



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.2.307>

УДК 528.8:556.5(477)

## Можливості використання вимірювань супутникової альтиметрії на прикладі оцінювання наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції

О. В. Томченко\*<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099>

Н. І. Магась<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465>

Н. А. Шевякіна<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580>

С. А. Загородня<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211>

І. В. Радчук<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4999-1258>

<sup>1</sup>ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, вул. Олесь Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

<sup>3</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

Руйнування греблі Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. спричинило одну з найбільших техногенних гідрологічних катастроф у Європі після аварії на Чорнобильській АЕС 1986 р.: за оцінками UNOSAT, протягом 6–9 червня 2023 р. було затоплено близько 620 км<sup>2</sup> території в межах нижньодніпровської дельти. Обмежений наземний доступ до прифронтових та окупованих територій робить методи дистанційного зондування Землі практично єдиним інструментом об’єктивного моніторингу таких подій. У роботі викладено методичний підхід до виявлення та оцінювання часової динаміки підтоплення на основі інтеграції даних супутникової альтиметрії Hydroweb (три віртуальні пости на відстані 10–33 км нижче греблі), наземних гідрометеорологічних спостережень (три пости Миколаївського та Херсонського ОЦГМ), а також радарних (Sentinel-1) та оптичних (Sentinel-2, Landsat-9) супутникових знімків. Для наземних постів використано регулярні дворазові спостереження та щогодинні вимірювання, виконані протягом місяця після 06.06.2023, що забезпечило детальне відстеження початку, піку та тривалості аномального підвищення рівня води. Для подолання несумісності вертикальних систем відліку (EGM2008 та Балтійської системи висот 1977 р.) застосовано аналіз аномалій рівня води  $\Delta H = H_i - \bar{H}_{base}$ ; базовим обрано період січня–травня 2023 р., а порогом статистичної значущості слугувало подвоєне стандартне відхилення базового ряду. На всіх шести постах зафіксовано статистично значуще аномальне підвищення рівня води з 6 червня 2023 р. Максимальні аномалії виявлено на Hydroweb-посту 5 (~5,63 м, 17 км нижче греблі), посту 4 (~3,59 м, 33 км) та наземному пості 2 (~5,24 м, м. Херсон), з поступовим зменшенням у напрямку гирла. Тривалість аномального стану на нижніх постах перевищує тривалість на верхніх, що відповідає гідродинаміці рівнинних річок при прориві дамби. Супутниковий аналіз SAR та оптичних даних підтвердив просторові масштаби затоплення прибережних і заплавлених територій. Запропонована методологія придатна для оперативного моніторингу техногенних катастроф на важкодоступних або окупованих територіях і слугує основою для подальшого оцінювання екологічних збитків.

**Ключові слова:** супутникова альтиметрія; Hydroweb; Sentinel-1 SAR; аномалія рівня води; техногенна катастрофа; басейн Нижнього Дніпра.

© О. В. Томченко, Н. І. Магась, Н. А. Шевякіна, С. А. Загородня, І. В. Радчук. 2026

### Вступ

З початку широкомасштабного вторгнення Росії в Україну у лютому 2022 року басейн Нижнього Дніпра та Каховська гребля стали об’єктами військової окупації. 6 червня 2023 р. Каховська гребля була зруйнована, що спричинило масштабне затоплення нижньодніпровської дельти та незворотні наслідки для природних і антропогенних систем регіону (Gleick et

al., 2023; Vyshnevskiy et al., 2023). За оцінками UNOSAT, від 6 по 9 червня 2023 р. у межах аналізованої території площею 19 000 км<sup>2</sup> було затоплено близько 620 км<sup>2</sup> землі (UNOSAT, 2023). Ця подія є найбільшою техногенною екологічною катастрофою в Україні після аварії на Чорнобильській АЕС 1986 р. Додатковим чинником є трансформація гідроекосистем Дніпро-Бузького лиману, що зафіксовано безпосередньо у місяці після події (Magas et al., 2023; Tomchenko et al., 2023).

\*Corresponding author / Автор для кореспонденції: Tomchenko O. V. / Томченко О. В. / e-mail: [olhatomch@gmail.com](mailto:olhatomch@gmail.com)

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

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

Обмежений доступ до прифронтових та окупованих територій не дає змоги проводити комплексне польове оцінювання наслідків катастрофи (Hartmane et al., 2024). У цих умовах методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та супутникова альтиметрія є практично єдиними інструментами для незалежного просторово-часового моніторингу гідрологічної ситуації та картування затоплень. Масштаб і характер затоплення значно перевищує будь-які природні паводкові події в басейні Дніпра і створює загрози для водної та продовольчої безпеки регіону (Strocal & Shevchuk, 2023).

Супутникова альтиметрія є одним із сучасних методів ДЗЗ, що забезпечує кількісне визначення висоти водної поверхні на глобальному рівні. Принцип методу ґрунтується на вимірюванні часу проходження радіолокаційного імпульсу від супутника до поверхні Землі та назад з урахуванням точно визначеної орбіти супутника та атмосферних поправок. Такий підхід дає змогу отримувати регулярні та високоточні спостереження змін рівня води в часі з точністю від кількох сантиметрів для великих озер до кількох дециметрів для малих річок (Kittel et al., 2021). Важливими ресурсами, що реалізують потенціал супутникової альтиметрії у гідрологічних дослідженнях, є Hydroweb (LEGOS/CNES, Франція) та DANITI (TU Munich, Німеччина) – глобальні бази даних рівнів води для річок, озер і водосховищ, які надають багаторічні часові ряди висоти водної поверхні на віртуальних станціях. Застосування цих ресурсів особливо цінне в регіонах з обмеженою мережею наземних спостережень, до яких з 2022 р. належить частина басейну Нижнього Дніпра. Детальна характеристика використаних баз даних наведена в розділі «Матеріали та методи».

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній літературі дослідження, пов'язані з руйнуванням Каховської греблі, зосереджені переважно на оцінюванні екологічних, гідрологічних і безпекових наслідків цієї події. Зокрема, у працях (Gleick et al., 2023; Vyshnevskiy et al., 2023; Shumilova et al., 2023 та Napich et al., 2024) розглянуто руйнування водної інфраструктури, вплив війни на водні ресурси України та ризики для водної безпеки. Окремі дослідження також документують зміни довкілля за відкритими супутниковими даними та узагальнюють вплив війни на природні комплекси України (Xu et al., 2024; Hartmane et al., 2024).

Окремий напрям становлять роботи, присвячені використанню дистанційного зондування для моніторингу повеней і екологічних наслідків збройних конфліктів. У цих дослідженнях показано високу ефективність SAR- і оптичних супутникових даних для виявлення затоплених територій, фіксації змін інфраструктури та оцінювання динаміки природних процесів у складних умовах спостережень (Munawar et al., 2022; Kaplan et al., 2022; Al-doski et al., 2013;

Stevens et al., 2011; Literathy, 1993). Водночас більшість таких підходів спирається переважно на один тип даних, без повноцінної інтеграції з гідрологічними вимірюваннями.

Окрему групу становлять роботи із застосування супутникової альтиметрії для моніторингу річок і озер. Дослідження (Sulistioadi et al., 2015; Halicki and Niedzielski, 2022; Kittel et al., 2021 та Yue et al., 2021) підтверджують, що альтиметричні ряди можуть бути ефективним джерелом інформації про зміну рівнів води, передусім, за нестачі наземних спостережень. Разом із тим питання інтеграції альтиметричних даних із наземними постами та супутниковим картуванням затоплення в умовах воєнно спричиненої катастрофи досі лишається недостатньо розробленим.

Попередні дослідження авторів, присвячені моніторингу антропогенних змін русел річок України та розподілу біотопів у природно-заповідному фонді засобами ДЗЗ, а також аналізу змін у Каховському водосховищі після руйнування греблі, створили методичне підґрунтя для цієї роботи (Tomchenko et al., 2023; Zheng et al., 2022; Trofymchuk et al., 2020).

Отже, наукова новизна дослідження полягає в комплексному поєднанні SAR-, оптичних, альтиметричних і наземних гідрологічних даних для моніторингу воєнно спричиненої гідрологічної катастрофи, а також в адаптації цього підходу до умов частково окупованої території та просторово фрагментованої мережі спостережень.

### Мета дослідження

Метою дослідження є виявлення та оцінювання просторового масштабу й часової динаміки затоплення, спричиненого руйнуванням Каховської ГЕС, шляхом інтеграції радарних даних SAR (Sentinel-1), оптичних знімків (Sentinel-2, Landsat-9), супутникової альтиметрії (Hydroweb) та даних наземних гідрологічних постів, а також розроблення методичного підходу до оперативного виявлення, кількісного оцінювання та просторової інтерпретації затоплення в умовах обмеженого наземного доступу під час збройного конфлікту.

### Територія дослідження

Район дослідження охоплює приблизно 1800 км<sup>2</sup> і включає нижню течію Дніпра в межах ділянки від Каховської греблі до Дніпровсько-Бузького лиману. Територія характеризується переважно рівнинним рельєфом, широкими заплавами ділянками та складною гідрографічною структурою дельтової області, що зумовлює високу чутливість до різких змін рівнів води. Нижній Дніпро поділяється на пригирлову ділянку (від греблі до вершини дельти, близько 100 км) та гирлову (від вершини дельти до Дніпровського лиману). Дніпро-Бузький лиман є найбільшою лиманною екосистемою на півдні України. Клімат регіону помірно-континентальний із посиленням

континентальності у напрямку на південь. Розташування наземних і віртуальних постів спостереження наведено на Рис. 1.



Рис. 1. Карта території дослідження з розташуванням гідропостів

## Матеріали та методи

Перевагою методу супутникової альтиметрії є незалежність вимірювань від хмарності, часу доби та наявності рослинності. Основним обмеженням методу залишається відносно довгий орбітальний цикл (10–35 діб), що не підходить для моніторингу короткотривалих подій у реальному часі, але добре узгоджується із сезонним і міжрічним аналізом (Kittel et al., 2021). Альтиметричні рівні води для р. Дніпро представлені у двох міжнародних базах даних: Hydroweb (<https://hydroweb.next.theia-land.fr/>) та ДАНІТІ (<https://dahiti.dgfi.tum.de/>). База ДАНІТІ (Рис. 2) надає вимірювання на трьох віртуальних постах у межах території дослідження, але один із них фактично дублює наземний пост (за точністю перевага надана наземним даним), а два інших повторюють дані Hydroweb. Тому у подальшому аналізі використано виключно дані Hydroweb (Рис. 3).

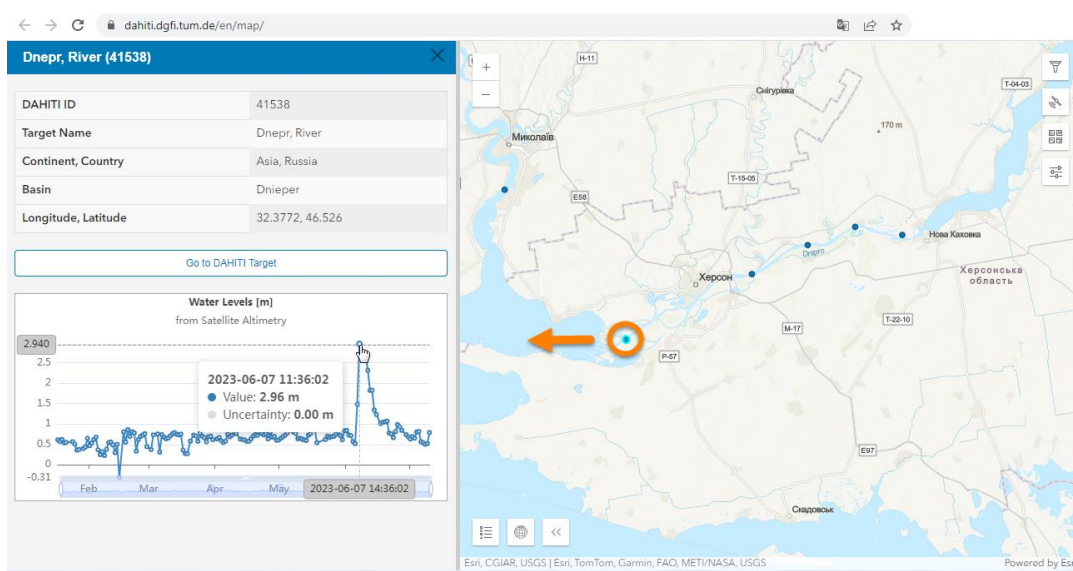


Рис. 2. Інтерфейс ресурсу ДАНІТІ <https://dahiti.dgfi.tum.de/>

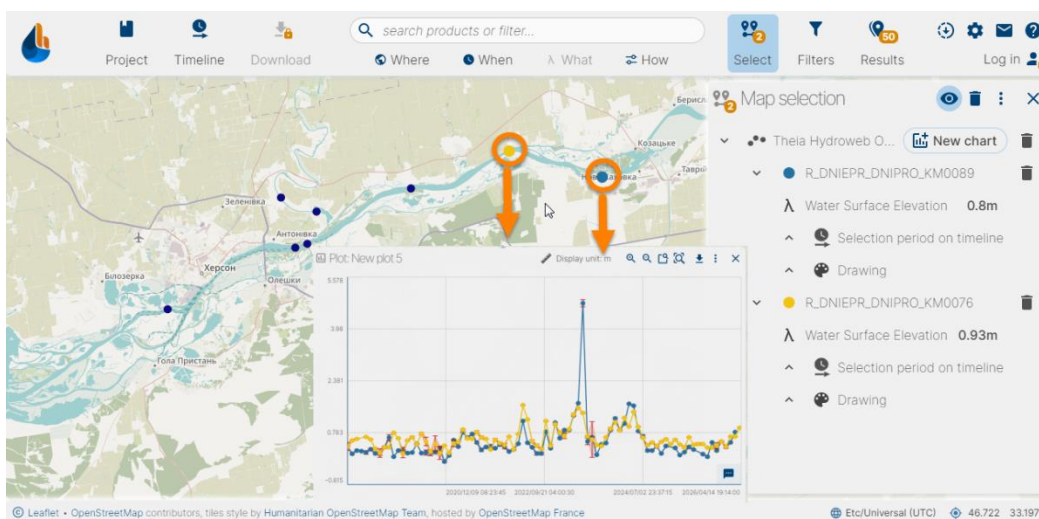


Рис. 3. Інтерфейс ресурсу Hydroweb <https://hydroweb.next.theia-land.fr/>

База даних Hydroweb надає часові ряди, розраховані Лабораторією просторових досліджень геофізики та океанографії (LEGOS) спільно з Collecte Localisation Satellites (CLS) на замовлення Національного центру космічних досліджень Франції (CNES) та Copernicus Global Land (Hydroweb, 2023). Рівні води розраховуються ретрекером Offset Centre-of-Gravity (OCOG) з прив'язкою до геоїда EGM2008 та стандартними поправками на приплив твердої Землі, приплив полюса, іоносферну затримку, вологу та суху тропосферну затримку. На якість вимірювань висотоміром впливають фактори навколишнього середовища, зокрема складна морфологія русла (наявність міжруслових піщаних перепадів) та несприятливе географічне розташування віртуального поста.

Hydroweb надає дані для п'яти віртуальних постів у межах території дослідження; два з них містять вимірювання лише після стабілізації рівнів (після серпня 2023 р.) і для аналізу події не використовувалися. Остаточо обрано три Hydroweb-пости (пости 4–6, розташовані на відстані 33, 17 та 10 км нижче греблі, відповідно; Рис. 1), які мають безперервні часові ряди для базового та післяподієвого періодів.

Наземні спостереження отримано з трьох постів Миколаївського та Херсонського обласних центрів гідрометеорології (ОЦГМ). Пост 1 – морський гідрологічний пост у гирловій частині р. Дніпро, на правому березі р. Рвач, за 2 км на схід від Дніпровського лиману та 0,5 км на південний захід від с. Кізомис, глибина 5,7 м. Пост 2 – морський гідрологічний пост на правому березі р. Дніпро, на розвилці біля витоку р. Кошова (м. Херсон). Пост 3 – гідрометеорологічний пост у середній течії р. Інгулець поблизу с. Калинівське, глибина – 1,1 м.

Спостереження за рівнем води на наземних постах у штатному режимі проводять двічі на добу – о 06:00 та 18:00 UTC – за водомірною рейкою; рівні прив'язані до Балтійської системи висот 1977 р. (нуль Кронштадтського футштока). Після руйнування греблі Каховської ГЕС, починаючи з 6 червня 2023 р., протягом одного місяця на постах виконували щогодинні спостереження, що дало змогу детально простежити початок, пік і тривалість аномального підвищення рівня води. Для аналізу використано наземні часові ряди за період 01.01.2023 – 31.08.2023: для передподієвого інтервалу 01.01.2023 – 31.05.2023 – регулярні спостереження постів, для післяподієвого інтервалу від 6 червня 2023 р. – щогодинні дані підвищеної часової роздільності з подальшим залученням штатних спостережень. Саме така комбінація спостережень забезпечила коректне визначення дати початку аномального стану та його подальшої динаміки.

Характеристику всіх шести постів (трьох наземних та трьох Hydroweb) наведено в Табл. 1.

**Таблиця 1.** Характеристика постів спостереження за рівнями води в басейні Нижнього Дніпра

№	Вид поста	Річковий басейн	Опис поста
<i>Пости наземних спостережень за рівнями води</i>			
1	Морський гідрологічний пост	р. Дніпро, Дніпровський лиман	Пост розташований у гирловій частині р. Дніпро, на правому березі р. Рвач, за 2 км на схід від Дніпровського лиману та за 0,5 км на південний захід від с. Кізомис. Глибина – 5,7 м
2	Морський гідрологічний пост	р. Дніпро, Дніпровський лиман	Пост розташований на правому березі р. Дніпро, на розвилці біля витоку р. Кошова (м. Херсон)
3	Гідрометеорологічний пост	р. Інгулець	Пост розташований біля с. Калинівське у середній течії р. Інгулець. Глибина – 1,1 м
<i>Пости спостережень за рівнями води за даними бази Hydroweb</i>			
4	R_DNIEPR_DNIPRO_KM0062	р. Дніпро	Пост розташований на відстані 33 км нижче Каховської дамби ГЕС, поблизу с. Іванівка та с. Токарівка
5	R_DNIEPR_DNIPRO_KM0076	р. Дніпро	Пост розташований на відстані 17 км нижче Каховської дамби ГЕС, неподалік с. Львове
6	R_DNIEPR_DNIPRO_KM0089	р. Дніпро	Пост розташований на відстані 10 км нижче Каховської дамби ГЕС, неподалік с. Дніпріани

Для просторового оцінювання меж затоплення використано комбінацію радарних та оптичних супутникових даних. Архів супутникових сцен було сформовано для червня 2023 р. з урахуванням часової динаміки аномального підвищення рівня води, встановленої за даними наземних постів і Hydroweb,

що забезпечило узгодження гідрологічного та дистанційного аналізу події.

Використано знімки Sentinel-1 C-SAR рівня оброблення Level-1 GRD, отримані в режимі Interferometric Wide swath (IW) з поляризацією VV+VH та просторовою роздільністю 10 м. До аналізу залучено сцени за 02.06.2023 (до повені), 09.06.2023, 13.06.2023 та 14.06.2023 (під час затоплення), а також 21.06.2023 (після основної фази повені). Попереднє оброблення зображень виконано в середовищі SNAP Toolbox (ESA) за стандартною схемою: видалення термічного шуму, радіометричне калібрування до  $\sigma^0$ , фільтрація спекл-шуму (Lee  $5 \times 5$ ), корекція рельєфу (Range-Doppler Terrain Correction) за допомогою цифрової моделі рельєфу SRTM (30 м). Для детекції водних поверхонь застосовано порогову бінаризацію зворотного розсіювання  $\sigma^{VV}$  методом Otsu (Munawar et al., 2022). У статті радарні дані використано передусім як допоміжне джерело для валідації меж затоплення та контролю часової безперервності спостережень за умов хмарності.

Використано знімки Sentinel-2 Level-2A (10 м) за 05.06.2023 (до повені), 13.06.2023 (під час затоплення, із суттєвою хмарністю) та 20.06.2023 (після повені), а також Landsat-9 Collection 2 Level-2 (30 м) за 01.06.2023 (до події), 09.06.2023 (під час пікового затоплення) і 17.06.2023 (після повені). Для розпізнавання водної поверхні обчислено нормалізований диференційний водний індекс:

$$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR),$$

де Green – спектральний канал зеленого діапазону, NIR – ближній інфрачервоний канал. Пороговим значенням для виділення водної поверхні прийнято  $NDWI > 0$ . Оптичні та радарні дані використовувалися взаємодоповнювально: Landsat-9 і Sentinel-2 забезпечували наочне картографування меж водної поверхні у ясні дні, тоді як Sentinel-1 застосовувався для контролю просторової динаміки затоплення в дати, коли оптичні сцени були частково непридатними для інтерпретації через хмарність (зокрема 13.06.2023). Просторові операції виконано у програмному середовищі QGIS.

Через несумісність вертикальних систем відліку (EGM2008 для Hydroweb та Балтійська система висот 1977 р. для наземних постів) пряме порівняння абсолютних рівнів води неможливе. Для прямого порівняння постів необхідним є також їхнє розташування у межах не більше 20 км один від одного (Kittel et al., 2021), що у досліджуваному випадку не виконується. Відповідно до методики (Sulistioadi et al., 2015 та Halicki & Niedzielski, 2022), для кожного поста розраховано аномалії рівня води  $\Delta H$  як відхилення виміряного значення від базового середнього:

$$\Delta H_i = H_i - \bar{H}_{base},$$

де  $\Delta H_i$  – аномалія рівня води в момент часу  $i$  (м);  $H_i$  – виміряне значення рівня у момент  $i$  (м);  $\bar{H}_{base}$  – середнє значення рівня за базовий (передподієвий) період (м).

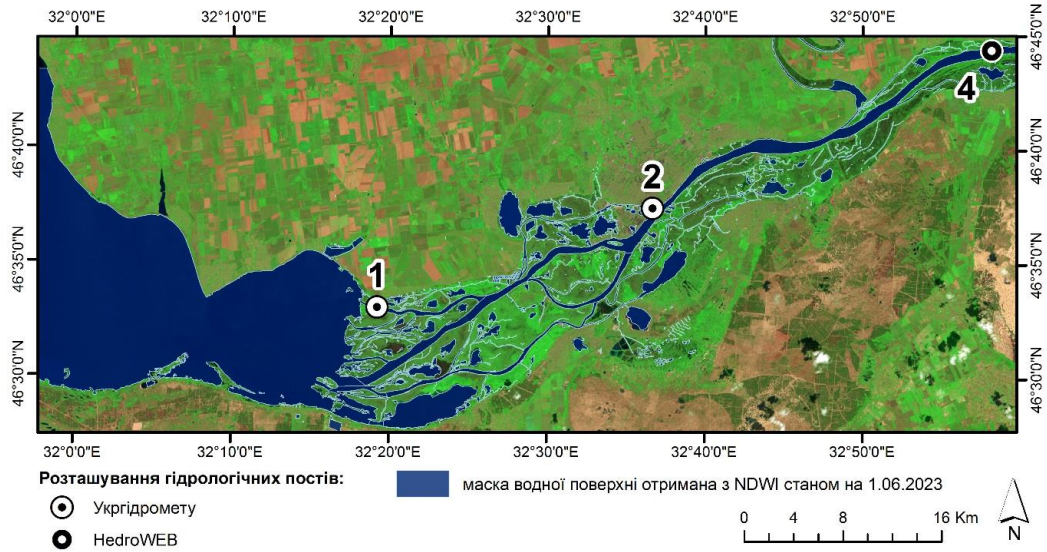
Як базовий період для всіх шести постів спостереження обрано січень–травень 2023 р. – період стабільного гідрологічного режиму до руйнування греблі, без значних паводкових подій. Для Hydroweb-постів (4–6) базове середнє розраховувалося на основі наявних альтиметричних вимірювань у цьому періоді; для наземних постів (1–3) – на основі регулярних спостережень за той самий період. Стандартне відхилення  $\sigma_{base}$  базового ряду використовувалося для визначення порога статистичної значущості: аномалію вважалося перевищення  $\Delta H > 2\sigma_{base}$ . Датою початку аномального стану вважалася перша дата стійкого перевищення цього порога.

Слід зазначити, що використання п'ятимісячного базового періоду є компромісом між статистичною надійністю оцінки  $\sigma_{base}$  та доступністю передподієвих даних для всіх типів спостережень. Коротший базовий період може не повністю охоплювати міжрічну мінливість рівнів, проте період січня–травня 2023 р. безпосередньо відповідає передподієвому стану гідросистеми і тому є методологічно коректним для завдання виявлення різкої техногенної аномалії. Виявлений часовий діапазон аномалій використовувався для відбору відповідних супутникових знімків для просторового аналізу затоплення.

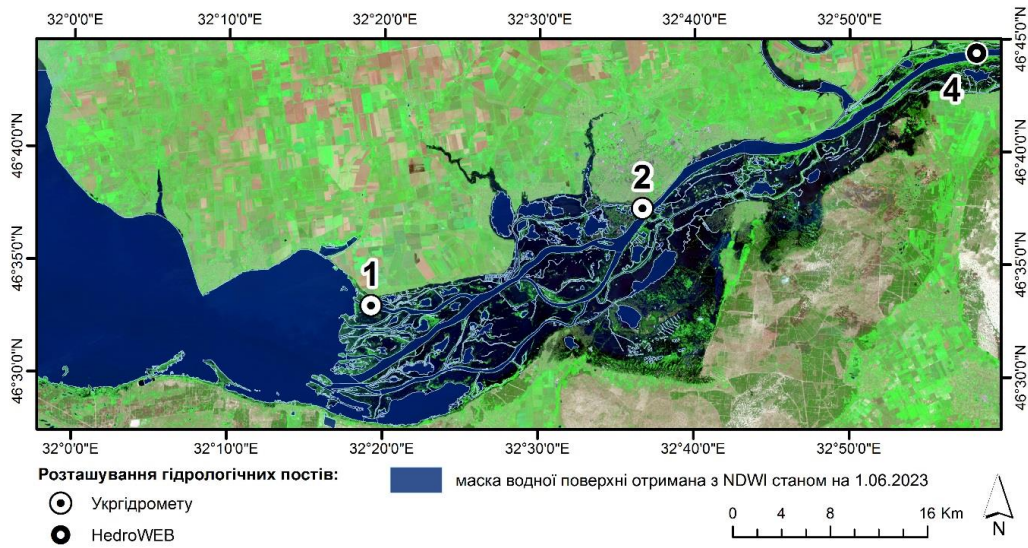
## Результати та їх аналіз

Аналіз фактичної гідрологічної ситуації виконано на основі даних трьох наземних гідрометеорологічних постів та трьох віртуальних постів Hydroweb. Часові ряди аномалій рівнів води за період січень–серпень 2023 р. наведено на Рис. 4, 5 разом зі знімками Landsat-9 для дат до (01.06.2023) та під час пікового затоплення (09.06.2023). Для наземних постів у перший місяць після події використано щогодинні спостереження, що забезпечило детальну фіксацію моменту початку аномального підвищення рівня води. Радарні сцени Sentinel-1 за 09.06.2023, 13.06.2023, 14.06.2023 та 21.06.2023 використовувалися як допоміжне джерело для контролю просторової динаміки затоплення у дні, коли оптичні дані були обмежені хмарністю або часовими прогалинами.

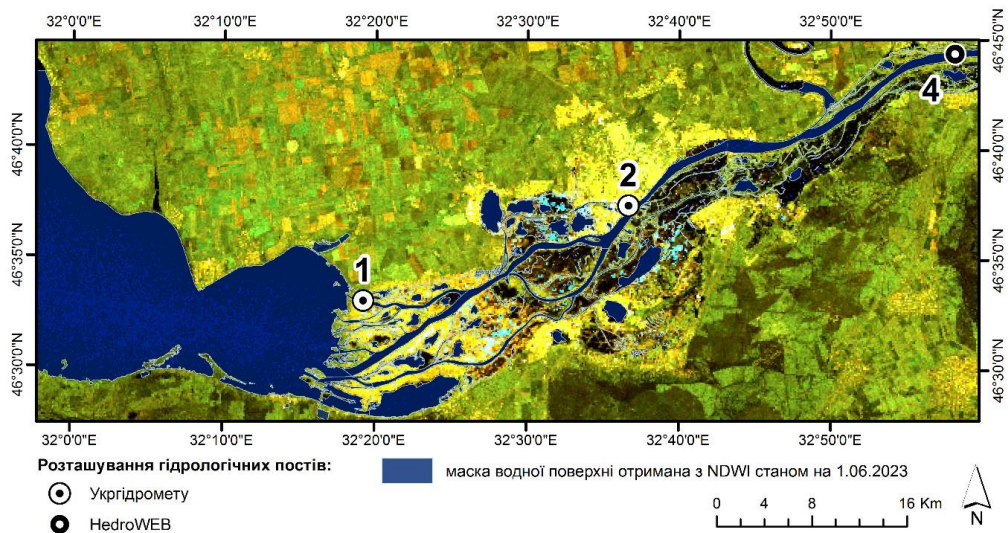
Аномальне підвищення рівня води на всіх постах зафіксовано з 6 червня 2023 р., що відповідає даті руйнування греблі. Використання щогодинних наземних спостережень упродовж першого місяця після події дало змогу простежити детальну часову динаміку паводкової хвилі. Найбільші аномалії спостерігались на постах, найближчих до місця прориву (пост 6 –  $\sim 3,72$  м; пост 5 –  $\sim 5,63$  м), з поступовим зменшенням у напрямку гирла. Тривалість аномального підвищення на нижніх постах (1, 2) перевищувала тривалість на верхніх, що відображає накопичення паводкових вод у нижній частині дельти та узгоджується з гідродинамікою рівнинних річок при прориві дамб (Gleick et al., 2023; Vyshnevskiy et al., 2023).



a)



б)



В)

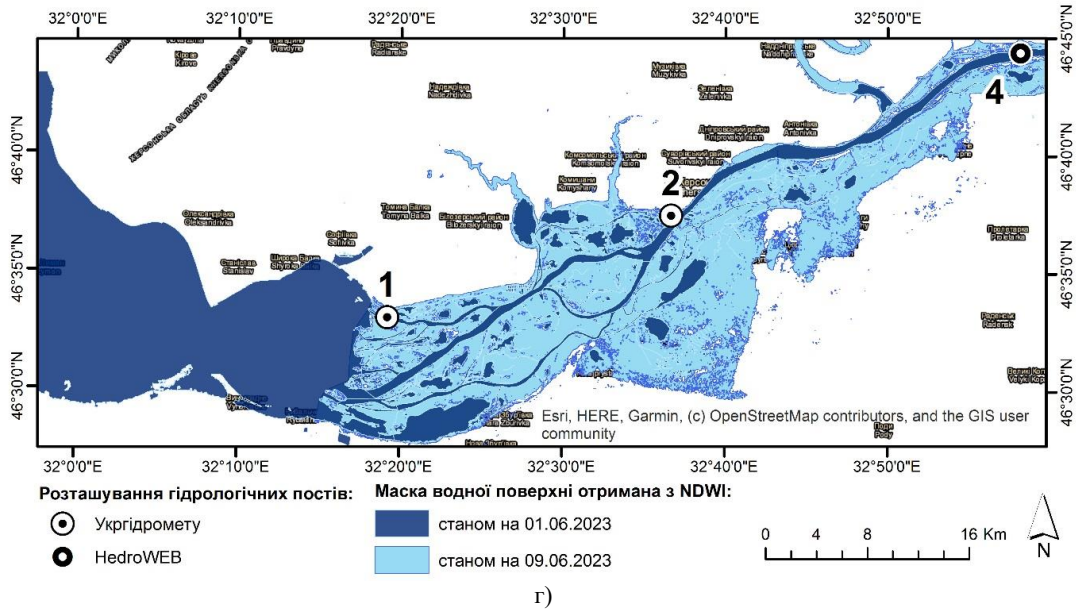
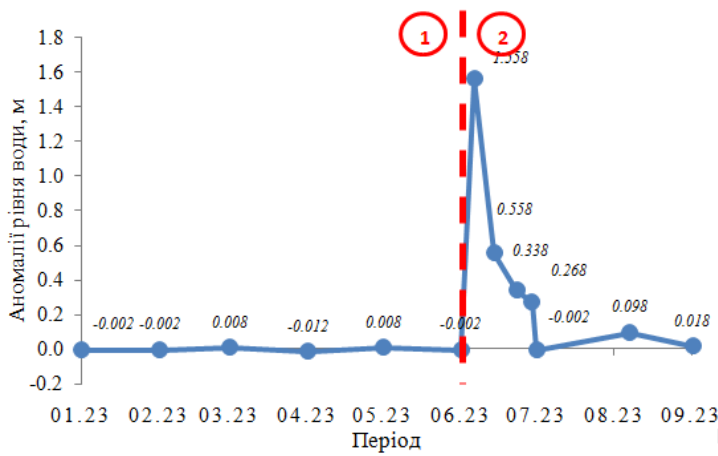
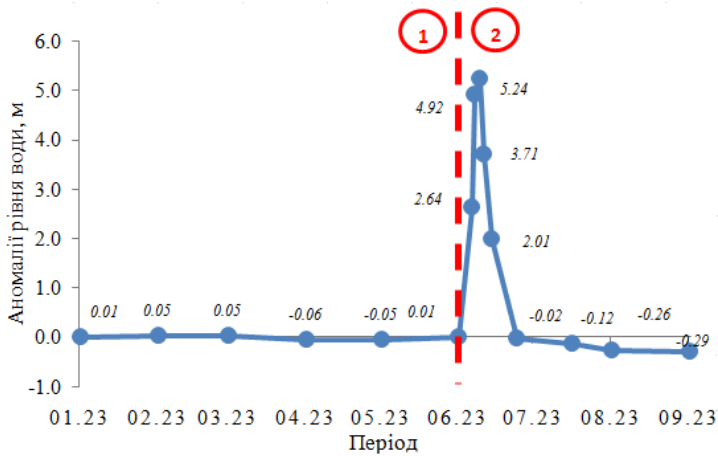
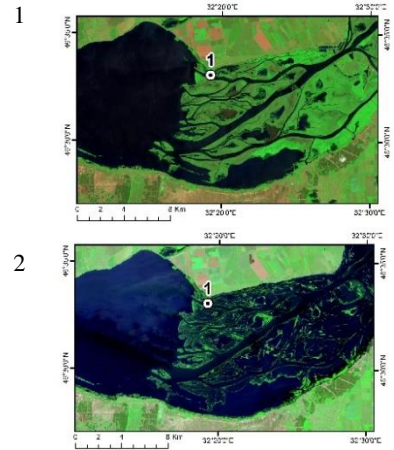


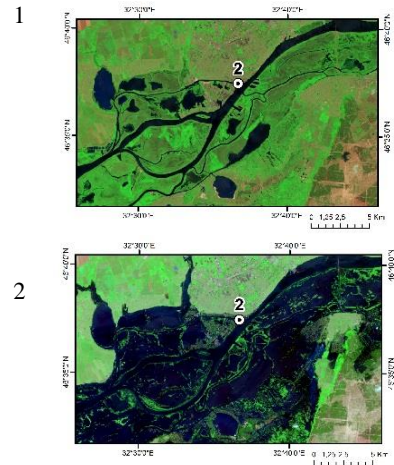
Рис. 4. Річка Дніпро нижче за течією від греблі Каховської ГЕС на супутникових знімках Landsat-9: а) 01.06.2023 (до події); б) 09.06.2023 (під час піку затоплення); та знімках Sentinel-1 (в) 13.06.2023 (після піку затоплення). Карта накладання двох масок водної поверхні, отриманих за індексом NDWI (г).

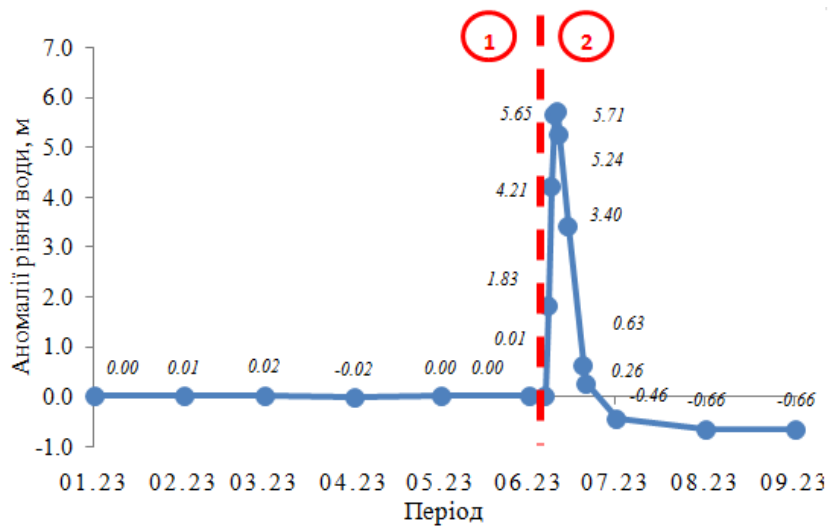


а)

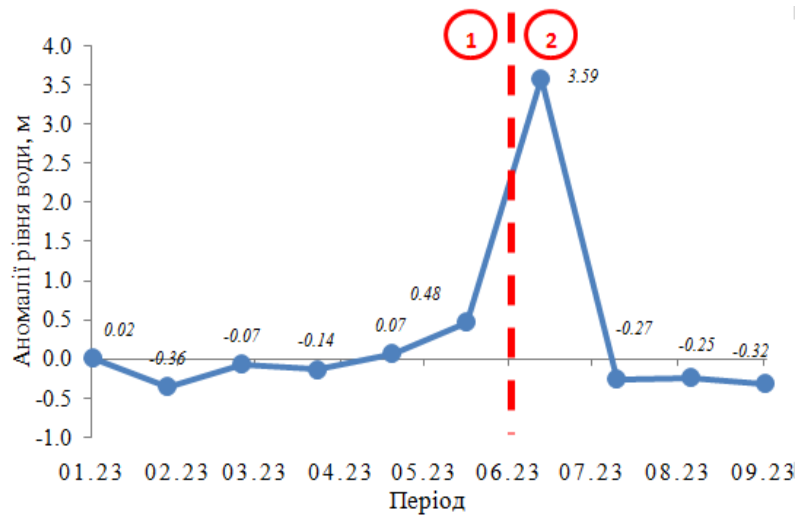


б)

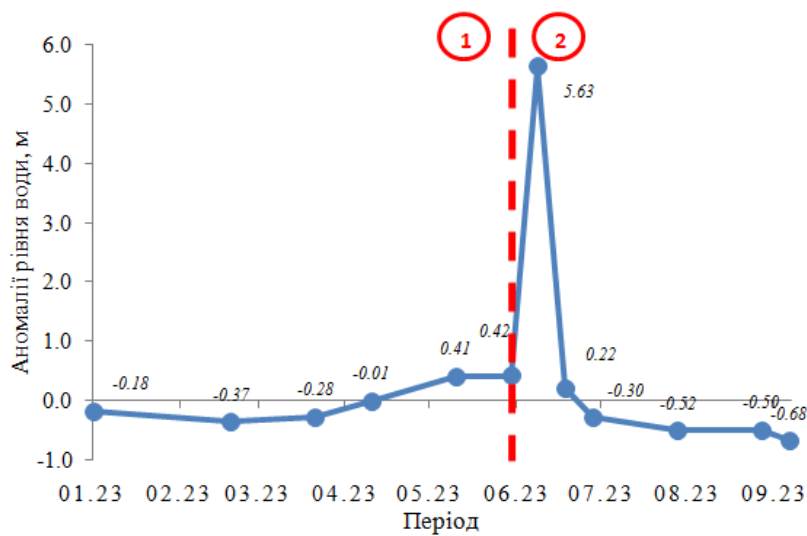




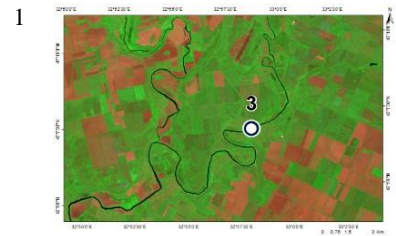
в)

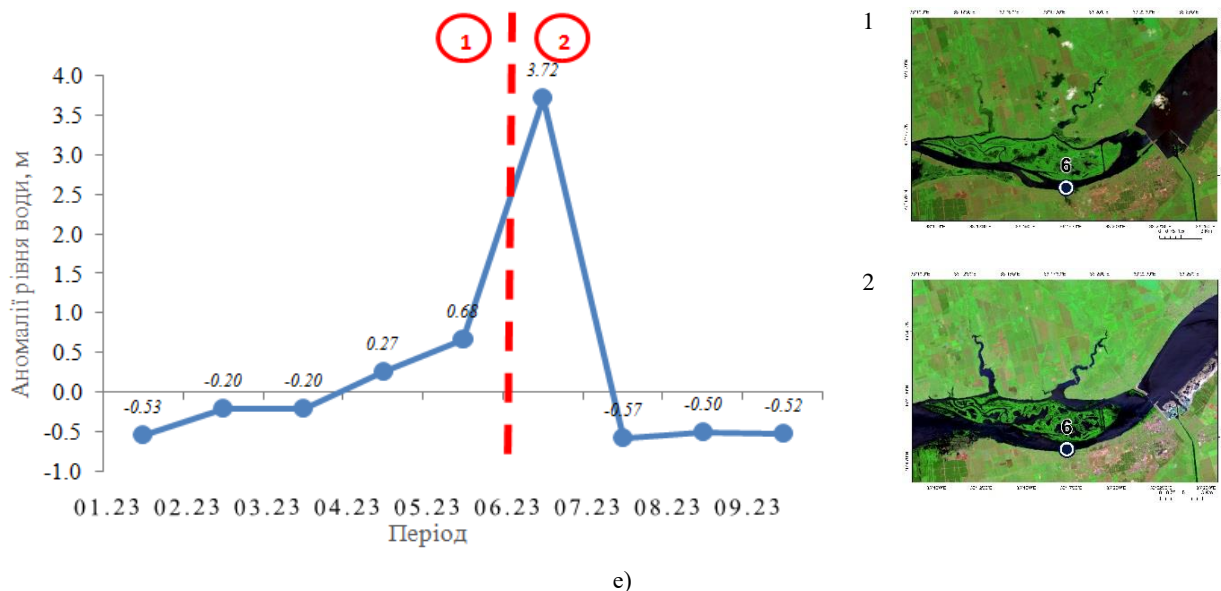


г)



д)





**Рис. 5.** Часові ряди аномалій рівня води  $\Delta H$  (м) за період 01.01.2023 – 31.08.2023 для шести постів спостереження: а) пост 1 (Кізомис), пік  $\sim 1,56$  м; б) пост 2 (Херсон), пік  $\sim 5,24$  м; в) пост 3 (Інгулець, Калинівське), пік  $\sim 5,71$  м; г) пост 4 (Hydroweb, 33 км нижче греблі), пік  $\sim 3,59$  м; д) пост 5 (Hydroweb, 17 км нижче греблі), пік  $\sim 5,63$  м; е) пост 6 (Hydroweb, 10 км нижче греблі), пік  $\sim 3,72$  м. Горизонтальна пунктирна лінія – поріг статистичної значущості  $\Delta H = 2\sigma_{\text{base}}$ . Для кожного поста також наведено знімки Landsat-9 (1) за 01.06.2023 (до події) та (2) за 09.06.2023 (під час повені)

Запропонований підхід з інтеграції SAR, оптичного ДЗЗ та альтиметрії для моніторингу техногенної повені дав змогу подолати ключові обмеження кожного окремого методу. Радарні дані Sentinel-1 використовувалися як допоміжне джерело для валідації меж затоплення та контролю часової динаміки підтоплення в умовах хмарності, тоді як основна наочна візуалізація просторових змін у статті подана оптичними знімками Landsat-9. Використання аномалій (а не абсолютних рівнів) для порівняння наземних та альтиметричних даних виявилось ефективним підходом за відсутності єдиної вертикальної системи відліку (Sulistioadi et al., 2015; Halicki & Niedzielski, 2022). Виявлена часова динаміка аномалій – від пікових значень  $\sim 3,72\text{--}5,63$  м безпосередньо нижче греблі до  $\sim 1,56$  м у гирловій частині – узгоджується з гідрологічними закономірностями, відомими для великих рівнинних річок при прориві дамб.

Слід зазначити, що рівні води на постах 1 і 2, розташованих у гирловій частині Дніпра та Дніпровському лимані, потенційно можуть зазнавати впливу штормових нагонів південно-західного напрямку, характерних для північного узбережжя Чорного моря (Woodruff et al., 2013; Wang et al., 2019). Однак, масштаб зафіксованих аномалій (3,72–5,63 м) значно перевищує типові нагінні коливання в регіоні (зазвичай, до 1–2 м), що свідчить про переважний внесок

Окремої уваги заслуговує інтерпретація даних поста 3 на р. Інгулець (с. Калинівське). Враховуючи розташування прориву греблі у виявлений сигнал. Деталізований метеорологічний аналіз для остаточного розмежування двох джерел підвищення рівня

залишається завданням подальших досліджень. поста в межах правої притоки Дніпра, виявлене підвищення рівня води у післяподієвий період може частково відображати вплив гідравлічного підпору з боку Нижнього Дніпра на пригирловій ділянці Інгульця, а також локальні гідрологічні процеси у басейні Інгульця. Точна кількісна оцінка співвідношення цих чинників потребує додаткового дослідження за гідродинамічною моделлю. У цьому контексті дані поста 3 слід розглядати як додатковий індикатор події, а не як основне джерело кількісного оцінювання.

Обмеженість отриманих результатів пов'язана з: 1) відсутністю валідаційних даних з окупованої частини досліджуваної території; 2) хмарністю 13.06.2023 на знімках Sentinel-2, що знизила надійність оптичного картування на цю дату; 3) порівняно тривалим (10–35 діб) орбітальним циклом Hydroweb, що обмежує просторово-часову деталізацію; 4) недостатньою метеорологічною інформацією – для остаточного відокремлення сигналу прориву греблі від можливих штормових нагонів у гирловій частині Дніпра.

## Висновки

У роботі показано, що запропоноване поєднання супутникової альтиметрії Hydroweb, даних наземних гідрологічних постів і супутникових знімків дистанційного зондування є ефективним підходом для аналізу наслідків руйнування греблі Каховської ГЕС в умовах обмеженого наземного доступу. На основі часових рядів шести постів, зокрема щогодинних наземних спостережень у перший місяць після події, виявлено статистично значуще аномальне підвищення

рівнів води після руйнування греблі, причому найбільші значення зафіксовано на ділянках, розташованих найближче до місця прориву.

Встановлено просторову закономірність згасання амплітуди аномалій у напрямку до гирлової частини та більшу тривалість аномально високих рівнів у нижніх ділянках системи. Це відображає особливості гідродинаміки нижньодніпровської дельти та підтверджує інформативність аномалій рівня води як індикатора затоплення в умовах несумісності абсолютних висотних систем відліку. Поєднання альтиметричних, наземних, SAR- та оптичних даних дало змогу не лише зафіксувати сам факт затоплення, а й зіставити часову динаміку підвищення рівнів води з просторовим поширенням затоплених територій.

Отримані результати підтверджують, що використання аномалій рівня води замість абсолютних позначок є доцільним для інтеграції супутникових і наземних спостережень. Розроблений підхід можна використати для оперативного моніторингу техногенних гідрологічних катастроф, а також як основу для подальшого оцінювання їхніх екологічних наслідків у Нижньодніпровському регіоні. Практичне значення роботи полягає в можливості застосування цього підходу на важкодоступних, прифронтових або тимчасово окупованих територіях, де традиційна польова верифікація обмежена або неможлива.

**Внесок авторів:** концептуалізація – Томченко О. В.; методологія – Шевякіна Н. А.; систематизація та аналіз даних – Магась Н. І., Загородня С. А., Радчук І. В.; підготовка візуальних матеріалів – Томченко О. В.; підготовка первинного тексту рукопису – Шевякіна Н. А.; рецензування та редагування – Загородня С. А., Магась Н. І.; візуалізація – Томченко О. В. Усі автори прочитали та погодились з остаточною версією рукопису.

**Фінансування:** Дослідження було проведено в рамках науково-дослідних проєктів: «Розробка програмного комплексу для супутникового моніторингу морських екосистем» (2026–2027), РК № 0126U001826 та «Розробка та вдосконалення методів і технологій геопросторового моделювання для вирішення тематичних задач дистанційного зондування» (2023–2027), РК № 0123U100684.

**Розкриття інформації про ШІ:** під час підготовки цього рукопису генеративні інструменти штучного інтелекту не використовувались.

**Доступність даних:** Дані можуть бути надані автором за обґрунтованим запитом.

**Подяки:** Автори вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

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

**Author Contributions:** Conceptualization – O. V. Tomchenko; methodology – N. A. Sheviakina; data systematization and analysis – N. I. Magas, S. A. Zahorodnia, I. V. Radchuk; preparation of visual materials – O. V. Tomchenko; drafting of the original manuscript – N. A. Sheviakina; review and editing – S. A. Zahorodnia, N. I. Magas; visualization – O. V. Tomchenko. All authors have read and agreed to the final version of the manuscript.

**Funding:** The study was carried out as part of the scientific research projects: "Development of a software complex to

provide satellite monitoring of marine ecosystems" (2026–2027), RC № 0126U001826, and "Development and improvement of methods and technologies of geospatial modeling to solve thematic problems of remote sensing" (2023–2027), RC № 0123U100684.

**Disclosure of AI use:** We confirm that no generative artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

**Data Availability Statement:** The data can be provided by the authors upon reasonable request.

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to this work.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Lітература / References

- Al-doski, J., Mansor, S. B., Shafri, H. Z. M. (2013). War impacts studies using remote sensing. *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics*, 1(2), 11–15. <https://doi.org/10.9790/0990-0121115>.
- Gleick, P., Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S. (2023). Rivers and water systems as weapons and casualties of the Russia-Ukraine war. *Earth's Future*, 11(10), e2023EF003910. <https://doi.org/10.1029/2023EF003910>.
- Halicki, M., Niedzielski, T. (2022). The accuracy of the Sentinel-3A altimetry over Polish rivers. *Journal of Hydrology*, 606, 127355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127355>.
- Hapich, H., Novitskiy, R., Onoprienko, D., Dent, D., Roubik, H. (2024). Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 21, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>.
- Hartmane, I., Biyashev, B., Getman, A. P., Yaroshenko, O. M., Anisimova, H. V. (2024). Impacts of war on Ukrainian nature. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 455–462. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314856>.
- Hydroweb. (2023). *Dnieper Basin water level data*. Theia Land Data Centre. <https://hydroweb.theia-land.fr/?lang=en&basin=DNIEPR>.
- Kaplan, G., Rashid, T., Gasparovic, M., Pietrelli, A., Ferrara, V. (2022). Monitoring war-generated environmental security using remote sensing: A review. *Land Degradation & Development*, 33(10), 1513–1526. <https://doi.org/10.1002/ldr.4249>.
- Kittel, C. M. M., Jiang, L., Tottrup, C., Bauer-Gottwein, P. (2021). Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring – a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 333–357. <https://doi.org/10.5194/hess-25-333-2021>.
- Literathy, P. (1993). Considerations for the assessment of environmental consequences of the 1991 Gulf War. *Marine Pollution Bulletin*, 27, 349–356. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(93\)90042-I](https://doi.org/10.1016/0025-326X(93)90042-I).
- Magas, N., Khorenzhenko, H., Zamuruieva, K., Beshevets, Yu., Ryndiuk, S., Barkar, V., Zamrii, M. & Bondar, M. (2023). Analiz hidrolohichnoi sytuatsii v rehioni Dnipro-Buzkoholymanu pislia zruinuvannia Kakhovskoi HES [Analysis of the hydrological situation in the Dnipro-Bug estuary region following the destruction of the Kakhovka HPP dam]. *Ecological Sciences*, 4(49), 15–25. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.2>.
- Munawar, H. S., Hammad, A. W. A., Waller, S. T. (2022). Remote sensing methods for flood prediction: A review. *Sensors*, 22(3), 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960>.

- Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S. ... Gleick, P. (2023). Impact of the Russia-Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>.
- Stevens, K., Campbell, L., Urquhart, G., Kramer, D. & Qi, J. (2011). Examining complexities of forest cover change during armed conflict on Nicaragua's Atlantic Coast. *Biodiversity and Conservation*, 20(12), 2597–2613. <https://doi.org/10.1007/s10531-011-0093-1>.
- Strocal, V., Shevchuk, S. (2023). Flooding of Ukrainian territories: Risks for regional water and food security. *Ecological Sciences*, 4(49), 159–170. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.21>.
- Sulistioadi, Y. B., Tseng, K. H., Shum, C. K., Hidayat, H., Sumaryono, M., Suhardiman, A., Setiawan, F. & Sunarso, S. (2015). Satellite radar altimetry for monitoring small rivers and lakes in Indonesia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 341–359. <https://doi.org/10.5194/hess-19-341-2015>.
- Tomchenko, O., Magas, N., Yakovenko, M., Stakhiv, I. (2023). Porivnialnyi analiz zamleennia Kakhovskoi vodoimy za danymy DZZ [Comparative analysis of the shallowing of the Kakhovka reservoir based on the data of remote sensing]. *17th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Kyiv, 7–10 November 2023.
- Trofymchuk, O., Zahorodnia, S., Sheviakina, N., Radchuk, I. & Tomchenko, O. (2020). Remote sensing monitoring of biotopes distribution within nature reserve area. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*, 76(3), 109–120. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.76.3.25204>.
- UNOSAT. (2023, June 12). *Kakhovka dam flood impact – Ukraine*. United Nations Satellite Centre. <https://unosat.org/products/3616>.
- Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y. & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48(5), 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>.
- Wang, L., Zhang, M., Wen, J., Chong, Z., Ye, Q. & Ke, Q. (2019). Simulation of extreme compound coastal flooding in Shanghai. *Advances in Water Science*, 30(4), 546–555. <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2019.04.010>.
- Woodruff, J. D., Irish, J. L., Camargo, S. J. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 504, 44–51. <https://doi.org/10.1038/nature12855>.
- Xu, H., Barbot, S., Wang, T. (2024). Remote sensing through the fog of war: Infrastructure damage and environmental change during the Russian-Ukrainian conflict revealed by open-access data. *Natural Hazards Research*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.006>.
- Yue, H., Liu, Y., Wei, J. (2021). Dynamic change and spatial analysis of great lakes in China based on Hydroweb and Landsat data. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(3), 149. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06449-w>.
- Zheng, Y., Sheviakina, N. A., Zagorodnia, S. A., Tomchenko, O. V., Radchuk, I. V. (2022). Remote sensing monitoring of anthropogenic changes in the Desenka river channel (Kyiv, Ukraine). *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 9(1), 8–15. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.208>.

#### CAPABILITIES OF SATELLITE ALTIMETRY MEASUREMENTS FOR ASSESSING THE CONSEQUENCES OF THE KAKHOVKA HYDROELECTRIC POWER PLANT DAM DESTRUCTION

Tomchenko O. V.<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099>

Magas N. I.<sup>2</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465>

Sheviakina N. A.<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580>

Zahorodnia S. A.<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211>

Radchuk I.V.<sup>3</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-4999-1258>

<sup>1</sup>State Institution 'Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth' of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

<sup>3</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The destruction of the Kakhovka HPP dam on 6 June 2023 caused one of the largest man-made hydrological disasters in Europe since the 1986 Chernobyl accident: according to UNOSAT, approximately 620 km<sup>2</sup> of the Lower Dnieper delta was inundated between 6 and 9 June 2023. Limited ground access to frontline and occupied territories makes Earth remote sensing methods practically the only instrument for objective monitoring of such events. This study presents a methodological framework for detecting and assessing the temporal dynamics of inundation through the integration of Hydroweb satellite altimetry data (three virtual stations located 10–33 km downstream of the dam), ground-based hydrological observations (three gauges of the Mykolaiv and Kherson Regional Hydrometeorological Centres), and radar (Sentinel-1) and optical (Sentinel-2, Landsat-9) satellite imagery. For the ground gauges, regular twice-daily observations and hourly measurements collected during the month after 6 June 2023 were used, enabling a detailed reconstruction of the onset, peak, and duration of the anomalous water-level rise. To overcome the incompatibility of vertical reference systems (EGM2008 and the Baltic 1977 height system), water-level anomalies were calculated as  $\Delta H = H_i - \bar{H}_i$ ; the baseline period selected was January–May 2023, with twice the standard deviation of the baseline series used as the statistical significance threshold. Statistically significant anomalous water-level rises were detected at all six stations from 6 June 2023. The largest anomalies were recorded at Hydroweb station 6 (~10.5 m, 10 km downstream of the dam), station 5 (~6.8 m, 17 km), and station 4 (~4.1 m, 33 km), with gradual attenuation toward the estuary. The duration of the anomalous state at downstream stations exceeded that at upstream stations, reflecting the hydrodynamics of lowland rivers after dam breaches. SAR and optical analysis confirmed the spatial extent of flooding of riparian and floodplain areas. The proposed methodology is suitable for rapid monitoring of man-made disasters in inaccessible or occupied territories and provides a basis for further environmental damage assessment.

**Keywords:** satellite altimetry; Hydroweb; Sentinel-1 SAR; water level anomaly; man-made disaster; Lower Dnieper basin.

Рукопис статті отримано 28.04.2026

Надходження остаточної версії: 15.05.2026

Публікація статті: 29.05.2026

Received 28.04.2026

Revised 15.05.2026

Accepted 29.05.2026