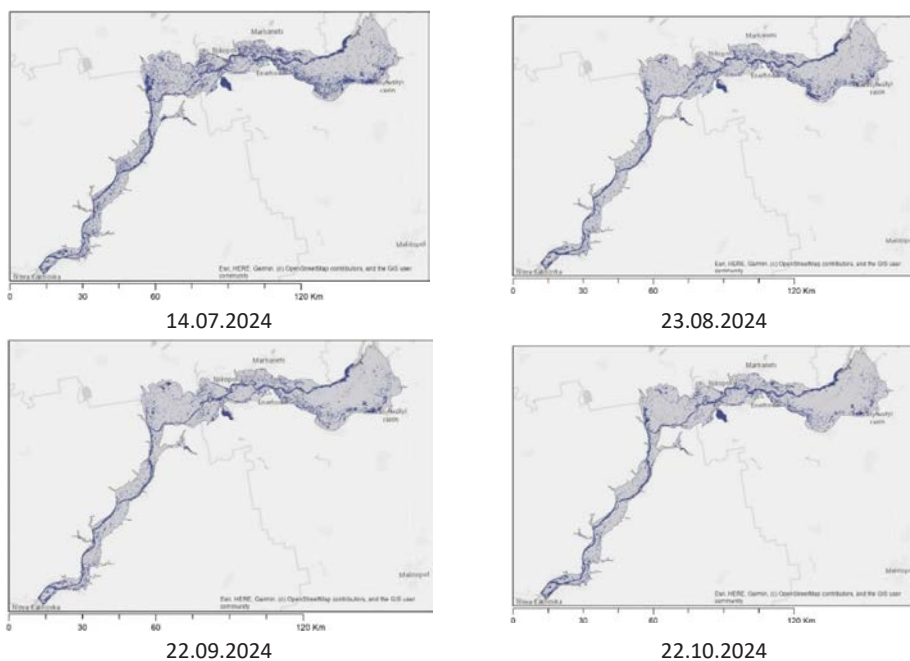


Рис. 10. Розподіл водовкритої території в межах колишнього Каховського водосховища в літньо-осінню межень

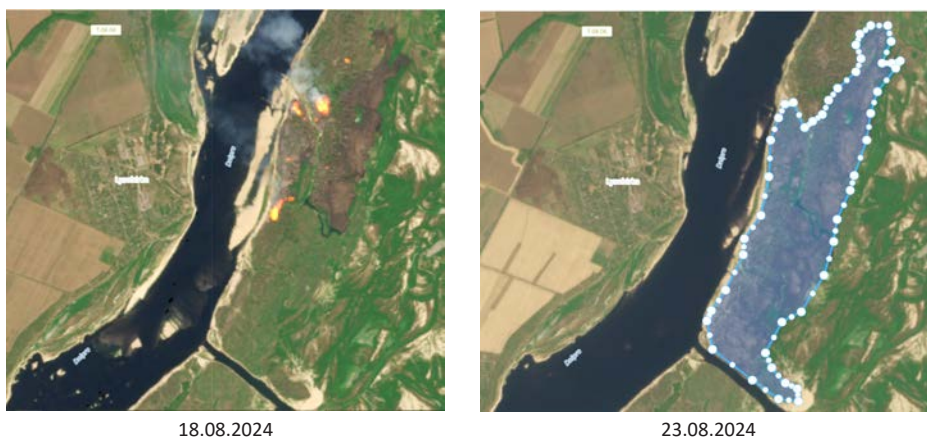


Рис. 11. Пожежі у верхній частині осушеного Каховського водосховища, за даними Sentinel 2 L2A

річки Базавлук довжиною 157 км і площею водозбору 4,2 тис. км². Річка протікає у Криничанському, Софіївському та Нікопольському районах Дніпропетровської області, права притока Дніпра.

Ділянка 2 в період весняної повені 2024 року була покрита водою. З 20 травня, після поступового сходження води до головного русла Дніпра, на цій ділянці фіксувалося відновлення вегетації рослин. Довгий період затоплення, забезпечив високий рівень насичення вологою донних відкладів. Зокрема, додаткове зволоження підтримувалося водами річки Базавлук. Це стимулювало добру вегетацію і високу стійкість рослинного покриву в період літньої спеки. Стабільна вегетація рослин фіксувалася до третьої декади серпня. Середнє значення NDVI у липні склало 0,58-0,60, у середні серпня сягало 0,70. Незначне погіршення вегетації рослин спостерігалось на кінець вересня, середнє значення NDVI знизилось з 0,70 до 0,65. Слід акцентувати, що ділянка 2 характеризується відносно стійким зволоженням і органічними донними відкладами, що зумовило стабільні умови формування рослинного покриву впродовж 2023-2024 рр.

Ділянка 3, напроти села Новоберислав і міста Берислав, розташована на неогенових вапнякових пластових відкладах у нижній частині водосховища і характеризується добрим зв'язком гідрологічної мережі із поверхневими стоками головного русла Дніпра, великою щільністю мілководних зон, значною часткою піщаних територій і низьким рівнем органічних відкладів. Тому інтенсивність розвитку рослинного покриву переважно залежить від рівня води головного русла річки, який впливає на водозабезпечення ділянки 3. З початку весняних паводків фіксувалися добрі умови зволоження цієї ділянки. Зокрема, поступове розвантаження запасів води з верхньої і середньої частин колишнього водосховища, зумовлювали систематичне водне живлення рослин у нижній частині. Тому стабільні умови вегетації і формування рослинного покриву фіксувалися від середини квітня до середини серпня. Середнє значення NDVI збільшилося у 2,9 рази – з 0,23 до 0,66. Відсутність опадів і скидів з ДніпроГЕС зумовило зниження рівня води у головному руслі річки Дніпро, обміління і часткове пересихання рукавів річки гідрологічної мережі нижньої частини осушеного водосховища, що обумовило водний стрес на ділянці 3. Це призвело, з 13 серпня по 15 вересня, до зниження середнього значення NDVI від 0,66 до 0,56. Короткочасні опади зумовили на 20 вересня часткове відновлення вегетації рослин, але на 22 вересня рівень вегетації був знову погіршений.

За умов проявів негативних змін клімату та штучного регулювання попусків з Дніпро ГЕС, важливим є дослідження стійкості вегетації рослин та формування рослинного покриву на території колишнього Каховського водосховища. У зв'язку з цим, на основі значень NDVI були проведені розрахунки сезонного порушення вегетації рослин за вересень 2023-2024рр (рисунок 12).

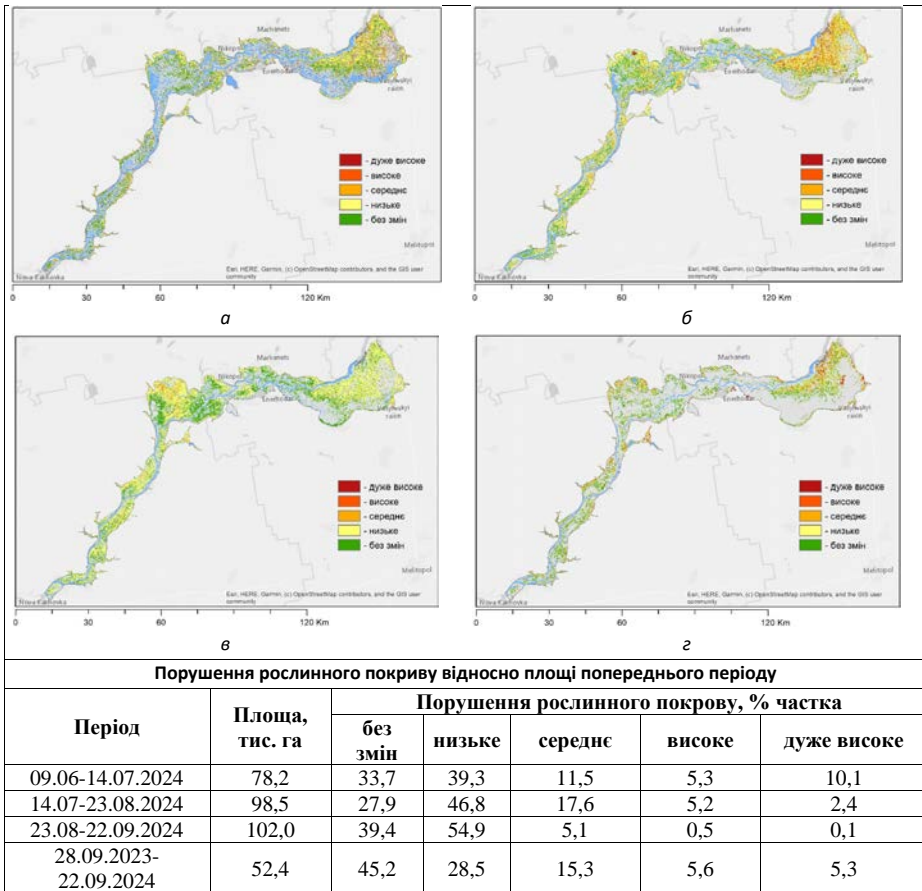


Рис. 12. Сезонні характеристики порушення вегетації рослин в ложі Каховського водосховища за вересень 2023-2024рр.: а – період 09.06-14.07.2024; б – період 14.07-23.08.2024; в – період 23.08-22.09.2024; г – період 28.09.2023-22.09.2024

Розрахунки здійснено для важливих періодів формування рослинного покриву. Межі рослинного покриву визначалися для початку кожного періоду досліджень. За результатами досліджень встановлені просторово-часові характеристики порушення сформованої рослинної біомаси залежно від сучасних кліматично-гідрологічних умов функціонування осушеного водосховища.

Встановлено, що найбільший водний і температурний стрес рослини мали в періоди 09.06-14.07.2024 і 14.07-23.08.2024. В перший період відбулося сходження вод весняного паводка і осушення території водосховища. Це призвело до перших проявів стресу і втрати добрих умов вегетації у рослин верхній частині водосховища. В свою чергу, це зумовило порушення рослинного покриву в класах від середнього до дуже високого рівня.

Другий період характеризувався аномально високими температурами повітря і надзвичайним рівнем водного стресу рослин. Це обумовило погіршення вегетації більше 70 % рослинності ложа водосховища. Високий рівень порушення вегетації зафіксовано площею 25 тис. га. на донних ґрунтах, які не мали гідрологічного живлення з головного русла Дніпра.

В третій період, 23.08-22.09.2024, більше 60 % рослинності поступово втрачали добрі вегетаційні характеристики.

З метою встановлення реальної ситуації формування структури і площ рослинного пориву, розрахунку порушення вегетації, нами систематизована растрова модель рослинності із максимальними значеннями $NDVI_{max}$ (рисунок 13а) на основі растрів $NDVI$ станом на 28.09.2023 р., 09.06.2024 р., 14.07.2024 р., 22.09.2024 р. Це дало можливість встановити межі ложа водосховища, яка була покрита рослинами впродовж вересень 2023-2024 рр. Площа рослинності склала – 135 тис. га, в тому числі 48 тис га – деревовидна рослинність (верба і тополі); 87 тис га – переважно болотна і лучна рослинність з осередками чагарників.

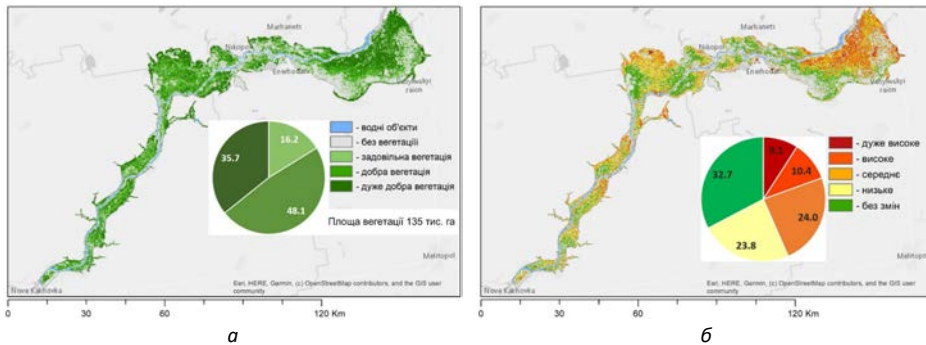


Рис. 13. Рослинний покрив ложа Каховського водосховища за вересень 2023-2024 рр.: а – структура рослинного покриву за максимально сприятливих умов вегетації, $NDVI_{max}$; б – порушення вегетації рослин, $\Delta NDVI_{GV}$

Розрахунок порушення вегетації рослин $\Delta NDVI_{GV}$ здійснено станом на 22.09.2024 рік відносно растру максимальних значень $NDVI_{max}$. Встановлено, що 32,7 % (44 тис. га) – площі рослин не зазнали порушень, 67,3 % (91 тис. га) – території мають різну ступінь порушення рослинного покриву. Значний рівень порушення зафіксовано на 43,5 % (58,7 тис. га) площі, в тому числі 19,5 % (26,3 тис. га) рослинності деградувало і знаходиться на межі знищення.

Слід акцентувати, що впродовж останніх 40 років фіксується стабільне зниження рівня відносної вологості повітря на 10-12 %, що доводить загострення водного дефіциту та підвищення температурного тиску

на територіальні екосистеми. Зокрема, за глобальними даними кліматичних досліджень Copernicus Climate Change Service (<https://atlas.copernicus.eu/atlas>), у 2024 році на території України у порівнянні із статистичною нормою 1850-1900 рр., температура повітря зросла на 2,07 °С. До 2100 року прогнозується перевищення норми середньорічного значення на 7,91 °С. Очікується, що у період 2024-2100 рр. найбільші коливання підвищення температури прогнозуються у літні та зимові періоди від 2,52 °С до 10,34 °С. Підсилення негативних кліматичних аномалій і штучне регулювання малими об'ємами скидів з Дніпро ГЕС призводить до значного водного дефіциту і порушення новоствореної рослинної екосистеми в ложі Каховського водосховища.

Висновки. За результатами комплексних польових і дистанційно-супутникових досліджень встановлені закономірності вегетації та стійкості рослинного покриву залежно від сучасних кліматично-гідрологічних умови території осушеного Каховського водосховища. В кінці вересня 2023 року площа рослинності склала 52,4 тис. га. Зимово-весняний період 2024 року характеризувався сприятливими кліматичними умовами. Такі умови сприяли високому рівню накопиченню вологи у донних відкладах і швидкому приросту рослинної біомаси. У період весняних паводків затоплення сягало 70 % території водосховища. На кінець вересня 2024 року площа рослинного покриву в межах колишнього водосховища збільшилася у 2 рази. Встановлено значну варіабельність у вегетації рослин в різних частинах водосховища. Це обумовлено неоднорідністю характеристик гідрологічної мережі і перерозподілом вологи, зв'язком із поверхневими стоками головного русла Дніпра, різним рівнем органіки у донних відкладах. Максимальна площа заростання ложа водосховища за 2023-2024 рр. склала – 135 тис. га, в тому числі 48 тис. га – деревовидна рослинність (верба і тополі); 87 тис. га – переважно болотна і лучна рослинність з осередками чагарників. Відсутність опадів і аномальне збільшення літніх температур повітря для регіону досліджень, призвели до пришвидшення евапотраспірації та виснаження запасів вологи з водосховища. Це зумовило погіршення вегетації рослин, їх висихання та часткової деградації. Встановлено, що на кінці вересня 2024 року, 67,3 % рослинного покриву мали різну ступінь порушення вегетації. Значний рівень порушення зафіксовано на 43,5 % площі, в тому числі 19,5 % рослинності деградувало і знаходиться на межі знищення. Зокрема, у верхній частині водосховища зафіксовані пожежі рослинних осередків площею 320 га. Негативні процеси зумовили зменшення площі здорової рослинності на 26,3 тис. га. Доведено, що стабільні тенденції до підсилення негативних кліматичних аномалій і штучне регулювання малими об'ємами скидів з Дніпро ГЕС до території колишнього Каховського водосховища ускладнюють умови виживання рослин.

В подальшому це зменшить щільності рослин з доброю вегетацією, збільшить площі деградованого покриву і сухостою, підвищить частоту пожеж, зумовить втрату стійкості новоствореної екосистеми та призведе до знищення осередків рослин.

Подяки. Дослідження здійснюється за підтримки Канадського інституту українських студій (КІУС) Альбертського університету. Грант – «Просторово-часове дослідження наслідків російської збройної агресії в басейні Нижнього Дніпра».

Проект підтримано програмою Documenting Ukraine Інституту наук про людину IWM у Відні. Грант – «Дослідження наслідків руйнування Каховської дамби та осушення водосховища для населення України».

CLIMATIC AND HYDROLOGICAL CONDITIONS OF THE FORMATION OF VEGETATION COVER ON THE TERRITORY OF THE DRAINED KAKHOVKA RESERVOIR

*Pichura V.I. – Doctor of Agriculture, Professor,
Potravka L.O. – Doctor of Economics, Professor,
Kherson State Agrarian and Economic University,
pichuravitalii@gmail.com, potravkalarisa@gmail.com*

The destruction of the Kakhovka HPP dam by the Russian aggressor led to the draining of the reservoir and the loss of a third of Ukraine's fresh water reserves, with catastrophic socio-economic and ecological consequences. Now, considerable attention is directed to the study of the formation of the state of the natural vegetation cover within the former reservoir area. In this regard, the purpose of the study is to establish the regularities of vegetation and its stability depending on the current climatic and hydrological conditions of the territory of the drained Kakhovka Reservoir. The results and conclusions were obtained on the basis of complex field research, calibration and decoding of Sentinel 2 L2A satellite images during the period of 2023-2024. At the end of September 2023, the area of the territory with plants was 52.4 thousand hectares. First of all, beam systems are characterized by good conditions for the development of vegetation, the share of vegetation cover in their territories varied from 30.7 % to 60.3 %. The winter-spring period of 2024 was characterized by favorable climatic conditions, which caused up to 70 % of the reservoir's territory to be flooded by spring floods. This ensured a high level of moisture accumulation in bottom sediments and a rapid increase in plant biomass. By the end of September 2024, the area of plant cover within the area of former reservoir has doubled. Significant variability of plant vegetation in different parts of the reservoir was established. This was due to the heterogeneity of the characteristics of the hydrological network and the redistribution of moisture, the connection with the surface runoff of the main channel of the Dnipro, bottom sediments with different levels of organic matter. The maximum overgrown

area of the reservoir bed during 2023-2024 amounted to 135,000 hectares, including 48,000 hectares of wood vegetation (willow and poplars); 87,000 hectares are mostly swamp and meadow vegetation with patches of shrubs. The lack of precipitation and an abnormal increase in air temperature in July to a historical maximum for the research region of +40.5-42.0 °C led to the acceleration of evapotranspiration and depletion of moisture reserves from the reservoir. This led to deterioration of plant vegetation, their drying and partial degradation. It was established that at the end of September 2024, 67.3 % of the plants had varying degrees of vegetation disturbance. A significant level of disturbance was recorded on 43.5 % of the area, including 19.5 % of vegetation degraded and on the verge of destruction. From July 27 to August 19, burning of plants on the area of 320 hectares was recorded in the upper part of the reservoir. Negative processes led to a decrease in the area of healthy vegetation by 26.3 thousand hectares. It has been proven that the stable tendencies to strengthening negative climatic anomalies and the artificial regulation of small volumes of discharges from the Dnipro HPP to the territory of the former Kakhovka reservoir complicate the conditions for plant survival. In the future, this will reduce the density of plants with good vegetation, increase the areas of degraded cover and dryness, increase the frequency of fires, cause the loss of stability of the newly created ecosystem and lead to the destruction of plant centers.

Keywords: Kakhovka reservoir, vegetation, climate, hydrology, disturbance, ecocide, Sentinel 2, NDVI, NDMI, NDWI.

Acknowledgments. The research is supported by the Canadian Institute of Ukrainian Studies (CIUS) of the University of Alberta. Grant – “A Spatial-Temporal Study of the Consequences of Russian armed aggression in the Lower Dnipro Basin”.

The project was supported by Documenting Ukraine, a program of the Institute for Human Sciences, IWM Vienna. Grant – “Research into the consequences of the Kakhovka dam destruction and the reservoir drainage for the population of Ukraine”.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Yu., Gleick, P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. DOI: 10.1080/02508060.2023.2247679.
2. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. DOI: 10.1080/00207233.2024.2320033.
3. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Bahinskiy O. Natural and climatic transformation of the Kakhovka Reservoir after the destruction of the dam. *Journal of Ecological Engineering*, 2024. Vol. 25(7). 82–104. DOI: 10.12911/22998993/187961.
4. Hapich H., Onopriienko D. Ecology and economics of irrigation in the south of Ukraine following destruction of the Kakhov reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314859.
5. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Hyrlya L. The impact of the Russian armed aggression on the condition of the water area of the Dnipro-Buh

- estuary system. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2024. Vol. 25(11). 58–82. DOI: 10.12912/27197050/192154.
6. Пічура В. І., Потравка Л. О., Багінський О. С. Вплив війни на стан акваторії Дніпровсько-Бузької естуарної системи та Чорного моря. *Водні біоресурси та аквакультура*, 2024. № 1(15). С. 105–136. DOI: 10.32782/wba.2024.1.9.
 7. Kuzemko A., Prylutskiy O., Kolomytsev G., Didukh Y., Moysiyyenko I., Borsukevych L., Chusova O., Splodytel A., Khodosovtsev O. Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*, 2024. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4137799/v1.
 8. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. Natural Processes in the Area of the Former Kakhovske Reservoir After the Destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*, 2024. Vol. 17(2). 147–164. DOI: 10.2478/jlecol-2024-0014.
 9. Dovhanenko D. O., Yakovenko V. M., Brygadyrenko V. V., Boyko O. O. Characteristic of the dried-up zone formed as a result of the breach of the Kahovka dam. *Biosystems Diversity*, 2024. Vol. 32(2). 285–295. DOI: 10.15421/012431.
 10. Gao B.-C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996. Vol. 58. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
 11. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy Y., Drobitko, A. Water balance of winter wheat following different precursors on the Ukrainian steppe. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. 1–18. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314891.
 12. Ashok A., Rani H.P., Jayakumar K.V. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021. Vol. 23. 100547. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100547.

REFERENCES

1. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Yu., Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. DOI: 10.1080/02508060.2023.2247679.
2. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. (2024). The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. DOI: 10.1080/00207233.2024.2320033.
3. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Bahinskyi O. (2024). Natural and climatic transformation of the Kakhovka Reservoir after the destruction of the dam. *Journal of Ecological Engineering*, Vol. 25(7), 82–104. DOI: 10.12911/22998993/187961.

4. Hapich, H., Onopriienko D. (2024). Ecology and economics of irrigation in the south of Ukraine following destruction of the Kakhov reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314859.
5. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Hyrlya L. (2024). The impact of the russian armed aggression on the condition of the water area of the Dnipro-Buh estuary system. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, Vol. 25(11), 58–82. DOI: 10.12912/27197050/192154.
6. Pichura V., Potravka L., Bahinskyi O. (2024). *Vplyv viiny na stan akvatorii Dniprovsko-Buzkoi estuarnoi systemy ta Chornoho moria*. [Impact of the war on the state of the Dnipro-Buh estuary system and the Black sea]. *Water Bioresources and Aquaculture*, no. 1(15), 105–136. DOI: 10.32782/wba.2024.1.9. [in Ukrainian].
7. Kuzemko A., Prylutskyi O., Kolomytsev G., Didukh Y., Moysiyenko I., Borsukevych L., Chusova O., Splodytel A., Khodosovtsev O. (2024). Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4137799/v1.
8. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. (2024). Natural Processes in the Area of the Former Kakhovske Reservoir After the Destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*, Vol. 17(2), 147–164. DOI: 10.2478/jlecol-2024-0014.
9. Dovhanenko D. O., Yakovenko V. M., Brygadyrenko V. V., Boyko O.O. (2024). Characteristic of the dried-up zone formed as a result of the breach of the Kahovka dam. *Biosystems Diversity*. Vol. 32(2), 285–295. DOI: 10.15421/012431.
10. Gao B.-C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
11. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy Y., Drobitko A. (2024). Water balance of winter wheat following different precursors on the Ukrainian steppe. *International Journal of Environmental Studies*, 1–18. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314891.
12. Ashok A., Rani H. P., Jayakumar K. V. (2021). Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Vol. 23, 100547. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100547.