



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257>

УДК 504.064.3:(528.831.5:629)

## Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції

Л. П. Ліщенко\*, В. Є. Філіпович

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Внаслідок військових дій і підриву греблі Каховського водосховища територія Нижнього Придніпров'я опинилася у надзвичайній екологічній ситуації, що призвело до раптових, неочікуваних швидкоплинних змін у природно-технічній системі регіону, пов'язаних насамперед, з дефіцитом водозабезпечення, з одного боку, та затопленням з другого. Переважно територія Лівобережжя і днище водосховища недоступне для наземних спостережень, тому актуальним є використання супутникових даних для оперативного моніторингу екологічного стану. За даними супутників Landsat 8,9 проаналізовано масштаби затоплення і процеси осушення певних відрізків долини р. Дніпро та розвиток цих подій і їхні наслідки з плином часу. Також проаналізовано стан поверхні за показниками водного індексу, вегетаційного індексу, температури поверхні та класифікування земного покриву осушеного днища водосховища за 5 типами поверхні. За результатами досліджень визначені площі затоплення і підтоплення території через три дні після підриву дамби, які становили 620,3 км<sup>2</sup>. Проаналізовано динаміку осушення днища водосховища за 4 місяці після сходження води. Площа осушення на досліджуваній ділянці, що колись займав відомий Великий Луг становила приблизно 75%. За даними супутникового моніторингу, в зоні осушення водосховища накопичені донні відклади, але, незважаючи на 65-річний період експлуатації водосховища, вони не змогли повністю замулити ні русло Дніпра, ні окремі його протоки та стариці. Більшість гідрографічних об'єктів долини Дніпра відновлюються в тих же межах і обрисах. Частина колишньої високої заплави і першої та другої надзаплавних терас вийшли з води і вже заростають рослинністю. Це стосується також затоплених гирлових частин балок. Заболочені низинні ділянки заплави так і лишаються заболоченими, в них накопичений значний донний осад у вигляді мулів та сапропелю, потужність та хімічний склад яких потрібно досліджувати. Прибережні (присхиліві) частини, збагачені делювіально-ілювіальними відкладами, є більш родючими, вони перші покрились паростками деревної і трав'яної рослинності, щільність якої дуже висока за показниками NDVI. Сформувались нові прируслові вали, коси, банки із річкової дрейсени (мушлі) та алювіального піску, які, вочевидь, можуть перевідкладатися, змінювати абрис під час повеней та інтенсивних попусків води з верхніх водосховищ. Мулисті ґрунти, що висихають та розтріскуються, потребують якнайшвидшого закріплення рослинністю і цей процес відбувається. Заболочені низинні ділянки заплави також заростають рослинністю, але за рахунок евтрофікації непроточних озер і стариць, вже через 3 місяці після оголення дна повністю віднесені до класу водно-болотних поверхонь. Запропонована методика оперативного дистанційного аналізу геоecологічного стану територій, порушених внаслідок руйнації великих гідротехнічних споруд, пройшла успішну адаптацію і може бути застосована як базова при подібних ситуаціях.

**Ключові слова:** супутникові дані, техногенна катастрофа, затоплення, підтоплення, осушення, оперативний супутниковий моніторинг, військові дії.

© Л. П. Ліщенко, В. Є. Філіпович. 2024

### Вступ

Оперативний супутниковий моніторинг вирішує задачі відстеження швидкоплинних і раптових змін, що відбуваються в геосистемі внаслідок стихійних лих, неочікуваних змін, катастроф, терактів. Здебільшого це зміни окремих складових природно-техногенної системи. Вони можуть бути як техногенно, так і природно обумовленими завдяки впливу низки чинників. Але будь-який вплив руйнує зв'язки в існуючій геосистемі і переводить її із відносно стабільного екологічного стану у динамічний, перетворенню і змінам піддаються й інші складові системи. Так, підриву греблі Каховської ГЕС на

Дніпрі 06 червня 2023 р. російськими військовими порушив стабільність існуючої геосистеми, сформованої з 50-х років минулого століття (функціонування ГЕС і Каховського водосховища) і викликав два різних за спрямованістю процеси – підтоплення і осушення, з усіма можливими екологічними наслідками та завдав великих, не тільки економічних, а й екологічних збитків.

Каховське водосховище є найбільшим за площею та найнижчим в каскаді Дніпровських водосховищ. Об'єм – 18,2 км<sup>3</sup>, площа водного дзеркала – 1560 км<sup>2</sup>, початок експлуатації – 1956 рік. Через підриву греблі Каховської ГЕС сталося затоплення і підтоплення великих територій Нижнього Дніпра нижче греблі та різке пониження рівня води Каховського водосховища, з катастрофічним осушенням днища.

\*E-mail: [Lischenko.lp@gmail.com](mailto:Lischenko.lp@gmail.com)

Територія басейну Каховського водосховища опинилася у надзвичайній ситуації, що призвело до раптових, неочікуваних змін у природно-технічній системі регіону, пов'язаних насамперед з дефіцитом водозабезпечення, з одного боку, та затопленням, з другого. Затоплення долини р. Дніпро нижче греблі відбувалося швидкоплинно і досягло свого максимуму на третю–п'яту добу після підриву дамби. До кінця червня рівень води знизився до звичайного рівня. Дослідження на цій ділянці концентрувались на визначенні масштабів і площі затоплення та підтоплення населених пунктів і сільськогосподарських територій для подальшого економічного оцінювання завданих збитків.

Наслідки осушення Каховського водосховища більш плинні в часі і призводять до значних, часто не передбачених, змін в екосистемі Нижнього Дніпра.

Глобальне та регіональне підвищення температури та відсутність снігового покриву – це значний виклик для більшості українських водойм, а для цієї ділянки може стати взагалі катастрофою через надмірну евтрофікацію. Внаслідок різкого збільшення дренажу території малі річки взагалі зникають або перетворюються на непроточні водойми. Різко зменшуються запаси якісної питної води, а для цього регіону це вже давно є катастрофою. Наразі, вода з Дніпра – технічна, не відповідає санітарним нормам через надмірне антропогенне навантаження. З осушенням Каховського водосховища і зниженням базису ерозії виникла додаткова небезпека – швидке зниження рівня підземних вод та зміна мікрокліматичних показників у бік зниження вологості і посилення посухи. В таких нових умовах необхідно вести постійний геоекомоніторинг за процесами, що відбуваються, у межах зниклого водосховища і на прилеглих територіях.

### Мета роботи

В умовах війни і поки що недоступності території для наземних спостережень, головними методами досліджень геоекологічного стану є оперативний супутниковий моніторинг, мета якого – за рахунок цифрової обробки багатоспектральних супутникових даних відстежити зміни, що зазнали геоекосистеми Нижнього Придніпров'я і басейну Каховського водосховища та спрогнозувати сценарії їхнього подальшого розвитку.

### Методи і матеріали досліджень

У дослідженнях задіяні відкриті супутникові дані Landsat 8, 9 та Sentinel 2 (USGS та ESA) за період до катастрофи і після з якомога коротшим інтервалом для відстеження розвитку подій. На всіх етапах оперативного аналізу застосовувалась цифрова обробка багатозональних і радарних супутникових даних за спеціальними алгоритмами. Додатково залучались існуючі архівні, історичні, фондові, та описові матеріали. Проводився аналіз стану поверхні за показниками нормалізованих водного і вегетаційного індексів, температури поверхні та класифікування земного покриву осушеного днища водосховища за типами поверхні з метою визначення

швидкості перетворень дна водосховища – осушення, заростання, відновлення русла.

### Результати дослідження

Дослідження екологічної катастрофи, що була спричинена підривом військами РФ греблі Каховського водосховища, проведені на двох ділянках. Перша – від порушеної дамби до впадіння р. Дніпро в Чорне море і друга – від дамби вгору по Дніпру, на субширотному відрізку долини р. Дніпро, фактично 75 % дна Каховського водосховища (Рис. 1)



Рис. 1. Оглядова карта ділянок дослідження. Основа – космічне зображення сервісу Google Earth

### 1. Оперативний геономіторинг затоплення і підтоплення долини р. Дніпро нижче підірваної дамби Каховського водосховища

Використано багатозональні дані із супутників Landsat 8, 9 від 01.06.2023 р. (до підриву) та від 09.06.2023 р. (через три доби після). В результаті аналізу супутникових даних, зокрема і цифрової моделі місцевості, побудованої за даними SRTM v.3 plus (Рис. 2), визначено, що площа затоплення через три доби після руйнування дамби у 3,6 разу перевищує території відкритої води до підриву дамби (Рис. 3–6).

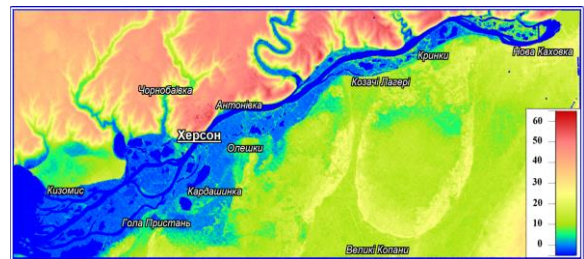
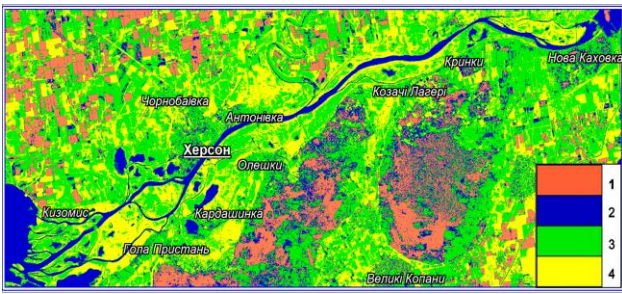


Рис. 2. Схема гіпсометрії поверхні на відрізку долини р. Дніпро від зруйнованої дамби до гирла.



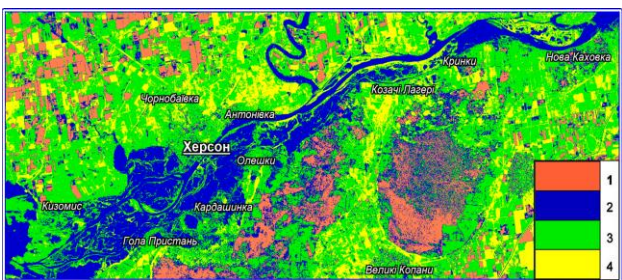
Рис. 3. Кольоровий композит каналів 7, 5, 3 K3 Landsat LC08 від 01.06.2023 р. Мозаїка знімків LC08 L2SP\_179027 та LC08 L2SP\_179028



**Рис. 4.** Розподіл значень Водного спектрального індексу NDWI. Обробка КЗ Landsat LC08 від 01.06.2023 р.  
Умовні позначення: Значення NDWI: 1 – від  $-0,200$  до  $-0,015$  – сухий відкритий ґрунт, орні землі; 2 – від  $-0,15$  до  $+0,05$  – водна поверхня; 3 – від  $+0,05$  до  $+0,25$  – зволожені і підтоплені ділянки; 4 – від  $+0,25$  до  $+0,50$  – сухі ділянки з розрідженою рослинністю



**Рис. 5.** Кольоровий композит каналів 7, 5, 3 КЗ Landsat LC09 від 09.06.2023 р. Мозаїка знімків LC09 L2SP\_179027 та LC09 L2SP\_179028



**Рис. 6.** Розподіл значень водного спектрального індексу NDWI. Обробка КЗ Landsat LC09 від 09.06.2023 р.  
Умовні позначення: Значення NDWI: 1 – від  $-0,200$  до  $-0,015$  – сухий відкритий ґрунт, орні землі; 2 – від  $-0,15$  до  $+0,05$  – водна поверхня; 3 – від  $+0,05$  до  $+0,25$  – зволожені і підтоплені ділянки; 4 – від  $+0,25$  до  $+0,50$  – сухі ділянки з розрідженою рослинністю

Для оперативного оцінювання масштабів затоплення обрано Нормалізований диференційний індекс вологості – NDWI (Normalized Difference Water Index), який добре себе зарекомендував при аналогічній ситуації при затопленні Приірпіння у Київській області (Мичак А. Г. та ін., 2023).

Індекс розраховується за формулою:

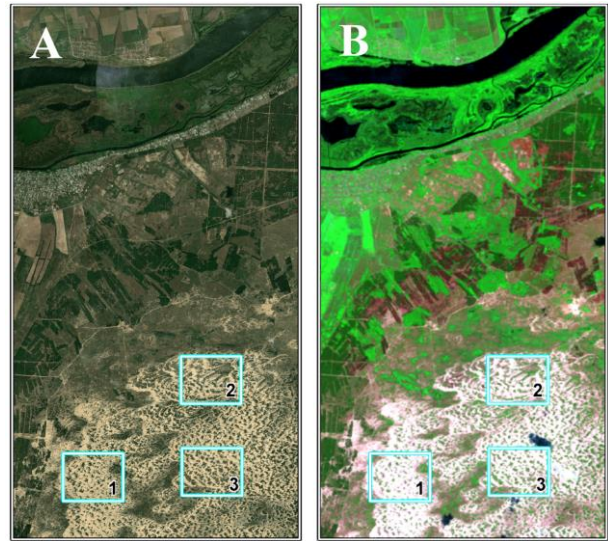
$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR), \quad (1)$$

де Green і NIR – коефіцієнти відбиття в зеленому (0,56 мкм) і ближньому інфрачервоному (0,83 мкм) діапазонах електромагнітного спектра.

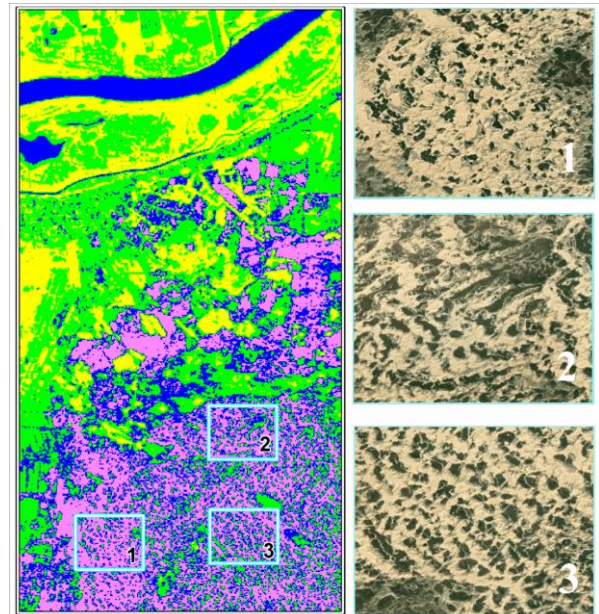
Попередній аналіз показав, що на правому березі Дніпра затоплена значна частина м. Херсон (Корабельний острів), на лівому міста Оleshки, Гола Пристань, багато сільських та дачних поселень.

Разом з тим, з'ясувались і деякі проблеми при застосуванні водних спектральних індексів. Так,

масиви Оleshківських пісків мають горбисту поверхню (дюни, бархани), які на момент знімання утворюють невеликі плями тіні, які при спробі виділити сигнатуру відкритої води дають аналогічні значення і зливаються з ними (Рис. 7, 8).



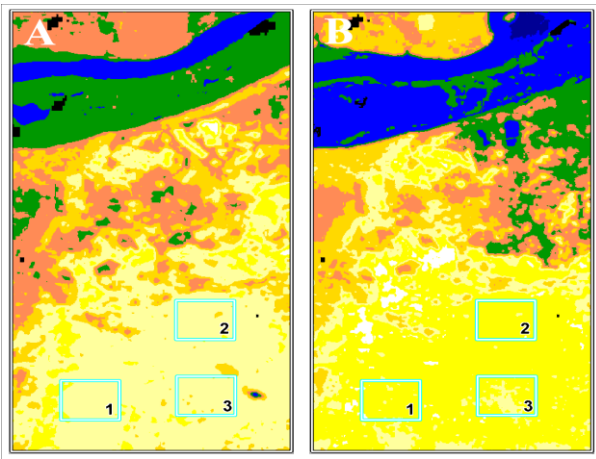
**Рис. 7.** Оleshківські піски на КЗ.  
А – космічне зображення з сервісу Google Earth;  
В – кольоровий композит Landsat 8 від 01.09.2023 р.,  
контурами блакитного кольору позначені ділянки аналізу  
текстури зображення



**Рис. 8.** Похибка визначення водної поверхні за допомогою спектрального індексу NDWI у межах Оleshківського піщаного масиву (зліва) та розподіл освітлених та тінєвих поверхонь на локальних ділянках (праворуч)

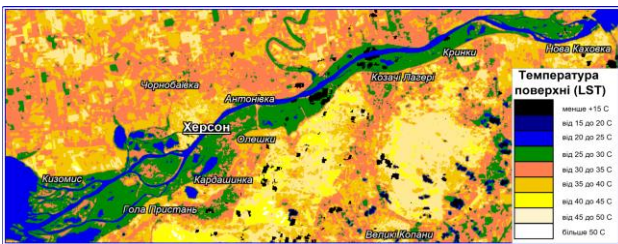
Вирішити цю проблему запропоновано у комплексному аналізі водного індексу NDWI, розподілу температури поверхні (LST) з цифровою моделлю місцевості (див. Рис. 2).

Так, на картах розподілу температур земної поверхні (LST) масиви Оleshківських пісків контролюються прогріванням від  $40$  до  $45^{\circ}\text{C}$  і вище та практично однорідною (за температурою) поверхнею. Водночас температура водної поверхні переважно  $20$ – $25^{\circ}\text{C}$  і також однорідна (Рис. 9).

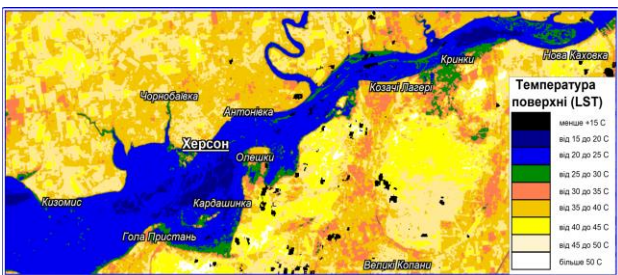


**Рис. 9.** Водна поверхня і масиви Олешківських пісків на картах LST: А – розраховано за даними Landsat 8 від 01.06.2023 р. та В – розраховано за даними Landsat 9 від 09.06.2023 р. Блакитні квадрати – контури локальних ділянок аналізу помилок NDWI

Загалом, з погляду оперативного визначення меж затоплення, максимально інформативними, разом з водним індексом NDWI виявилися карти температури земної поверхні (LST), що розраховувались за даними теплового сенсора супутників Landsat 8, 9 (Рис. 10, 11).



**Рис. 10.** Розподіл температур земної поверхні в долині р. Дніпро до підриву дамби Каховського водосховища станом на 01 червня 2023 р.

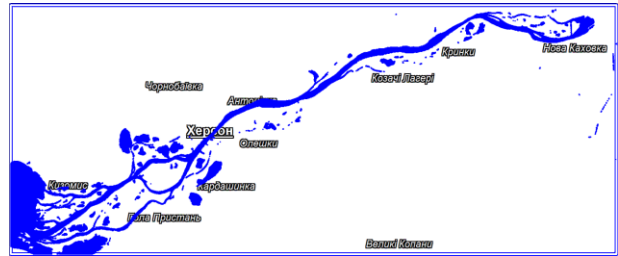


**Рис. 11.** Розподіл температур земної поверхні в долині р. Дніпро на третій день після підриву дамби Каховського водосховища станом на 09 червня 2023 р.

Таким чином аналіз контрасту температур земної і водної поверхні, з урахуванням рельєфу долини р. Дніпро, дав змогу визначити площі підтоплення та затоплення на ділянці від зруйнованої дамби Каховського водосховища до гирла р. Дніпро. Векторна форма подання даних у побудованій ГІС дала змогу оцінити масштаби катастрофи (Рис. 12, 13).

До підриву дамби Каховського водосховища дзеркало відкритої води в долині р. Дніпро за даними ДЗЗ становило 170,2 кв.км, зокрема і заповнений Кримський канал. Після підриву дамби військами РФ площа водної поверхні в межах досліджуваної

території визначена у 620,3 км<sup>2</sup>, що добре корелюється з даними голови військової адміністрації Херсонської області Олександра Прокудіна. На ранок 8 червня 2023 р., за оперативними даними, затоплено 600 км<sup>2</sup> Херсонської області, з них 32% – правобережжя та 68% – лівий берег (<https://www.slovoidilo.ua/2023/06/08/novyna/suspilstvo/>).

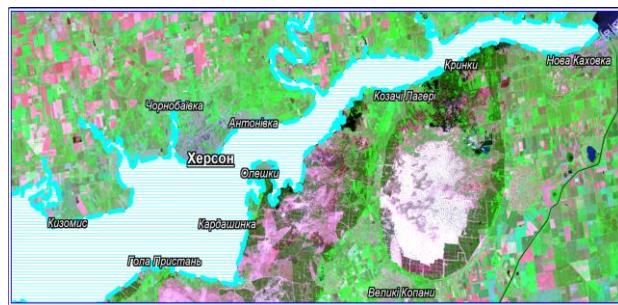


**Рис. 12.** Векторний шар водної поверхні до руйнування дамби



**Рис. 13.** Векторний шар водної поверхні після руйнування дамби

Приріст дзеркала відкритої водної поверхні становив 450,1 км<sup>2</sup> затоплених населених пунктів, садів, городів, полів з сільськогосподарською продукцією (Рис. 14). Затоплення і підтоплення населених пунктів показано на Рис. 15.



**Рис. 14.** Площа затоплення і підтоплення земель у долині р. Дніпро внаслідок підриву дамби Каховського водосховища станом на 9 червня 2023 р. Основа – кольоровий композит 7, 5, 3 каналів супутника Landsat 9



**Рис. 15.** Карта затоплення населених пунктів у долині р. Дніпро та його притоків станом на 9 червня 2023 р. Жовтим кольором позначено населені пункти, блакитною штриховкою – зона затоплення та підтоплення.

Отже, застосування супутникових даних на ділянці від підірваної дамби до гирла дало змогу оперативно оцінити масштаби лиха в долині р. Дніпро та визначити площу затоплення населених пунктів і сільськогосподарських угідь, завдяки чому надалі можна буде оцінити економічні та екологічні збитки, завдані нашій Державі військами РФ.

## 2. Оперативний геомоніторинг стану дна Каховського водосховища у результаті катастрофічного спуску води

Основними морфометричними характеристиками Каховського водосховища були: площа водозбору – 475000 км<sup>2</sup>, площа водоймища – 2160 км<sup>2</sup>, середня глибина – 8,4 м, максимальна – 24 м, довжина – 230 км, середня ширина – 9,3 км, максимальна – 25 км. Для середнього за водністю року коефіцієнт умовного водообміну, що характеризує проточність водосховища, дорівнював 2,69, для багатоводного – 4,77. Висота греблі – 30 м (Еколого-геологічні проблеми Каховського водосховища, 2008). Але більшість верхньої субширотної частини водосховища, що сягала 24 км завширшки (Кінські плавні) була мілководною, мало проточною, із застійними явищами та цвітінням води, з глибинами, що не перевищували 2 м.

На території, прилеглої до басейну Каховського водосховища, сформувався потужний гірничо-промисловий комплекс – видобуток та збагачення залізної та марганцевої руди відкритим і шахтним способом, видобуток граніту, будматеріалів. У містах Кривий Ріг, Запоріжжя, Нікополь, Марганець, Покров, Енергодар, Зеленодольск, Херсон сконцентрувалися підприємства основних галузей промисловості України. Широкий розвиток гірничо-видобувної, енергетичної, металургійної, машинобудівної і переробної галузей промисловості створив велике техногенне навантаження на довкілля водозбірному басейну Каховського водосховища, що сприяло забрудненню всіх природних сфер Землі та значною мірою сформувало проблемну екологічну ситуацію його басейну і безпосередньо стану “цвітучого моря”, а на теперішній час, вододефіцитної території.

Енергетично-промисловий комплекс регіону зробив воду непридатною для вживання безпосередньо з поверхневих джерел, хоча багато містечок і сіл вздовж Каховського водосховища використовували її як питну. Гірничий комплекс не тільки змінив зовнішній ландшафт, а й порушив геологічне середовище, знищив культурний шар з безліччю артефактів давнини – Січей, зимівників, курганів, історично значущих поховань (Рис. 16)

Ще у 2008 році наголошувалося, що одним із шляхів виходу з передкризового геоекологічного стану є створення на території всього промислового Придніпров'я, в цілому, більш жорсткого контролю за використанням геологічного середовища, впровадження ресурсозберігаючих технологій, легалізація екологічних природоохоронних заходів та гармонізація відносин суспільства та природного середовища на основі басейнового підходу, з

урахуванням впливу всієї інфраструктури, яка належить до басейну Каховського водосховища (Ліщенко Л. П., Сандул В. А., 2008).

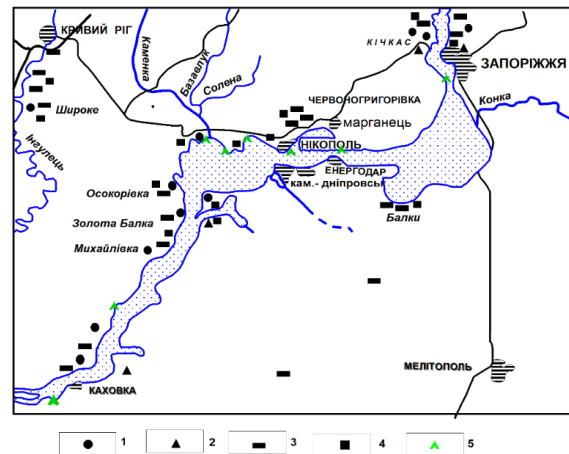


Рис. 16. Археологічні культури і пам'ятники Нижнього Придніпров'я. (Бронников В. К. і др., 1994):

- 1 – археологічні культури другої половини IV і початку III тис. до н.е.;
- 2 – основні неолітичні пам'ятки середини другої половини III тис. до н.е.;
- 3 – основні пам'ятки пізнього неоліту (кінець III – початок II тис. до н.е.);
- 4 – культури і групи пам'яток раннього періоду епохи бронзи;
- 5 – розташування Запорозьких Січей

На сьогодні, у зв'язку з військовим вторгненням росії, ці виклики загострилися і виникли нові проблеми, пов'язані з терактом. За інформацією Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України, станом на 18 червня 2023 р. відбулось утворення низки роз'єднаних водойм сумарною площею менше третини водосховища (655,9 км<sup>2</sup>), з тенденцією до скорочення площі водної поверхні, стало неможливим виконання водосховищем його функцій, формування основного русла р. Дніпро в межах території водосховища. Це дає підстави вважати, що Каховське водосховище через 13 днів після російського теракту фактично перестало існувати (Прес-служба НАН України, 18.06.2023).

Для геомоніторингу швидкоплинних змін екостану дна спущеного водосховища вибрана субширотно частина водосховища, як історично значуща територія, колиска Запорізького козацтва, землі українських Вольностей (Яворницький Д. І., 1995).

Нижня руслова частина водосховища від греблі ГЕС до мису Бабіне завдовжки 92 км витягнута в північно-східному напрямі. Верхня нагадує озеро і має загальний субширотний напрям, утворилась на місці затопленого Великого Лугу (Рис. 17).



Рис. 17. Великий Луг Запорозький (Чабаненко В., 2008)

Частина даних з досліджень науковців, які проводились у 2005–2020 рр., застаріли, тобто докорінно змінилася ландшафтна структура цього регіону та техногенне навантаження, що її формує. Але беззаперечним є те, що водосховище мало найбільші накопичення донного осаду з великою кількістю шкідливих елементів у каскаді Дніпровських водосховищ. Про це свідчать попередні роботи гідрогеологів, геологів, гідробіологів, гідрологів, ландшафтознавців. Водосховище давало воду Південним степам, але береги правобережжя водосховища зазнавали підтоплення в місяцях припливів Базавлука, Чортомлика, Томаківки, Ревуна та присхилових крупних балок, піддавались руйнуванню внаслідок абразії та розвитку активних зсувів на підвищених ділянках (місцями суходол втрачав 2–3 м на рік).

Дистанційний моніторинг змін у стані осушеного днища колишнього Каховського водосховища проведено за багатозональними знімками з просторовим розрізненням на місцевості 30 м і отриманими із супутників місії Landsat-8, 9 за період червень–жовтень 2023 року.

Гідрологічний режим цієї ділянки різко змінився в результаті сходження води, починаючи з червня 2023 року, та знизився на Нікопольсько-Енергодарському створі водосховища до 7–9 м. Площі водних поверхонь протягом досліджуваних місяців постійно скорочувалися, що показує Рис. 18.

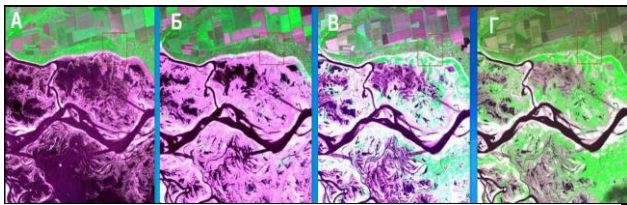


Рис. 18. Стан днища за КЗ Landsat 9: а) 18.06.2023 р.; б) 05.08.2023 р.; в) 06.09.2023 р.; г) 01.10.2023 р. (компонент каналів 4, 5, 3).

Аналіз розподілу поверхневих температур (LST – *land surface temperature*) на ділянці від сіл Кушугум – Канівське до сіл Золота балка – Бабине дав змогу простежити зміни LST, що відбулися за 3 місяці на дні спущеного водосховища та за останні роки на прилеглому суходолі. Використовувались два методи (шляхи) візуального порівняння температури поверхні, що обчислена за даними супутників серії Landsat: перший *оціночний* (відносний), і другий *цифровий*, оснований на порівнянні температур багатьох знімків, зведених до єдиної кольорової шкали інтервалів температур.

Оціночний метод базується на автоматичному застосуванні колоризації температури за алгоритмом ENVI Color Tables: Blue/Green/Red/Yellow від мінімальних до максимальних значень, без точних даних про температуру у середині інтервалу. Цей метод використовується тільки для аналізу поодиноких зображень та для порівняння структурних змін в розподілі тепла, що залежать від типів поверхні.

Так, оціночний аналіз поверхневої температури цієї території показав, наприклад, що в 2017 році

(Рис. 19) водна поверхня водосховища справляла охолоджувальний ефект на прилеглі до водосховища ділянки, існувало багато поливних земель (зелений колір). Найвищі показники LST спостерігаються над промисловими підприємствами, незарослими рослинністю відвалами, сільгоспугіддями, житловою забудовою міст (жовтий і червоний кольори).

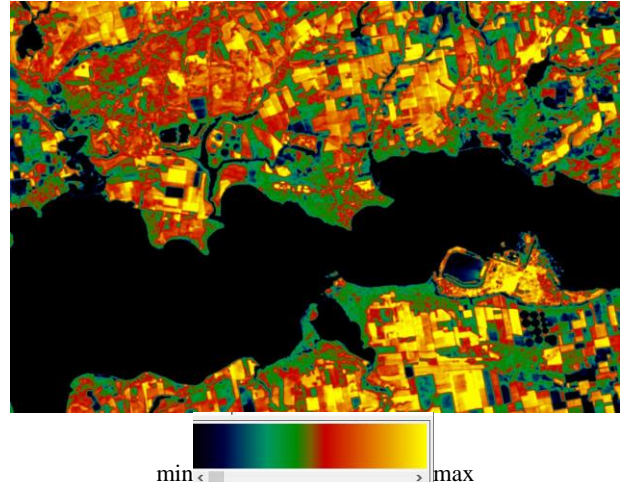


Рис. 19. Розподіл LST від 12.08.2017 р. показаний у кольоровій шкалі ENVI Color Tables: Blue/Green/Red/Yellow

Оцінка теплового поля поверхні в межах кожного знімка за 18 червня, 05 серпня та 06 вересня 2023 р. (Рис. 20) показала відносні перепади поверхневої температури для окремих класів поверхні. Візуально простежується, що з часом дно стає сушішим і більше прогрівається (особливо в серпні). Воно має більші амплітуди коливань та диференціацію між сухою, зволоженою і покритою рослинністю поверхнею, яка швидкоплинно змінює свій образ. Проте, вже у вересні спостерігається зменшення відносної диференціації LST при заростанні рослинністю і вже відчувається ефект охолодження покритих рослинністю ділянок.

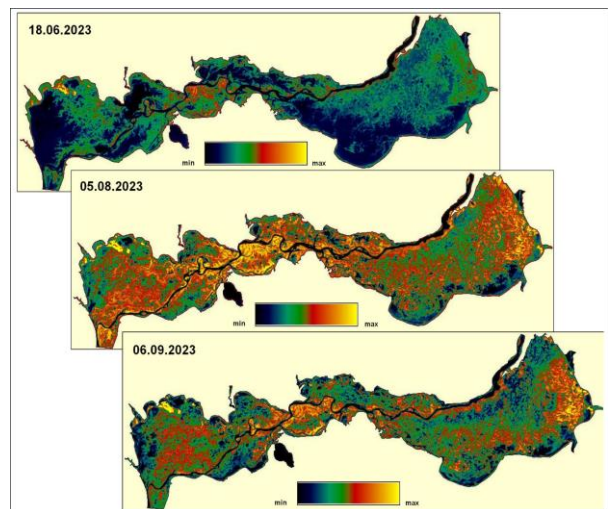
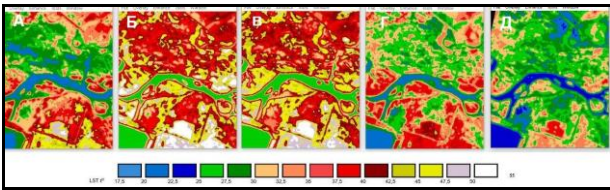


Рис. 20. Карти LST показані у кольоровій шкалі ENVI Color Tables: Blue/Green/Red/Yellow станом на 18.06.2023 р., на 05.08.2023 р. та на 06.09.2023 р.

За допомогою цифрового методу виконане порівняння поверхневих температур часового ряду

знімків, зведених до єдиної кольорової шкали інтервалів температур (Рис. 21). Простежена і проаналізована поверхнева температура за п'ятьма післяварійними часовими зрізами КЗ Landsat-9, за період з 18 червня до 01 жовтня 2023 р. Розраховані LST у градусах Цельсія коливались в інтервалі від +17°C до +43°C у межах водосховища та до +55°C на суходолі. Відмічається прогрівання осушених ділянок водосховища до +43°C в липні та серпні, а на 06 вересня поверхнева температура зменшилася і лишилась відносно високою на сухих оголених поверхнях.

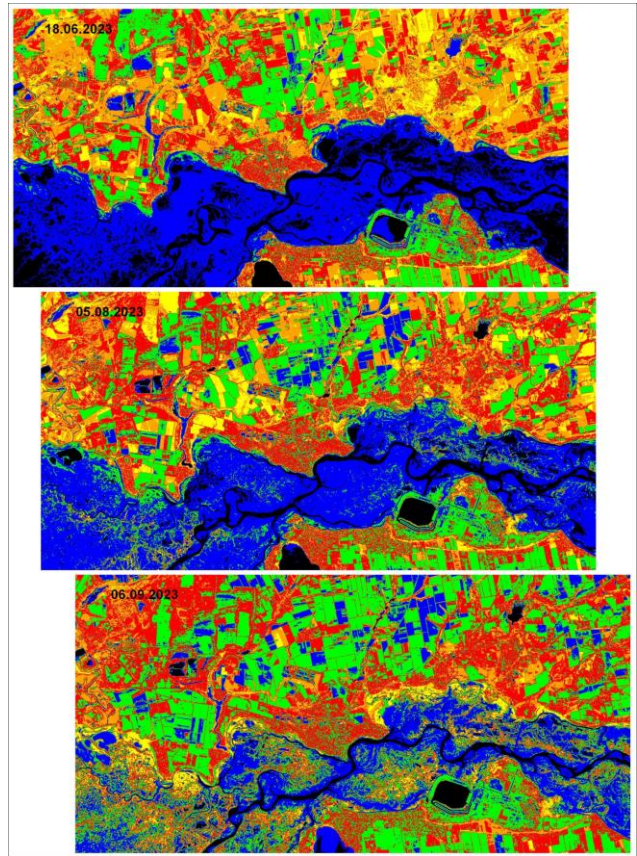
Проведений моніторинг LST територій вниз і вгору від порушеної дамби Каховської ГЕС до підриву і після показав, що цей метод є інформативним і дає конкретний приріст інформації як про затоплення і підтоплення територій у долині р. Дніпро, так і про динаміку осушення, формування річкової мережі та відновлення рослинності.



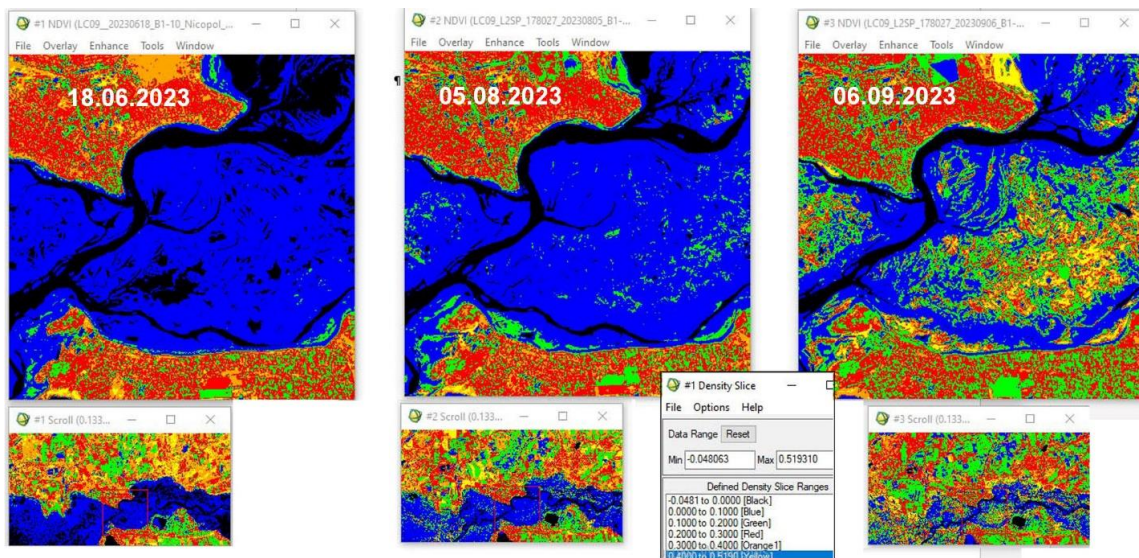
**Рис. 21.** Фрагмент карти розподілу LST розраховано в градусах Цельсія і показано у єдиній кольоровій шкалі для КЗ Landsat 9: а) 18.06.2023 р.; б) 13.07.2023 р.; в) 05.08.2023р.; г) 06.09.2023 р.; д) 01.10.2023 р.

В оперативному режимі явище заростання поверхні осушеного днища водосховища відстежувалось за результатами аналізу вегетаційного індексу NDVI (щомісячні спостереження). При порівнянні трьох часових зображень Landsat 9 чітко фіксується збільшення площ із показником NDVI вищим за 0,2, а до кінця літа 2023 р. показник місцями зростає до 0,5 (Рис. 22, 23). Спостерігається зростання та наростання вегетаційної маси. За отриманими даними можна

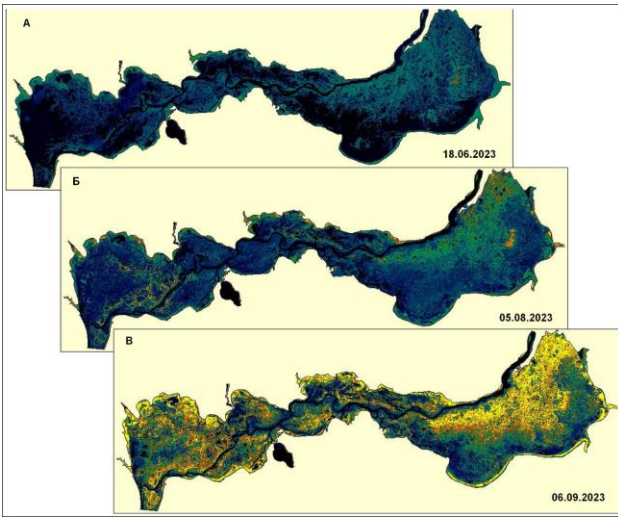
провести ранжування NDVI за інтенсивністю та обчислити площі. Використовуючи відносну (оціночну) шкалу проводиться порівняльний аналіз розподілу площ заростання (Рис. 24). На жаль, через відсутність завіркових робіт, не можна встановити види і типи рослинності.



**Рис. 22.** Розподіл вегетаційного індексу NDVI на Нікопольсько–Марганець–Енергодарській ділянці станом на: 18.06.2023 р.; 05.08.2023 р.; 06.09.2023 р.

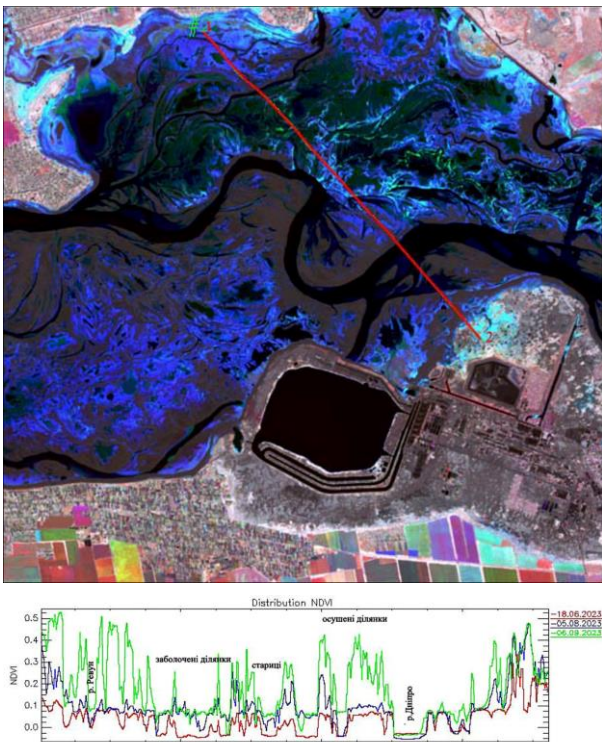


**Рис. 23.** Збільшений фрагмент показника NDVI на ділянці між Нікополем та Енергодаром



**Рис. 24.** Карти розподілу вегетаційного індексу NDVI в межах дніща Каховського водосховища. Подано в кольоровій шкалі ENVI Color Tables: Blue/Green/Red/Yellow станом на А) 18.06.2023 р.; Б) 05.08.2023 р.; В) 06.09.2023 р.

На профілі, проведеному через ділянку дніща водосховища між Нікополем та Енергодаром, показано зміни інтенсивності заростання поверхні (можливо за рахунок і цвітіння води, але сухі піщано-детритові поверхні біля русла залишилися без рослинності). Значення показника NDVI для трьох часових знімків за літні місяці зросли від 0,01 до 0,5 (Рис. 25).

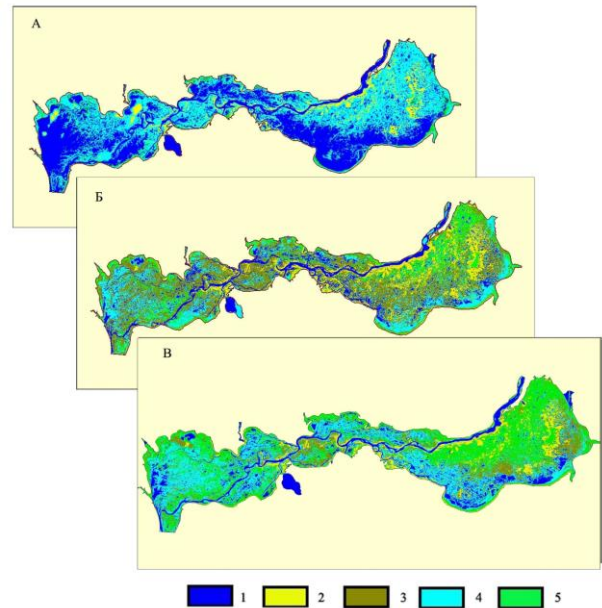


**Рис. 25.** Розподіл вегетаційного індексу NDVI за Landsat-9 на профілі між Нікополем та Енергодаром на 18 червня, 5 серпня та 6 вересня 2023 р.

За словами геоботаніка академіка НАН України Якова Дідуха, на осушених ділянках дна з'являється рудеральна та інша інвазійна рослинність, а біля

заповідника Кам'янська Січ більш звужена частина дніща та прилеглі раніш затоплені гирлові частини балок покрились щільними заростями верби, що відображається на знімках серпня і вересня 2023 р. Цей вчений, як і багато інших екологів і науковців, підкреслив, що екосистема буде відновлюватися природним шляхом, бо сама природа набагато розумніша. “Але цей процес потрібно моніторити і регулювати. Тому що поряд з місцевими видами там виростатимуть адвентивні – аморфа кущова, американський клен, ясен пенсильванський, амброзія та інші. Ми боремося з ними, бо вони змінюють природні екосистеми і витісняють наші види” (Дідух Я. В., 2023).

Гідрологічний режим цієї ділянки різко змінився в результаті сходження води, починаючи з 6 червня 2023 р. За цей період відбулась диференціація поверхні дніща з формуванням і розвитком нових геосистем. З цієї метою проведена класифікація низки космічних зображень КЗ Landsat 8,9 методом SVM (Support Vector Machine) за червень, серпень, вересень 2023 р. (Рис. 26). Інші КЗ цього періоду були з хмарністю або не охоплювали всю досліджувану площу. Всю поверхню дніща класифіковано за 5 класами земного покриття.



**Рис. 26.** Класифікація дніща Каховського водосховища за КЗ Landsat 9 методом SVM на 5 класів:

А – 18.06.2023 р.; Б – 05.08.2023 р.; В – 06.09.2023 р.  
Умовні позначення: Класи 1 – водна поверхня; 2 – прируслові підвищені сухі ділянки, поля дрейсени, піску, делювію; 3 – плоска мулиста суха поверхня; 4 – заболочена волога поверхня; 5 – поверхня покрита піонерною рослинністю.

Розглянемо динаміку зміни цих класів у часі.

Так, в перший місяць після руйнування греблі ГЕС спостерігався масовий схід води, відновлювалось основне русло Дніпра та деякі протоки у своїх межах, виникла велика кількість слабопроточних водойм та озерець (водна поверхня – 1 клас). Далі почали оголюватися поверхні, що становили підвищені ділянки дніща – піщано-детритові банки-острівці та прируслові вали складені русловим



піском та детритом (*Dreissena polymorpha* – двостулкові мушлі річкового молюска). Це сухі, з високим спектральним відбиттям освітлені підвищені ділянки – 2 клас.

Більш знижені вирівняні поверхні дна, що покриті мулистими та глинистими наносами осушувались повільніше. Вони при сходженні води, пересихаючи, розтріскувалися і ускладнювалися вторинною ерозією. Їх умовно назвали такироподібними за подібністю з формами, сформованими в аридних умовах (*плоскі мулисті поверхні осушені* – 3 клас). Потужності та мінералогічний склад мулу і наносів не досліджувались. З попередніх досліджень відомо, що Каховське водосховище впродовж 65-річного періоду існування накопичило велику кількість важких металів (Альхіна Т. М., 2008). До 30% оголеного дна зайнято сильно вологими мулистими поверхнями, що розташовані навколо останцевих озер та сегментоподібних старичних понижень, які переважно мають непроточний характер і з поверхні покриті водоростями, а надалі можуть заростати водно-прибережною рослинністю (*вологі заболочені поверхні* – 4 клас). Болотні угруповання, які сильно змінюються в абрисах, за рахунок осушення або обводнення через попуски води з верхнього водосховища та опади, що спостерігалися у третій декаді липня та другій декаді серпня і до 20% перевищували місячні норми. Впродовж трьох місяців за КЗ Landsat нами фіксується швидке заростання поверхонь 3 і 4 класу і окремо виділяється клас земної поверхні, покритої рослинністю різних видів (*умовно піонерна рослинність* – 5 клас). Площі цього класу постійно збільшуються і розширюються. Без завіркових досліджень на еталонах вид і тип цієї рослинності встановити за даними КЗ Landsat неможливо.

Проте, на знімках більшого просторового розрізнення (Sentinel 2) можна розділити рослинність, сформовану на заболочених ділянках, та прибережну на делювіальних суглинках.

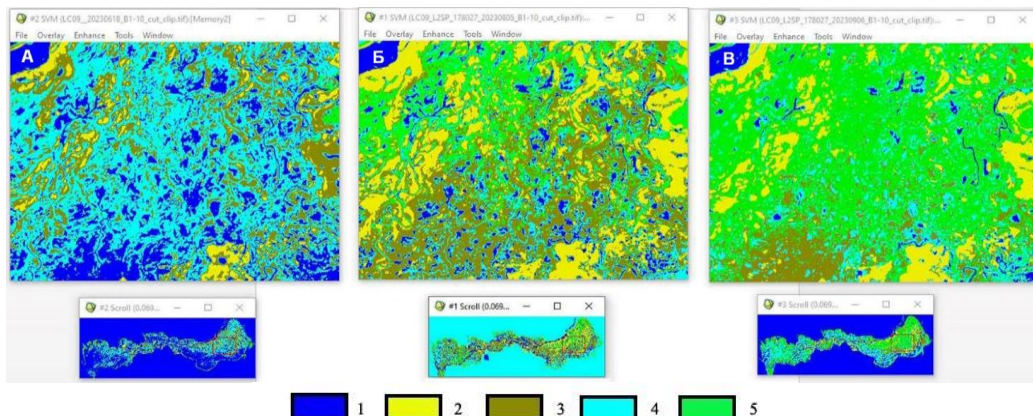
Загальна площа досліджуваної ділянки колишнього Великого Лугу становила 1622 км<sup>2</sup>. У результаті проведеної класифікації Landsat-8, 9 методом SVM на 5 класів визначено, що водна поверхня зменшилася з червня по жовтень на 500 км<sup>2</sup> (31%). За той самий час площа, яку зайняла піонерна

рослинність, збільшилася на 27%. Сюди увійшли ділянки, покриті як вищою сухопутною рослинністю, так і водопокривною рослинністю боліт. Майже не змінилась площа підвищених поверхонь, піщано-детритових прируслових валів та кіс, які не заростають через їх мінералогічний склад та слабке накопичення органічного матеріалу. Проте, відбулося заростання вирівняних мулистих осушених поверхонь, що багаті на поживні речовини (так званій, донний ілювій, сапропель). Підвищена кількість опадів (до 150% від середньої за місяць), що спостерігалися в другій декаді серпня, та перевищення температури на 1,8 градуса для усього серпня спонукали інтенсивну вегетацію у цей період. Площа поверхні, покритої різноманітною рослинністю, досягла на 5 вересня 33%. Дані розрахунків площ кожного класу зведені в таблицю.

**Таблиця.** Динаміка змін класів земного покриття дна Каховського водосховища у 2023 р., за даними Landsat-9

№	Дати зйомки Landsat-9	18.06. 2023 р.		06.08. 2023 р.		05.09. 2023 р.	
		км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
1	Водна поверхня	740,7	45,67	242,9	14,97	246,3	15,18
2	Сухі підвищені ділянки, піщано-детритові поверхні	49,8	3,07	203,1	12,52	136,8	8,43
3	Осушені вирівняні ділянки, покриті мулом	248,1	15,29	565,5	34,8	179,9	11,09
4	Вологі та заболочені ділянки, мулисті	479,4	29,56	382,1	23,56	523,1	32,26
5	Піонерна рослинність	104,0	6,41	229,5	14,15	535,9	33,04

На збільшеному фрагменті класифікованого зображення, що на Рис. 27, чітко простежується – наскільки швидко змінюється дистанційний образ структури земного покриття дна водосховища і відбувається заміщення одних класів поверхні іншими.



**Рис. 27.** Фрагмент збільшеного класифікованого зображення Landsat 9

методом SVM станом на: а) 18.06.2023 р.; б) 05.08.2023 р.; в) 06.09.2023 р.

## Висновки і прогноз розвитку

Запропонована методика оперативного оцінювання затоплення і підтоплення, що базується на комплексному аналізі даних багатозонального космічного знімання, і похідних цифрової обробки: нормалізованого водного індексу NDWI, карти розподілу температури поверхні (LST) з цифровою моделлю місцевості, пройшла апробацію і може бути використана для розв'язання задач оперативного геоecологічного моніторингу. Проведений моніторинг поверхневих температур за матеріалами K3 Landsat територій вниз і вверх від порушеної дамби, в періоди до підриву і після показав, що цей метод є інформативним і дає конкретний приріст інформації як про затоплення і підтоплення територій у долині р. Дніпро, так і про динаміку осушення, формування річкової мережі та відновлення рослинності.

Слід відмітити, що незважаючи на 65-річний період експлуатації, накопичені донні відклади не змогли повністю замулити ні русло Дніпра, ні окремі його протоки та стариці. Вони відновлюються в тих же межах і обрисах. Частина колишньої високої заплави і першої та другої надзаплавних терас вийшли з води першими і вже заростають рослинністю. Це стосується також затоплених гирлових частин балок. Заболочені низинні ділянки заплави так і лишаються заболоченими, в них накопичений значний донний осад у вигляді мулів та сапропелю, потужність та хімічний склад яких потрібно досліджувати. Прибережні (присхиліві) частини, збагачені делювіально-ілювіальними відкладами, є більш родючими, вони перші покрились паростками деревної і трав'яної рослинності, щільність якої дуже висока за показниками NDVI). Сформувались нові прируслові вали, коси, банки із річкової дрейсени (мушлі), алювіального піску та супіску які, вочевидь, можуть перевідкладатися, змінювати абриси під час повеней та інтенсивних попусків води з верхніх водосховищ. Мулісті сулинністі ґрунти, що висихають та розтріскуються потребують якнайшвидшого закріплення рослинністю і цей процес відбувається дуже швидко. Заболочені низинні ділянки заплави також заростають рослинністю, але за рахунок евтрофікації непроточних озер та стариць і вже через 3 місяці повністю віднесені до класу водно-болотних поверхонь.

Завдяки катастрофічній втраті води (до 500 м<sup>3</sup>/с, за даними ДСНС України), коли площа водної поверхні водосховища зменшилась з 2061 км<sup>2</sup> до 651,9 км<sup>2</sup> докорінно буде змінюватися і водний режим суходолу. Станом на вересень 2023 р. вже відмічається, що площа осушеного dna водосховища на досліджуваній ділянці становила 85%, а площа поверхонь, вкритих рослинністю, становить 33%. Відмічено інтенсивне заростання водно-болотною рослинністю замкнутих водойм. Але сподіваємося, що всі заплавні ріки Великого Лугу відомі в цій місцевості, ще за часів Козацтва – Підпільна, Павлюк, Ревун, Піскувата, Конка, Скарбная, Лапинка, Довгалівка, Белобородчина, Річище,

Пономар, що просто були поховані водами Каховського водосховища знову певною мірою відродяться і продовжать своє нове існування зберігаючи запаси поверхневих вод і стануть стабілізаційним чинником водного балансу Нижнього Дніпра.

Багато дослідників-біологів, ботаніків, екологів передбачають до 10–20 років на відновлення природних комплексів, але на іншому біоценотичному рівні. Вважаємо, що пониження рівня ґрунтових і підземних вод буде спонукати до активізації екзогенних процесів. Зменшиться або й зовсім зникне абразія берегів, але активізується ерозія, збільшиться заболочування у заплаві та на осушеному дні водосховища. Існують ділянки прибережних кіс, валів на піщаному ґрунті, які можуть важко закріплюватися, тому можуть активізуватися еолові процеси, а також ерозія. А ділянки понизь, що були заболочені, маючи певний рівень техногенного забруднення донних відкладів, при пересиханні ще довгий час можуть бути непридатними для використання. Але вони започаткують нові біогеоценози і будуть виконувати інші екосистемні послуги, наприклад, постачання донних мулів та сапропелю для покращення родючості ґрунтів. На прилеглому суходолі, в умовах дефіциту вологи, звичайно будуть спостерігатися зміни геоecологічного стану, деградації існуючих екосистем. Ділянки, які були під зрошенням або постмайнингово рекультивовані, а особливо порушені внаслідок військових дій, будуть потребувати нових технологій природокористування.

## Література

- Альошина, Т. М. (2008). Важкі метали у донних відкладах водосховищ. *Геолого-екологічні проблеми Каховського водосховища*, 30–32, Кривий Ріг.
- Бронников, В. К. и др. (1994) *Запорожская АЭС и окружающая среда*, 98, Харьков.
- Глава Херсонської ОВА назвав площу затоплення області через руйнування дамби (2023, Червень 08). *Слово і Діло*. URL: <https://www.slovaidilo.ua/2023/06/08/povyna/suspilstvo/hlava-xersonskoyi-ova-nazvav-ploshhu-zatoplennya-oblasti-cherез-rujnuvannya-damby#:~:text=>
- Дідух, Яків (2023). Нова екосистема на Каховському водосховищі сформується за 40 років. *РБК України*. URL: <https://www.rbc.ua/rus/styler/akademik-kiv-diduh-nova-ekosistema-kahovskomu-1695299383.html>.
- Еколого-геологічні проблеми Каховського водосховища (до 50-річчя створення)* (2008). (с. 74). Кривий Ріг: Серія Геологічне середовище. Антропогенні екосистеми.
- Каховське водосховище. (2023). Державне агентство водних ресурсів України. Басейнове управління водних ресурсів Нижнього Дніпра. URL: [https://buvmd.gov.ua/vodnye\\_resursy.htm](https://buvmd.gov.ua/vodnye_resursy.htm).
- Каховське водосховище через 13 днів після російського теракту фактично перестало існувати. (2023) *За інформацією Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України*. Прес-служба НАН України 18.06 2023.
- Ліщенко, Л. П., Сандул, В. А. (2008) Геоінформаційні системи та басейновий підхід в дослідженні Каховського водосховища. *Аерокосмічні*

спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. *GEO-UA*, 130–132, Київ: Наукова думка.

- Мичак, А. Г., Філіпович, В. Є., Мичак, Н. Г. (2023). Сучасні геоекологічні проблеми північної частини басейну р. Ірпін та шляхи їх вирішення (на основі матеріалів космічних зйомок і наземних досліджень). *Фізична географія та геоморфологія*, 46(1), 28–37. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.03>.
- Чабаненко, В. (2008) *Українська Атлантида*, 386, Запоріжжя.
- Яворницький, Д. И. (1995) *Запорожье в остатках старины и преданиях народа*. Ч. 1, 2. Киев: Веселка.

## References

- Alyokhina, T. M. (2008). Heavy metals in bottom sediments of reservoirs. *Geological and ecological problems of the Kakhov reservoir*, 30–32, Kryvyi Rih (in Ukrainian).
- Bronnikov, V. K. et al. (1994). *Zaporozhye nuclear power plant and environment*, 98, Kharkov (in Russian).
- Chabanenko, V. (2008). *Ukrainian Atlantis*, 386, Zaporizhzhia (in Ukrainian).
- Didukh, Yaki (2023). A new ecosystem will be formed at the Kakhovsky Reservoir in 40 years. *RBC of Ukraine*. URL: <https://www.rbc.ua/rus/stylar/akademik-kiv-diduh-nova-ekosistema-kahovskomu-1695299383.html> (in Ukrainian).
- Ecological and geological problems of the Kakhov reservoir (to the 50th anniversary of its creation)* (2008). (p. 74). Kryvyi Rih: Series Geological environment. Anthropogenic ecosystems (in Ukrainian).
- Kakhovka reservoir. (2023). State Agency of Water Resources of Ukraine. Lower Dnipro Basin Water Resources Administration. URL: [https://buvr.nd.gov.ua/vodnye\\_resursy.htm](https://buvr.nd.gov.ua/vodnye_resursy.htm).

## OPERATIONAL SATELLITE GEOMONITORING OF THE CONSEQUENCES OF THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER PLANT DAM

L. P. Lischenko, V. Ye. Filipovych

*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*

As a result of military operations and the explosion of the Kakhovka Reservoir dam, the Lower Prydniprovya area found itself in an environmental emergency, which led to sudden, unexpected, rapid changes in the natural and technical system of the region, primarily related to water supply shortages in one case and flooding in another. The majority of the Left Bank and the reservoir bottom are inaccessible for ground observations, and the use of satellite data for operational monitoring of the environmental situation is relevant. Using Landsat 8, 9 satellites, we analyzed the extent of flooding and drainage processes in certain sections of the Dnipro River valley, as well as the development of these events and their consequences over time. The surface condition was analyzed by the water index, vegetation index, surface temperature, and the land cover of the drained reservoir bottom was classified into 5 types of surface. Based on the results of the research, the areas of flooding and submergence of the territory three days after the dam was blown up were determined, which amounted to 620.3 km<sup>2</sup>. The dynamics of drainage of the reservoir bottom for 4 months after the water release was analyzed. The area of drainage in the study area, which was once occupied by the famous Velykyi Luh, amounted to approximately 85%. According to satellite monitoring in the reservoir drainage area, the accumulated bottom sediments, despite the 65-year period of the reservoir's operation, failed to completely silt up either the Dnipro riverbed or its individual channels and oxbows. They are being restored to the same extent and shape. A part of the former high floodplain and the first floodplain terrace was the first to come out of the water and is already overgrown with vegetation. This also applies to the flooded mouths of the beams. The west lowland areas of the floodplain remain swampy, with significant bottom sediment in the form of silt and sapropel accumulated in them, the thickness and chemical composition of which needs to be investigated. The coastal (slope) parts enriched with deluvial-illuvial sediments are more fertile, they were the first to be covered with sprouts of woody and herbal vegetation, the density of which is very high according to NDVI. New riparian berms, spits, banks of river driftwood (shells) and alluvial sand have formed, which can obviously be redeposited and change their shape during floods and intensive water releases from upper reservoirs. Silty soils that dry out and crack need to be covered with vegetation as soon as possible, and this process is underway. Wetlands of low-lying floodplains are also overgrown with vegetation, but due to eutrophication of non-flowing lakes and ponds, and after 3 months they are fully classified as wetlands. The proposed methodology of operational remote analysis of the geo-ecological state of the territories disturbed as a result of the destruction of large hydraulic structures has been successfully adapted and can be used as a basic one in similar situations.

**Keywords:** satellite data, man-made disaster, flooding, underflooding, drainage, operational satellite monitoring, military operations

*Рукопис статті отримано 06.03.2024  
Надходження остаточної версії: 25.03.2024  
Публікація статті: 30.03.2024*