

ТРАНСФОРМАЦІЯ АГРОЛАНДШАФТІВ ПІВДНЯ УКРАЇНИ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Т.Л. Кучма, І.К. Швиденко, Л.А. Райчук, А.М. Лішук

*Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: tanyakuchma@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9328-5919
e-mail: favor09@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6135-8968
e-mail: edelvice@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2552-4578
e-mail: lishchuk.alla.n@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8339-9365*

Підрич Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. спричинив одну з найбільших екологічних катастроф в історії України, призвівши до втрати 18 км³ прісної води та руйнування зрошувальних систем на площі понад 584 тис. га. Метою дослідження є оцінка просторово-часових змін стану агроресурсів Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської обл. унаслідок осушення Каховського водосховища (далі — вдсх) за період 2020–2025 рр. з використанням даних дистанційного зондування Землі. Для комплексної оцінки трансформації рослинного покриву та водного режиму агроландшафтів застосовано чотири спектральні індекси: NDVI, SAVI, NDWI та NDMI. Аналіз здійснювався в середовищах Google Earth Engine, QGIS, Copernicus Open Access Hub і Sentinel Hub EO Browser. Було досліджено сільськогосподарські угіддя у межах 50 км від колишнього водосховища порівняно з більш віддаленими територіями. Результати підтвердили різке зниження вегетаційної активності після червня 2023 р., що було статистично верифіковано t-тестами та тестом Манна–Вітні. Найбільші зміни зафіксовано у Херсонській обл.: NDVI знизився на 55%, SAVI — на 57, NDWI — на 88, NDMI — на 44%. У Запорізькій обл. зниження становило 25–38%, у Дніпропетровській — 26–30%. Аналіз індексів виявив значне зростання площ екстремальної посухи, особливо в Херсонській обл. Використання супутникової інформації є ефективним інструментом для вивчення трансформації рослинного покриву стану водного режиму за наслідками руйнації Каховського вдсх та кліматичних змін. Отримані результати є актуальними під час розробки загальнодержавних і регіональних програм відновлення зрошення та заходів з адаптації сільськогосподарського виробництва до змін клімату на принципах скорочення емісії парникових газів у процесі аграрного виробництва, досягнення балансу між деградацією й відновленням ґрунтів та формування біоенергетичних низьковуглецевих агроєкосистем, а також створюють наукове підґрунтя для оцінки втрат і відновлення екосистемних послуг агроландшафтів у посткатастрофічний період.

Ключові слова: ДЗЗ, спектральні індекси, NDVI, SAVI, NDMI, NDWI, рослинний покрив, інвазійні види, посуха, кліматичні зміни, деградація.

ВСТУП

Підрич Каховської гідроелектростанції (ГЕС) 6 червня 2023 р. став однією з найбільших екологічних катастроф в історії незалежної України. Ця подія мала багатомірні наслідки — гідрологічні, екологічні, соціально-економічні, аграрні та гуманітарні [1]. Руйнування греблі призвело до втрати близько 18 км³ прісної води, що дорівнює річному водоспоживанню всієї України [2], а Каховське вдсх фактично

перестало існувати як гідротехнічний об'єкт.

Для південних регіонів України, зокрема Херсонської, Запорізької та Дніпропетровської обл., Каховське вдсх відіграло ключову роль у забезпеченні водними ресурсами. Його функціонування було критично важливим для стабільного вододопостачання аграрного сектору через розгалужену мережу зрошувальних систем, підтримки промислового виробництва, забезпечення потреб населених пунктів, а також збереження екосистем, включно

з дельтою Дніпра та заплавленими територіями. Загальна площа зрошення Херсонської, Запорізької та Дніпропетровської обл. сягала 584 тис. га земель, а проєктна понад 900 тис. га [3]. Ці площі формували істотну частку регіональної продукції зернових, технічних та овочевих культур, продуктивне культивування яких за агрокліматичних умов степової зони є неможливим без стабільного зволоження. Тому, руйнування греблі Каховської ГЕС спричинило системну дестабілізацію продовольчої безпеки держави та регіональної аграрної економіки [2; 4; 5].

Комплексна оцінка наслідків цієї екологічної кризи охоплює кілька ключових напрямів: формування нових агрокліматичних умов у степовій зоні, підвищення ризиків деградації ґрунтів та опустелювання, загрозу соціально-економічної стабільності регіону, потребу у створенні нових моделей адаптації сільського господарства [6–9].

У цих умовах супутникові технології стають унікальним інструментом моніторингу та прогнозування [10; 11]. На відміну від традиційних статистичних методів, вони допомагають отримати оперативні та просторово детальні дані про стан земельних ресурсів, що є критичним для ухвалення управлінських рішень [12].

Метою досліджень є оцінка просторових і динамічних змін у стані агресурсів південного регіону України, спричинених підривом Каховської гідроелектростанції, з використанням супутникових даних.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Каховська ГЕС, введена в експлуатацію у 1956 р., була частиною каскаду дніпровських гідроелектростанцій. Її гребля формувала Каховське водосховище завдовжки до 240 км і завширшки до 23 км, з об'ємом понад 18 км³. Водосховище виконувало багатфункціональні завдання: виробництво електроенергії, забезпечення судноплавства, водопостачання промислових центрів (зокрема Кривого Рогу та Нікополя), а також живлення Північно-Кримського

та Каховського каналів, які були основою зрошувального землеробства [13].

Після вибуху, що зруйнував гідротехнічну споруду, відбувся неконтрольований скид води. Екологічні наслідки руйнування Каховської ГЕС стали предметом інтенсивних досліджень із 2023 р. Перші оцінки екологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС представлені у звітах міжнародних організацій. UNDP Ukraine [14] провела оперативну оцінку гуманітарних та екологічних наслідків катастрофи. ОСНА Ukraine [15] оцінила масштаби гуманітарної кризи у зоні затоплення та втрати доступу до води. З отриманих висновків можна стверджувати, що протягом перших десяти днів площа водного дзеркала зменшилася на 40%, а до кінця червня 2023 р. залишилося лише 12% початкового обсягу. До 2024 р. водосховище практично повністю висохло, залишивши лише русло р. Дніпро та окремі ізольовані водойми. Заданими Міністерства аграрної політики України, після підриву греблі без водопостачання залишилися 94% зрошувальних систем у Херсонській обл., 74% у Запорізькій та 30% у Дніпропетровській [16; 17]. Це означає, що понад 580 тис. га сільськогосподарських земель були фактично виведені з інтенсивного обробітку. Орієнтовні втрати врожайності зернових та олійних культур становлять близько 4 млн т на рік, що еквівалентно приблизно 1,5 млрд дол. США [6]. Так у роботах вітчизняних і зарубіжних науковців та практиків, зокрема В. Вишневським та ін. [18] окреслено наслідки руйнування Каховської ГЕС, які вплинули на трансформацію гідрологічного режиму нижньої течії р. Дніпра, що призвело до деградації зрошувальних систем, активізації ерозійних процесів, вторинного забруднення ґрунтів і вод, істотної втрати екосистемних послуг агроландшафтів. Поняття втрати екосистемних послуг у цьому контексті відображає зниження функціональної спроможності агроландшафтів забезпечувати регулювання гідрологічного режиму, підтримання ґрунтової родючості, стабілізацію мікроклімату та продукційні функції, що зумовлено трансформацією

водного балансу після руйнування Каховського вдсх.

Традиційні наземні методи не повною мірою здатні забезпечити визначення стану агроландшафтів після знищення Каховської ГЕС, які істотно обмежені в просторовому охопленні, періодичності спостережень та можливості функціонування в районах екологічної небезпеки й обмеженої доступності. У таких умовах технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стають незамінним інструментом моніторингу, забезпечуючи систематичне, об'єктивне та одночасне відстеження основних показників стану агроecosystem: динаміки вологості ґрунту, евапотранспірації, спектральних індексів рослинного покриву (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI), а також просторово-часових закономірностей деградаційних процесів на регіональному й локальному рівнях. Дослідженнями акад. О.Г. Тараріко зі співавт. [19] доведено, що використання супутникових інформаційних ресурсів і методів дистанційного зондування створює сучасний потенціал для моніторингу та оцінки екологічного стану агросфери України, дозволяючи оперативно виявляти зміни у земельних угіддях, зрошуваних площах та потенційно ризикованих ділянках для ефективного управління агросектором.

У своїх працях науковці М. Pchuk et al. [20] дослідили трансформацію рослинного покриву та водного балансу на території колишнього Каховського вдсх після руйнування ГЕС за допомогою супутникового моніторингу (NDVI і NDWI) у період 2022–2025 рр. Результати показали, що після руйнування Каховської ГЕС площа поверхневих вод зменшилася від більше 18 000 га до приблизно 3 000 га, площа оголеної ґрунтової поверхні збільшилася понад 50 000 га, а NDVI зріс від $-0,0156$ до $0,3421$, тоді як NDWI знизився від $0,0481$ до $-0,3535$, що свідчить про активне відновлення рослинності на оголеному дні водосховища та значну втрату води.

На відміну від більшості попередніх досліджень, які зосереджувалися переважно на описі гідрологічних, екологічних чи гу-

манітарних наслідків руйнування Каховської ГЕС, загальних моделях деградації земель або обмежених оцінках змін лише на дні колишнього водосховища за 1–2 індексами (зокрема NDVI та NDWI), дане дослідження вперше здійснює комплексну багаторічну мультиіндексну (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) оцінку просторово-диференційованої деградації саме агроландшафтів та зрошуваних агроecosystem у трьох областях з порівнянням ближніх (<50 км) і віддалених зон, що допомагає диференціювати безпосередній вплив зміни водного режиму і регіональних кліматичних тенденцій та сформувати агроecological підґрунтя для впровадження природоадаптованих технологій.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для здійснення дослідження та аналізу стану рослинності та деградаційних процесів застосовано комплексний підхід, що поєднує використання супутникових, кліматичних і ґрунтових даних у середовищах Google Earth Engine [21], QGIS [22], Copernicus Open Access Hub (Copernicus Data Space Ecosystem) [23] і Sentinel Hub EO Browser [24].

Для оцінки змін у рослинному покриві внаслідок трансформації гідрологічних умов у період 2020–2025 рр. було застосовано чотири спектральні індекси: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) та Normalized Multi-band Drought Index (NMDI) [25–28]. Кожен із них дав можливість охопити різні аспекти стану рослинності – від біомаси до водозабезпечення. Дослідження охопило три області – Дніпропетровську, Запорізьку та Херсонську, а також контроль – територію Біосферного заповідника «Асканія-Нова» імені Ф.Е. Фальц-Фейна (БЗ «Асканія-Нова»). Здійснено порівняння сільськогосподарських угідь, розташованих у межах 50 км від колишнього Каховського вдсх, із тими, що знаходяться на більшій відстані. Визначення деградаційних процесів та оцінюван-

ня екологічних ризиків для агроєкосистем регіону проводили за Vegetation Health Index (VHI) [29].

Гіпотеза дослідження полягала в тому, що ближні до водосховища території були більш залежні від зрошення і, відповідно, сильніше постраждали після його обміління.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Базовим індикатором для оцінки біопродуктивності та фотосинтетичної активності рослинності у дослідженні обрано NDVI — найпоширеніший спектральний показник у практиці супутникового моніторингу. У контексті аналізу впливу осушення Каховського вдсх на агроєкосистеми NDVI постає ключовим індикатором, що дає змогу простежити часову динаміку змін біомаси сільськогосподарських угідь.

Аналіз динаміки NDVI за період 2020–2025 рр. виявив чітку тенденцію до зниження індексу після червня 2023 р. — моменту руйнування дамби Каховської ГЕС (рис. 1, а).

Найбільш виражені негативні зміни зафіксовано у Херсонській обл., де середні значення NDVI зменшилися на 20–30% ($p < 0,05$), що свідчить про істотне скорочення біомаси внаслідок втрати джерела зрошення. У Запорізькій обл. зниження становило 15–20% зі статистичною значущістю на рівні $p \approx 0,05–0,1$. У Дніпропетровській обл. зміни були менш вираженими — до 10% і не мали достовірної статистичної різниці ($p > 0,1$), що вказує на відносно стабільність агроландшафтів.

Контрольна територія — БЗ «Асканія-Нова» — продемонструвала зниження NDVI на 10–15%, що, ймовірно, пов'язано із регіональною посухою, а не з припиненням зрошення, оскільки природна степова рослинність не залежала від штучного водопостачання.

З метою мінімізації впливу оптичних властивостей ґрунту на результати аналізу рослинного покриву застосовано індекс SAVI, який є модифікацією NDVI та допомагає точніше оцінити стан рослинності на

орних землях. Часова динаміка SAVI за період 2020–2025 рр. також характеризується чітким зниженням після червня 2023 р., що корелює із втратою джерела зрошення (рис. 1, б).

Найбільш виражене зниження зафіксовано у Херсонській обл., де середні значення SAVI зменшилися на 25% ($p < 0,05$), що свідчить про системне скорочення рослинного покриву на орних землях. У Запорізькій обл. негативна динаміка мала меншу амплітуду, тоді як у Дніпропетровській обл. індекс залишався відносно стабільним. У БЗ «Асканія-Нова» встановлено лише тенденцію до зниження SAVI ($p \approx 0,08$), що, ймовірно, пов'язано із регіональною посухою.

Для оцінки водного стану рослинного покриву використано індекс NDWI, який є особливо чутливим до змін у водонасиченості листків. У межах дослідження NDWI виявився найчутливішим індикатором до гідрологічних змін, спричинених осушенням Каховського вдсх (рис. 1, в). У Херсонській обл. середні значення NDWI після червня 2023 р. зменшилися більш ніж удвічі ($p < 0,01$), що вказує на катастрофічне скорочення вологості рослинного покриву та критичний рівень водного дефіциту. Щодо Запорізької обл. — зниження NDWI становило 15–20% ($p \approx 0,05$), тоді як у Дніпропетровській обл. індекс залишився стабільним. На території БЗ «Асканія Нова» спостерігалася помірне зменшення NDWI ($p \approx 0,08$), що, вірогідно, обумовлено регіональними кліматичними умовами, а не втратою зрошення.

Для оцінки рівня вологонасиченості ґрунтів та інтенсивності посушливих умов застосовано індекс NMDI, який є більш чутливим до змін вологості ґрунту та придатним для моніторингу тривалих процесів аридизації. Часовий аналіз NMDI підтвердив тенденцію до зменшення вологості ґрунтів після червня 2023 р. (рис. 1, г). У Херсонській обл. зафіксовано істотне падіння індексу ($p < 0,05$), що свідчить про формування хронічного водного дефіциту та деградацію ґрунтів. У Запорізькій обл. спостерігалася аналогічна, хоча менш ін-

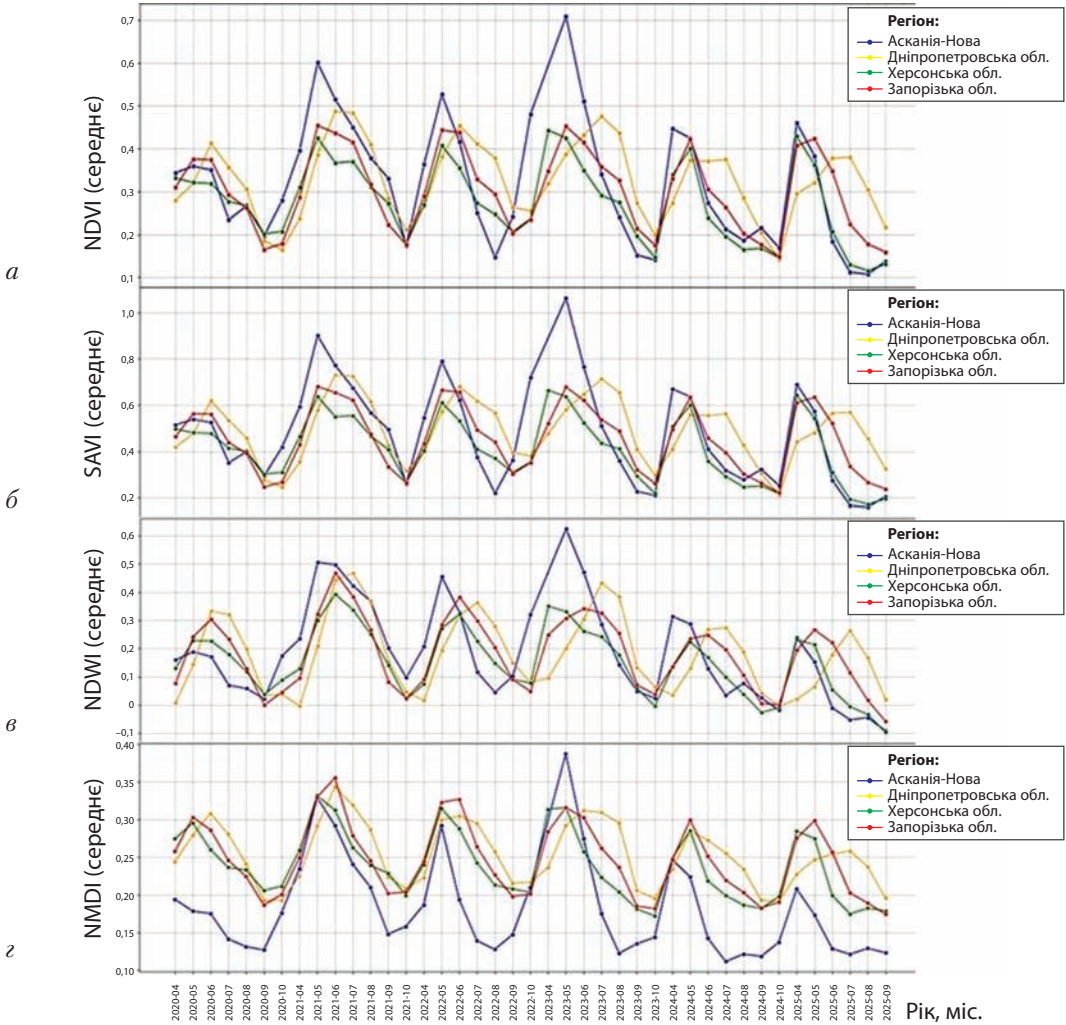


Рис. 1. Динаміка індексів NDVI (а), SAVI (б), NDWI (в) та NMDI (г) за період 2020–2025 рр.

Примітка: побудовано авторами.

тенсивна динаміка ($p \approx 0,05$). У Дніпропетровській обл. зміни не були статистично значущими, що вказує на збереження відносно стабільного водного режиму. У БЗ «Асканія-Нова» виявлено слабкий тренд до висихання ґрунтового покриву ($p \approx 0,1$), пов'язаний із регіональними кліматичними коливаннями.

Тому, аналіз часової динаміки спектральних індексів (див. рис. 1) підтвердив, що осушення Каховського вдсх призвело до

системного зниження біопродуктивності, вологості рослинного покриву та ґрунтів, найбільш вираженого у південних аграрних регіонах, передусім у Херсонській обл.

Для поглибленої оцінки просторової диференціації впливу втрати водопостачання проведено порівняльний аналіз спектральних індексів на сільськогосподарських угіддях у межах 50-км зони від території колишнього Каховського вдсх та за її межами.

Просторовий аналіз NDVI показав, що до листопада 2024 р. динаміка індексу залишалася подібною в обох зонах, однак у літній період 2025 р. значення NDVI на полях, розташованих ближче до колишнього водосховища, були істотно нижчими, що свідчить про посилення водного стресу в умовах відсутності зрошення.

Отже, NDVI став ефективним інструментом для виявлення деградаційних процесів у рослинному покриві, спричинених гідрологічними змінами. Його чутливість до змін у біомасі дає можливість не лише фіксувати факт зниження продуктивності, але й простежити просторову диференціацію впливу, що є критично важливим для планування адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Аналіз SAVI підтвердив більш інтенсивну деградацію рослинного покриву в межах ближньої зони. У Херсонській обл. SAVI у межах 50 км знизився на 60–70%, тоді як у віддаленій зоні — на 50–55%. У Запорізькій обл. зменшення становило 45–50% у ближній зоні та 25–30% у віддаленій. У Дніпропетровській обл. зміни були менш вираженими — 35–40% у ближній зоні та 20–25% у віддаленій.

Просторовий розподіл NDWI засвідчив найбільш різку диференціацію між зонами. Так, у Херсонській обл. NDWI у ближній зоні знизився майже на 95%, тоді як у віддаленій — на 80%. У Запорізькій обл. зменшення становило 40% у межах 50 км та близько 20% за їх межами. Щодо Дніпропетровської обл. — зміни були незначними.

Аналіз NMDI також довів більшу інтенсивність деградації ґрунтового покриву поблизу колишнього водосховища. У Херсонській обл. індекс у ближній зоні знизився на 40–50%, тоді як у віддаленій — на 30–35%. У Запорізькій обл. падіння становило 30% у ближній зоні та 15% у віддаленій. А у Дніпропетровській обл. зміни були помірними — 25–30% у межах 50 км та 10–15% поза цією зоною.

Тому, просторовий аналіз спектральних індексів обґрунтував гіпотезу про значно вищу залежність агроландшафтів, розта-

шованих у безпосередній близькості до Каховського вдсх, від водопостачання. Поєднання часової динаміки та просторової диференціації дає можливість комплексно оцінити масштаби гідрологічного стресу та формує теоретично доведену основу для розроблення адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Отже, аналіз просторової диференціації впливу руйнування Каховської ГЕС на стан агроєкосистем виявив істотні регіональні відмінності в характері та масштабах деградації рослинного покриву. Для кількісної оцінки цих відмінностей було проведено порівняльний аналіз динаміки спектральних індексів (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) у трьох обраних областях, які характеризуються різним ступенем залежності сільськогосподарського виробництва від зрошення та неоднаковою віддаленістю від Каховського вдсх. Регіональні особливості змін стану рослинності і вегетаційних умов внаслідок втрати зрошення наведено в *табл. 1*.

Представлені дані відображають як загальні тенденції деградації рослинного покриву після червня 2023 р., так і специфічні регіональні особливості, зумовлені локальними гідрологічними умовами, структурою посівних площ, наявністю альтернативних джерел водопостачання та станом зрошувальної інфраструктури. Особлива увага приділена порівнянню територій, розташованих у безпосередній близькості до колишнього водосховища (до 50 км), з більш віддаленими сільськогосподарськими угіддями, що допомогло верифікувати гіпотезу про залежність інтенсивності впливу осушення водойми на стан агроландшафтів від відстані до водосховища.

Отримані дані по Дніпропетровській обл. демонструють найменші зміни серед трьох досліджуваних регіонів. До червня 2023 р. всі індекси характеризувалися стабільною сезонною динамікою, що свідчило про нормальні умови зволоження. Після руйнування дамби спостерігається помірне зниження індексів у ближній зоні (<50 км), зі зниженням NDVI та SAVI на 26–27%, NDWI — на 30, а NMDI — на 28%. У від-

Таблиця 1. Порівняння вегетаційних індексів

Область*	Зона, км	NDVI (2020–2022)	NDVI (2024–2025)	Δ NDVI, %	SAVI (2020–2022)	SAVI (2024–2025)	Δ SAVI, %	NDWI (2020–2022)	NDWI (2024–2025)	Δ NDWI, %	NMDI (2020–2022)	NMDI (2024–2025)	Δ NMDI, %
I	<50	0,44	0,32	-27	0,66	0,49	-26	0,37	0,26	-30	0,32	0,23	-28
I	>50	0,37	0,34	-8	0,55	0,49	-11	0,33	0,28	-15	0,3	0,26	-13
II	<50	0,46	0,33	-28	0,67	0,5	-25	0,39	0,24	-38	0,33	0,21	-36
II	>50	0,41	0,35	-15	0,61	0,52	-15	0,36	0,29	-19	0,31	0,26	-16
III	<50	0,49	0,22	-55	0,73	0,31	-57	0,42	0,05	-88	0,32	0,18	-44
III	>50	0,43	0,28	-35	0,66	0,38	-42	0,38	0,08	-79	0,31	0,2	-35
IV	Контроль	0,49	0,36	-27	0,74	0,55	-26	0,41	0,29	-29	0,25	0,19	-24

Примітки: I – Дніпропетровська обл., II – Запорізька обл., III – Херсонська обл., IV – Асканія-Нова.

даленій зоні (>50 км) зміни є незначними (8–15%), що вказує на локалізований вплив втрати водосховища без системної деградації агроєкосистем.

Стосовно Запорізької обл., дані свідчать, що ця територія зазнала більш виражених змін, особливо у ближній зоні. До середини 2023 р. індекси NDVI та SAVI мали високі значення, що вказувало на сприятливі умови для рослинності. Після осушення водосховища NDVI та SAVI знизилися на 25–28%, NDWI – на 38, а NMDI – на 36%. У віддаленій зоні падіння становить 15–19%, що фіксує помірний вплив втрати зрошення. Різниця між зонами стала особливо помітною з другої половини 2023 р., що підтверджує просторову нерівномірність деградаційних процесів.

Херсонська обл. зазнала найсильнішого впливу, що пояснюється її безпосередньою близькістю до Каховського вдсх. У ближній зоні NDVI знизився на 55%, SAVI – на 57, NDWI – на 88, а NMDI – на 44%. У віддаленій зоні зниження індексів також значне: NDVI – на 35%, SAVI – на 42, NDWI – на 79, NMDI – на 35%. Така динаміка свідчить про формування хронічного водного стресу, що охоплює не лише зони, безпосередньо залежні від зрошення, але й ширші території, які раніше отримували опосередковану вигоду від водосховища.

Територія БЗ «Асканія-Нова», яка постає контролем у дослідженнях, демонструє зниження індексів на рівні 24–29%, що значно менше, ніж у Херсонській обл. загалом. Це підтверджує, що частина змін пов'язана із регіональними кліматичними коливаннями, але критичне падіння NDWI та NDVI у зонах зрошення є прямим наслідком втрати водосховища. Для території БЗ «Асканія-Нова» як контрольній території з природною степовою рослинністю, що не залежала від зрошення, також спостерігається зниження індексів, але воно є значно меншим, ніж у Херсонській обл. загалом. Це доводить, що частина змін пов'язана із кліматичними коливаннями, тоді як критичне падіння NDWI та NDVI у зонах зрошення є наслідком втрати водосховища.

Застосування спектральних індексів NDVI, SAVI, NDWI та NMDI у цьому дослідженні дало змогу здійснити комплексну оцінку змін у рослинному покриві та водному режимі агроландшафтів після осушення Каховського вдсх. Кожен із індексів виконав специфічну функцію, забезпечуючи багатовимірне розуміння деградаційних процесів. NDVI продемонстрував високу чутливість до змін у біомасі та фотосинтетичній активності рослин. Його значення чітко відображали просторову диференціацію впливу втрати зрошення, особливо у Херсонській обл., де падіння

перевищило 50–70%. NDVI виявився ефективним для загального моніторингу стану рослинності. SAVI як модифікація NDVI з урахуванням ґрунтового фону підтвердив зниження щільності рослинного покриву на орних землях. Його застосування допомогло уникнути переоцінки біомаси в умовах оголеного ґрунту, що є критично важливим для точного аналізу сільськогосподарських угідь. NDWI був найчутливішим індикатором до втрати води. Його значення у Херсонській обл. знизилися майже до нуля, що свідчить про катастрофічне зневоднення рослинного покриву. NDWI, який ефективно ідентифікує водний стрес і є ключовим інструментом для моніторингу зрошуваних систем, доповнив аналіз, дозволяючи оцінити вологонасиченість ґрунтів. Його значення підтвердили тенденції NDWI, особливо у зонах, що раніше залежали від зрошення. NMDI є корисним для довгострокового моніторингу посух і деградації ґрунтів.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що комбінація цих чотирьох індексів забезпечує надійний інструментарій для виявлення, кількісної оцінки та просторового аналізу змін у рослинності та водному режимі. Їх спільне використання дає можливість не лише фіксувати факт деградації, але й розрізнити її причини (зневоднення, втрату біомаси чи посуху), що є критично важливим для екологічного моніторингу та планування адаптаційних заходів у сільському господарстві.

Окремим завданням для досягнення поставленої мети було визначення деградаційних процесів та оцінка екологічних ризиків для агроєкосистем регіону. Тому індекс VHI широко застосовується для моніторингу посухи, оцінки стресу рослин та прогнозування врожайності і є комплексним показником, що інтегрує інформацію про стан рослинності на основі температурних та вегетаційних характеристик, отриманих із супутникових даних.

Результати аналізу за червень 2021 р. (до початку повномасштабного вторгнення РФ) показали переважно задовільний стан рослинності на території Дніпропе-

тровської, Запорізької та Херсонської обл. (рис. 2, а).

Лише поодинокі осередки слабкої та помірної посухи спостерігалися на півдні Херсонської обл., що свідчить про мінімальний рівень деградаційних процесів у цей період.

У червні 2023 р. переважна частина території Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської обл. перебувала у задовільному стані ($VHI > 60$), що відображено темно-зеленим кольором на карті (рис. 2, б). Втім спостерігалися лінійні осередки сильної та екстремальної посухи (червоний і темно-червоний кольори), які простяглися вздовж долини р. Дніпро та південних районів Херсонської обл.

У червні 2024 р. ситуація істотно змінилася: площі з низькими значеннями VHI (сильна та екстремальна посуха) значно збільшилися, особливо в Херсонській обл. та частково в південних районах Запорізької, Дніпропетровська обл. залишалося переважно у задовільному стані, проте з'явилися локальні ділянки слабкої посухи (рис. 2, в). Це доводить про посилення кліматичних стресів та зростання ризику деградації агроєкосистем.

Найкритичніший прояв екстремальної та сильної посухи простежувався у червні 2025 р. на території Херсонської обл. Запорізька обл. мала також значні площі слабкої та помірної посухи, а Дніпропетровська — поодинокі осередки.

Отже, можна стверджувати, що використання супутникової інформації є ефективним інструментом для вивчення трансформації рослинного покриву та стану водного режиму за наслідками руйнації Каховського вдсх та кліматичних змін. Одержані результати є актуальними за розробки загальнодержавних і регіональних програм відновлення зрошення та заходів з адаптації сільськогосподарського виробництва до змін клімату на принципах скорочення емісії парникових газів у процесі аграрного виробництва, досягнення балансу між деградацією та відновленням ґрунтів та формування біоенергетичних низьковуглецевих агроєкосистем.

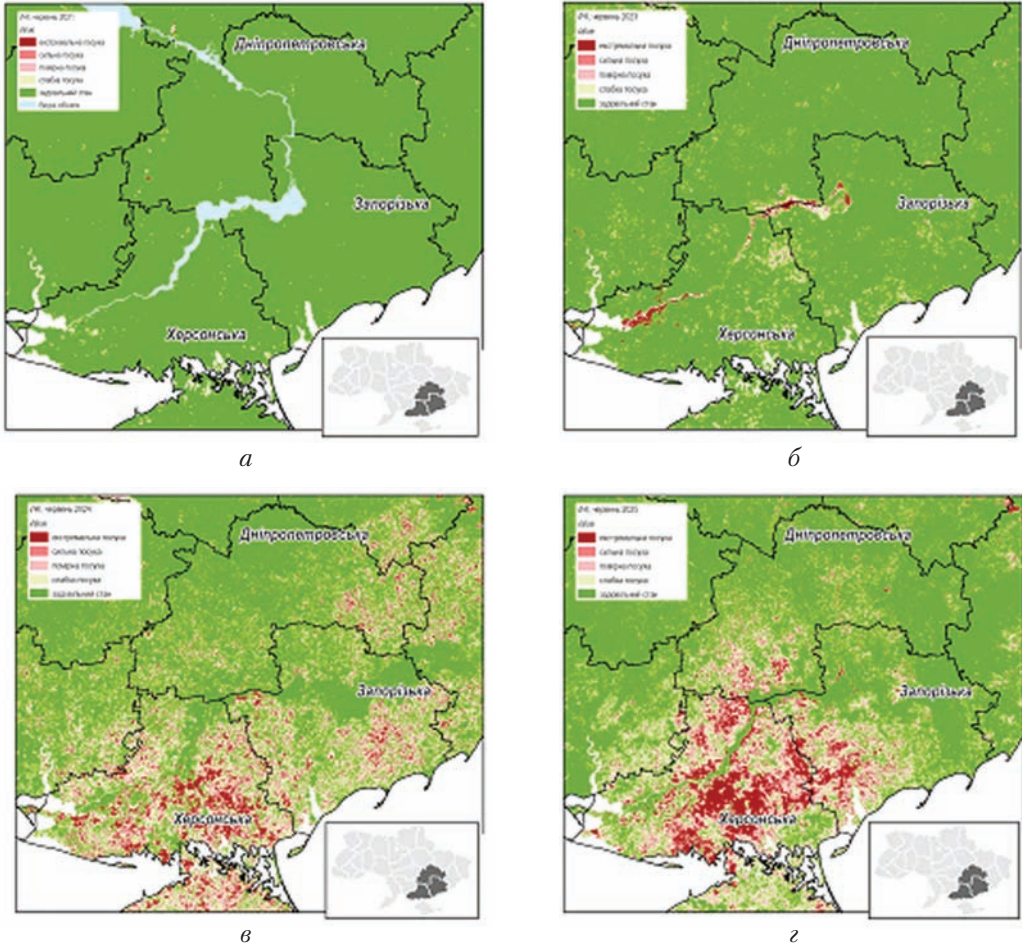


Рис. 2. Просторовий розподіл індексу VHI на території Дніпропетровської, Херсонської, Запорізької обл. у червні 2021 (а), 2023 (б), 2024 (в) та 2025 (г) рр.

Примітка: побудовано авторами.

ВИСНОВКИ

Руйнування Каховської ГЕС спричинило нерівномірну деградацію агроландшафтів із чітко вираженою просторовою залежністю по відстані до водосховища. У 50-кілометровій зоні зафіксовано критичне зниження вегетаційних показників: для Херсонської обл. NDVI знизився на 55%, SAVI — на 57, NDWI — на 88%, що свідчить про катастрофічне зневоднення та втрату біопродуктивності. Натомість у Дніпропетровській обл. деградація виявилася локалізованою (зниження показників

на 26–30%), що підтверджує гіпотезу про залежність інтенсивності екологічних наслідків від рівня попередньої залежності агроландшафтів від зрошення.

Комплексний аналіз індексу VHI за період 2021–2025 рр. виявив прогресивне розширення площ екстремальної та сильної посухи, особливо виражене у Херсонській обл. Порівняння з контрольною територією Біосферного заповідника «Асканія-Нова» імені Ф.Е. Фальц-Фейна (зниження показників на 24–29% проти 44–88% у зрошуваних зонах) дає змогу розмежу-

вати вплив регіональних кліматичних коливань від прямих наслідків втрати водопостачання. Це вказує на формування нового екологічного режиму з хронічним водним дефіцитом, який поглиблюється синергією антропогенних і кліматичних чинників.

Застосування чотирьох спектральних індексів (NDVI, SAVI, NDWI, NMDI) продемонструвало їхню диференційовану чутливість до різних аспектів деградації агроландшафтів. NDWI став найчутливішим маркером водного стресу (зниження до 88–95% у критичних зонах), тоді як SAVI забезпечив найточнішу оцінку втрати рослинного покриву з урахуванням ґрунтового фону. Статистична верифікація результатів *t*-тестами та критерієм Манна-Вітні підтвердила достовірність виявлених трендів ($p < 0,05$), що обґрунтовує використання мультиспектрального підходу як стандартизованої методології моніторингу наслідків масштабних гідрологічних катастроф.

Втрата функціонування 94% зрошувальних систем у Херсонській, 74 – у Запорізькій та 30% у Дніпропетровській обл. (загалом понад 580 тис. га) призвела до системної дестабілізації аграрного виробництва з орієнтованими втратами врожайності близько 4 млн т зернових та олійних культур на рік. Супутниковий моніторинг засвідчив не лише поточну деградацію, але

й формування передумов для довгострокового опустелювання південних агроландшафтів, що вимагає термінової розробки адаптаційних стратегій на засадах низьковуглецевого землеробства та альтернативних джерел водопостачання. Відновлення агроландшафтів має розглядатися також крізь призму відтворення їхніх екосистемних послуг, зокрема регулювання водного режиму, збереження ґрунтової родючості, підтримання біорізноманіття та забезпечення продовольчої безпеки, що відповідає концепції сталого управління природними ресурсами.

Дослідження доводить, що інтеграція платформ Google Earth Engine, QGIS, Copernicus Open Access Hub та Sentinel Hub EO Browser забезпечує оперативний, просторово детальний та науково валідний інструментарій для моніторингу масштабних екологічних трансформацій. На відміну від традиційних статистичних методів, супутниковий підхід допомагає визначати деградаційні процеси в режимі, наближеному до реального часу, що є критично важливим для прийняття управлінських рішень у сфері землекористування, водного менеджменту та розробки регіональних програм адаптації до кліматичних змін у контексті досягнення цілей сталого розвитку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Omia, E., Bae, H., Park, E., Kim, M. S., Baek, I., Kabenge, I., & Cho, B.-K. (2023). Remote sensing in field crop monitoring: A comprehensive review of sensor systems, data analyses and recent advances. *Remote Sensing*, 15(2), 354. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15020354>.
2. Осадчий, В. І. (2025). Каховське водосховище після катастрофи: сучасний стан, виклики та стратегія відновлення (стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 16 квітня 2025 р.). *Вісник НАН України*, 7, 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2025.07.062>.
3. Дупляк, В., Величко, С., & Дупляк, О. (2023). Наслідки руйнування Каховського водосховища для зрошення та водопостачання півдня України. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*, 44, 19–28. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.19-28>.
4. Romashchenko, M., Faybishenko, B., Onopriienko, D., Napich, H., Novitskiy, R., Dent, D., ... Roubik, H. (2025). Prospects for restoration of Ukraine's irrigation system. *Water International*, 50(2), 104–120. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>.
5. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., Barnett, C. L., Barwell, L., Collell, M. R., ... Wood, M. D. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*, 8(5), 834–836. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0>.
6. Truth Hounds & Project Expedite Justice. (2024). *Затоплено війною: дослідження руйнування Каховської греблі та його наслідки для екосистеми, аграріїв, цивільного життя та міжнародного правосуддя*. URL: <https://truth-hounds.org/cases/zatopleno-vijnoyu-doslidzhennya-rujnuvannya-kahovskoyi-grebli-ta-jogo-naslidy-dlya-ekosystemy-agrariyiv-czyvilnogo-zhyttya-ta-mizhnarodnogo-pravosuddya/>.
7. Tsaryk, L., & Kuzyk, I. (2023). Russian-Ukrainian War: Environmental Aspect. *Scientific Notes Ternopil*

- National Volodymyr Hnatyuk Pedagogical University. Ser.: Constructive Geography and Geoecology, 53, 2, 100–106.*
8. Tuchkovenko, Y. S., & Stepanenko, S. (2023). The impact of destruction of the Kakhovka dam on the environmental status of the Odesa area of the Black Sea. *Problems of Water Supply Sewerage and Hydraulics, 44*, 71–80. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.71-80>.
 9. Пічура, В. І., Потравка, Л. О., & Білошкуренко, О. С. (2025). Дослідження наслідків руйнації Каховської дамби та осушення водосховища для населення України. *Водні біоресурси та аквакультура, 1*(17), 218–247. DOI: <https://doi.org/10.32782/wba.2025.1.20>.
 10. Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., Кучма, Т. Л., Власова, О. В., Солоха, М. О., Зубов, А. О., & Білокінь, О. А. (2024). *Супутниковий моніторинг ерозійно деградованих агроландшафтів: наук.-метод. та практ. рек.* Київ: Аграрна наука. DOI: <https://doi.org/10.31073/978-966-540-605-1>.
 11. Freitas, M. W., & Santos, J. R. (2014). Zoneamento hierárquico da paisagem nos domínios da Bacia do Rio Uruguai. *Sociedade & Natureza (online), 26*, 287–300. DOI: <https://doi.org/10.1590/1982-451320140207>.
 12. Тараріко, О. Г., Ільєнко, Т. В., Кучма, Т. Л., Адамчук-Чала, Н. І., & Білокінь, О. А. (2022). Формування науково-методичних засад супутникового агроекологічного моніторингу в Україні. *Агроекологічний журнал, 2*, 6–21. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263312>.
 13. Саніна, І. В., & Люта, Н. Г. (2023). Екологічні наслідки підриву греблі Каховської ГЕС і шляхи вдосконалення водопостачання населення. *Мінеральні ресурси України, 2*, 50–55.
 14. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, & United Nations. (2024). Ukraine: Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 — December 2023. URL: <https://ukraine.un.org/sites/default/files/2024-02/UA%20RDNA3%20report%20EN.pdf>.
 15. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. (2023). Ukraine Khakovka Dam — 9 June 2023. URL: <https://www.unocha.org/media-centre/ukraine-khakovka-dam-9-june-2023>.
 16. Міністерство аграрної політики та продовольства України. (2023). Знищення росіянами Каховської ГЕС завдало значних збитків сільському господарству України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/znyshchennia-rosiianamy-kakhovskoi-hes-zavdalo-znachnykh-zbitkyk-silskomu-hospodarstvu-ukrainy>.
 17. Андрусевич, А., Короткий, Т., Марушевський, Г. Медведєва, М., Польовий, М., Тропін, З., & Хендель, Н. (2023). *Попередній екологічний та юридичний аналіз руйнування Каховської ГЕС і його наслідків (аналіз. звіт)*. Київ.
 18. 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.
 19. Тараріко, О. Г., Дем'янюк, О. С., Ільєнко, Т. В., Солоха, М. О., & Лиховид, П. В. (2025). Супутниковий інформаційний ресурс — сучасний потенціал для вирішення екологічних проблем агросфери України. *Збалансоване природокористування, 1*, 55–71. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.328357>.
 20. Ilchuk, M., Zatserkovnyi, V., Stakhiv, I., Lyashchenko, O., & Ilchenko, O. (2025). *Satellite-based monitoring of land cover transformation after the Kakhovka Dam collapse (2022–2025): Remote sensing for environmental monitoring*. URL: <https://www.openreviewhub.org/uk/node/8386>.
 21. Google Earth Engine — for planetary-scale geospatial analysis. URL: <https://earthengine.google.com/>.
 22. QGIS Development Team. *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation. URL: <https://qgis.org>.
 23. Copernicus Open Access Hub (Copernicus Data Space Ecosystem). (n.d.). Платформа доступу до супутникових даних програми Copernicus. URL: <https://dataspace.copernicus.eu/>.
 24. Sentinel Hub EO Browser. Online platform for accessing and visualizing Sentinel satellite imagery. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.
 25. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment, 8*(2), 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
 26. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment, 25*(3), 295–309. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
 27. Gao, B. C. (1996). NDWI — a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment, 58*(3), 257–266. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
 28. Wang, L., & Qu, J. J. (2007). NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters, 34*(20). DOI: <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>.
 29. Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research, 15*(11), 91–100. DOI: [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T).

Дата першого надходження рукопису до редакції: 16.12.2025
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.01.2026
 Дата публікації: 27.02.2026