

УДК 556.5:631.6:502.51

DOI <https://doi.org/10.32782/wba.2026.1.9>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

ГІДРОЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС І ОСУШЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА: ВІД ВОДЕРЕГУЛЮЮЧОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ДО ПОСТІРРИГАЦІЙНОЇ АРИДИЗАЦІЇ

*Пічура В.І. – д.с.-г.н., професор
orcid.org/0000-0002-0358-1889*

*Херсонський державний аграрно-економічний університет
pichuravitalii@gmail.com*

У статті здійснено оцінку гідроекологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС і осушення Каховського водосховища для зони зрошення Півдня України на прикладі Херсонської області та встановлено закономірності переходу агроландшафтів від водорегулюючої стабільності до постіригаційної аридизації. Дослідження базується на інтеграції супутникових, кліматичних та агровиробничих даних і спрямоване на аналіз змін водного режиму, гідротермічних умов і біопродуктивності у 2021–2025 рр. Показано, що до 2023 року Каховське водосховище виконувало функцію ключового гідрологічного буфера, забезпечуючи акумуляцію та перерозподіл водних ресурсів, підтримання продуктивної ґрунтової вологи, пом'якшення температурних екстремумів і стабілізацію аграрного виробництва. Осушення водосховища спричинило системний гідрологічний колапс, що проявився у припиненні водоподачі до магістральних каналів, порушенні водного балансу та переході до кліматично детермінованого функціонування території. Супутниковий аналіз індексу ОТСІ засвідчив поетапне зниження хлорофільної активності рослинного покриву та деградацію біопродуктивності. Просторова структура цих змін узгоджується із зонами втрати іригаційного водозабезпечення та впливу Каховського водосховища, що підтверджує їх гідроекологічну природу. У 2024–2025 рр. сформувався стійкий атмосферно-ґрунтовий водний дефіцит, зумовлений поєднанням високих температур, дефіциту опадів і зростання випаровування. Динаміка врожайності відображає інтегральний ефект трансформацій: у 2025 році її рівень знизився на 70–90% порівняно з довоєнним періодом. Це свідчить про втрату продукційної стійкості агроландшафтів і формування постіригаційного режиму їх функціонування. Обґрунтовано, що встановлені зміни відповідають постіригаційній аридизації – специфічному типу гідроекологічної трансформації, пов'язаному з втратою водорегулюючого ядра системи. Результати дослідження мають практичне значення для розроблення стратегій післявоєнного відновлення територій і трансформації систем водозабезпечення в умовах кліматичних змін.

Ключові слова: Каховське водосховище, гідроекологічна трансформація, зрошувані агроландшафти, постіригаційна аридизація, водний режим, гідротермічні умови, ОТСІ, біопродуктивність, супутниковий моніторинг, Херсонська область.

Постановка проблеми. Повномасштабна військова агресія російської федерації проти України стала потужним чинником трансформації природно-антропогенних систем, зокрема водозалежних агроландшафтів південного регіону країни. Найбільш критичні зміни відбулися у межах зрошеного землеробства Півдня України, де функціонування природно-господарських систем тривалий час визначалося антропогенно регульованим гідрологічним режимом, сформованим завдяки Каховському водосховищу та розгалуженій іригаційній інфраструктурі. Війна істотно загострила наявні проблеми водної безпеки, порушила роботу водогосподарських систем і створила нові ризики для екологічної стійкості територій, що вже перебували під впливом кліматичних змін і зростаючого дефіциту водних ресурсів [1-5].

Південь України характеризується підвищеною кліматичною вразливістю, дефіцитом водних ресурсів і значною залежністю агровиробництва від штучного водопостачання. У степовій зоні річна кількість атмосферних опадів становить 300–500 мм, тоді як потенційна евапотранспірація більш ніж у 2 рази перевищує їх надходження. За таких умов саме іригаційні системи забезпечували стабілізацію водного балансу, підтримання продуктивної ґрунтової вологи, пом'якшення теплового навантаження та функціонування агроландшафтів у вододефіцитному середовищі [1, 6, 7]. Посилення аридизаційних тенденцій, зростання частоти екстремально високих температур і збільшення ймовірності атмосферних і ґрунтових посух формують довготривалі гідроекологічні ризики для агроєкосистем степової зони України [8].

Ключовим водорегулюючим елементом регіональної гідрологічної системи впродовж другої половини ХХ – початку ХХІ століття було Каховське водосховище. Воно виконувало функції акумуляції та перерозподілу водних ресурсів, підтримання рівнів ґрунтових вод, регуляції поверхневого стоку, водопостачання та забезпечення функціонування зрошувальних систем. У межах Півдня України Каховське водосховище формувало водогосподарське ядро, від якого залежали зрошення, водозабезпечення населених пунктів, промисловості, аграрного сектору та екологічний стан водозалежних територій [5, 9, 10]. Додаткове надходження вологи в агроландшафти сприяло активізації ґрунтоутворних і гідрологічних процесів, зниженню температурного навантаження, підвищенню біопродуктивності та стабілізації врожайності сільськогосподарських культур [7, 11].

Руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023 року та подальше осушення Каховського водосховища спричинили масштабну гідроекологічну трансформацію регіону Нижнього Дніпра та прилеглих територій. Наслідками катастрофи стали втрата водорегулюючої функції системи, порушення балансу поверхневих і підземних вод, припинення подачі води

до магістральних каналів, зміна температурного та гідрохімічного режимів, трансформація руслових і заплавних процесів, а також формування довготривалих екологічних ризиків для водних і наземних екосистем [2, 5, 9, 10, 12]. Для зони зрошення це означало втрату головного джерела іригаційного водозабезпечення та перехід від керованого водного режиму до кліматично детермінованого функціонування території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна трансформація, зумовлена втратою водогосподарського ядра, має комплексний, багатофакторний характер і формується під впливом поєднання воєнних, гідрологічних і кліматичних чинників. Разом із припиненням іригаційного водозабезпечення відбуваються руйнування гідротехнічної та енергетичної інфраструктури, зниження рівнів ґрунтових вод, порушення гідрологічної зв'язаності території, деградація водойм і водотоків, обмеження доступу до водних і земельних ресурсів, мінування територій та скорочення площ сільськогосподарського використання [10, 13, 14]. У цих умовах водна безпека України набуває критичного значення, оскільки руйнування водогосподарської інфраструктури підсилює залежність природно-господарських систем від кліматичних екстремумів, обмежує можливості управління водними ресурсами та істотно ускладнює процеси післявоєнного відновлення територій [3–5, 10].

Ключовим наслідком зазначених процесів є втрата гідроекологічної стабільності та біокліматичної стійкості території. Втрата водного буфера посилює залежність природно-господарських систем від кліматичних коливань, що проявляється у зростанні дефіциту ґрунтової вологи, підвищенні теплового навантаження та деградації рослинного покриву. У системному вимірі така трансформація може розглядатися як режимний зсув, тобто перехід складної екосистеми до нового стану функціонування після втрати стабілізуючого чинника [15–18]. Для зони зрошення таким стабілізуючим чинником було іригаційне водопостачання, яке забезпечувало гідрологічну буферність, підтримувало продуктивну вологу ґрунту та зменшувало прояви літнього водно-теплового стресу.

На відміну від класичних процесів аридизації, зумовлених переважно кліматичними чинниками, сучасна трансформація зони зрошення має виражений гідроекологічний характер, оскільки пов'язана з втратою ключового водорегулюючого елемента системи. Постіригаційна аридизація формується як результат поєднання кліматичного водного дефіциту, припинення штучного водопостачання, зниження доступної ґрунтової вологи та деградації рослинного покриву [19]. Подібні процеси вимагають комплексної оцінки, що поєднує аналіз водного режиму, гідротермічних умов, ґрунтового зволоження та біофізичного стану рослинності [20–22].

Важливим інструментом дослідження таких трансформацій є дистанційне зондування Землі та геоінформаційний аналіз. Супутникові

показники забезпечують можливість оцінювати просторово-часові зміни рослинного покриву, температурного режиму та ґрунтового зволоження на великих територіях, зокрема в умовах обмеженого доступу до польових даних через окупацію та воєнні ризики. Індекс OTCI, розроблений для Sentinel-3 OLCI, є чутливим до вмісту хлорофілу, фізіологічного стану рослинності та змін фотосинтетичної активності [23, 24]. У поєднанні з даними щодо ґрунтової вологи, гідротермічних умов і кліматичних аномалій він може використовуватися як біофізичний індикатор гідроекологічного стресу території.

Дослідження, присвячені наслідкам руйнування Каховської ГЕС та осушення водосховища, вже висвітлюють зміни в межах колишньої акваторії, трансформацію рослинного покриву осушеного ложа, природні сценарії розвитку території та екологічні наслідки катастрофи [9, 12, 25-30]. Водночас гідроекологічні наслідки втрати водосховища саме для зони зрошення півдня України, включно з переходом від водорегулюючої стабільності до постіригаційної аридизації, потребують окремого комплексного аналізу.

Мета дослідження – оцінити гідроекологічні наслідки руйнування Каховської ГЕС і осушення Каховського водосховища та встановити просторово-часові закономірності переходу зони зрошення Херсонської області від водорегулюючої стабільності до постіригаційної аридизації.

Матеріали і методи досліджень.

Територія дослідження. Об'єктом дослідження є зона зрошення Херсонської області як водозалежна природно-господарська система, функціонування якої більше 60 років визначалося регульованим гідрологічним режимом Каховського водосховища та пов'язаною з ним гідромеліоративною інфраструктурою. Територія розташована на півдні України в межах Причорноморської низовини та належить до степової природно-кліматичної зони. Регіон характеризується високими температурами повітря, низькою кількістю атмосферних опадів, значним дефіцитом природного вологозабезпечення та критичною залежністю агроecosystem від штучного водопостачання [7, 10].

У гідроекологічному аспекті Херсонська область є одним із ключових регіонів Півдня України, де водний режим агроландшафтів визначався поєднанням дефіциту атмосферних опадів і функціонування великих водорегулюючих та іригаційних систем. До руйнування греблі Каховської ГЕС Каховське водосховище виконувало роль базового регулятора водного балансу території, забезпечуючи акумуляцію прісної води, живлення магістральних каналів, підтримання рівнів ґрунтових вод, перерозподіл водних ресурсів на відстань понад 200 км і стабілізацію продукційних процесів у зоні зрошення.

Загальна площа Херсонської області становить 2 846,1 тис. га, з яких 1 971,0 тис. га, або 69,3%, припадає на землі сільськогосподарського призначення. Площа ріллі становить 1 777,6 тис. га. Така структура землекористування свідчить про високий рівень аграрного освоєння території та значну залежність її екологічної стійкості від стану водного режиму. В умовах степового клімату саме співвідношення між природним зволоженням, штучним водопостачанням, рівнями ґрунтових вод і випаровувальними втратами визначає здатність агроландшафтів підтримувати біопродуктивність та екологічну рівновагу.

Ґрунтовий покрив області представлений переважно малогумусними південними чорноземами та темно-каштановими ґрунтами. Частка південних чорноземів становить 43,7% загальної площі, темно-каштанових ґрунтів – 30,7%. Вміст гумусу в ґрунтах регіону варіює в межах 0,30–3,85%, що свідчить про підвищену вразливість ґрунтового покриву до деградаційних процесів за умов дефіциту вологи, високого термічного навантаження та інтенсивного землекористування. У гідроекологічному контексті ці ґрунти є чутливими до змін водного балансу, оскільки втрата регулярного зволоження може спричинити прискорення процесів дегуміфікації, дефляції, вторинного засолення, ущільнення, зниження біологічної активності та втрату продуктивної вологи.

Проектна площа зрошуваних земель області становила 426,4 тис. га, що складало близько 20% зрошуваних площ України (рис. 1). Фактичне використання зрошувальних систем у 2003–2021 рр. коливалося в межах 250–315 тис. га. Основні зрошувальні системи зосереджені на лівобережжі Дніпра, зокрема Каховська, Каланчацька та Краснознам'янська, джерелом водопостачання яких було Каховське водосховище. Саме ці системи формували просторовий каркас штучного водозабезпечення території та забезпечували підтримання водного режиму агроландшафтів у найбільш посушливій частині області.

Частина Інгулецької зрошувальної системи функціонувала на правобережжі області та використовувала води річки Інгулець із підвищеною мінералізацією. Це зумовлювало специфіку гідрохімічного режиму правобережних зрошуваних земель і підвищувало значення контролю якості поливної води для запобігання вторинному засоленню ґрунтів. Таким чином, територія дослідження поєднує різні типи водозабезпечення: великомасштабне водопостачання з Каховського водосховища, локальні системи зрошення, правобережне використання вод Інгульця та природне атмосферне зволоження, що створює складну гідроекологічну структуру регіону.

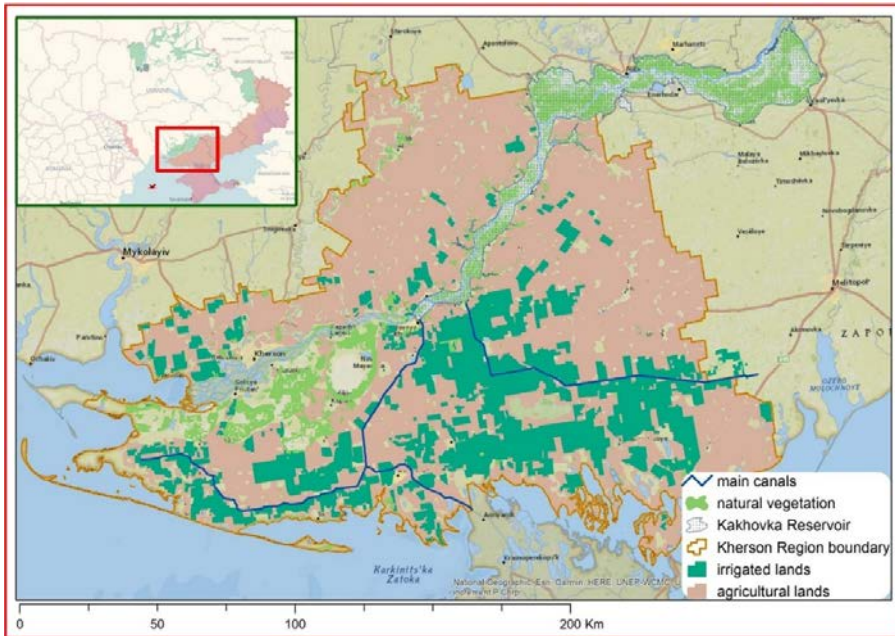


Рис. 1. Розміщення зрошуваних земель і магістральних зрошувальних каналів у межах Херсонської області

Територія характеризується посушливим степовим кліматом, високою сумою активних температур понад 3000 °С за рік і дефіцитом атмосферного зволоження у вегетаційний період. Середньорічна кількість атмосферних опадів становить 300–500 мм, причому майже кожен другий рік їх обсяг є критично низьким – менше 400 мм. Потенційна евапотранспірація приблизно вдвічі перевищує надходження атмосферних опадів, що зумовлює природну аридизацію території та критичну залежність агровиробництва від штучного водопостачання.

За таких умов Каховське водосховище та зрошувальні системи виконували комплексну виробничу та гідроекологічну функцію. Вони підтримували водний баланс території, сприяли поповненню запасів ґрунтової вологи, впливали на рівні ґрунтових вод, зменшували прояви атмосферної та ґрунтової посухи, забезпечували транспіраційне охолодження рослинного покриву та частково пом'якшували локальні прояви теплового стресу. Після втрати цього водорегулюючого елемента природна посушливість регіону стала визначальним чинником функціонування агроландшафтів.

Станом на лютий 2026 року тимчасово окупованими російським агресором залишаються 72,11% території Херсонської області, зокрема вся лівобережна її частина, де зосереджено близько 93% зрошуваних

земель області, 425 населених пунктів і значна частина аграрної та водогосподарської інфраструктури. Ця обставина має принципове значення для інтерпретації результатів дослідження, оскільки окупація території обмежує можливості наземного моніторингу, ускладнює управління водними ресурсами, відновлення каналів і насосних станцій, а також посилює значення дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу як основних інструментів оцінювання гідроекологічних змін.

Періоди дослідження. Для просторово-часового аналізу гідроекологічної трансформації зони зрошення Херсонської області обрано період 2021–2025 рр., який охоплює послідовні етапи переходу від водорегулюючої стабільності до постіригаційної аридизації. Такий часовий інтервал дозволяє порівняти стан території до початку повномасштабної війни, у період часткового порушення функціонування водогосподарських систем, після руйнування Каховської ГЕС та в перші повні вегетаційні сезони без зрошення та осушення Каховського водосховища.

2021 рік – розглядався як довоєнний референтний період функціонування іригаційної системи. У цей час Каховське водосховище виконувало важливу водорегулюючу функцію, забезпечувало подачу води до магістральних каналів, підтримувало роботу зрошувальних систем, формувало умови для стабільного водозабезпечення агроландшафтів і населених пунктів. Цей період використано як базовий для оцінювання просторової структури зрошення, біопродуктивності рослинного покриву та гідротермічних умов.

2022 рік – характеризувався як етап часткового порушення функціонування агровиробництва, водогосподарської та зрошувальної інфраструктури в умовах повномасштабної війни. На цьому етапі проявилися перші ознаки дестабілізації системи: скорочення оброблюваних площ, пошкодження інфраструктури, обмеження доступу до полів, порушення логістики та зростання воєнного впливу. Водночас Каховське водосховище ще зберігало водорегулюючу роль, тому 2022 рік можна розглядати як перехідний між довоєнною іригаційною стабільністю та подальшим гідрологічним колапсом.

2023 рік – є переломним етапом дослідження, оскільки 6 червня 2023 року відбулося руйнування Каховської ГЕС, подальше осушення Каховського водосховища та втрата основного джерела іригаційного водозабезпечення Півдня України. Для зони зрошення Херсонської області це означало припинення подачі води до магістральних каналів, втрату водорегулюючого буфера, порушення взаємозв'язків між поверхневими та підземними водами, а також різке зростання залежності агроландшафтів від атмосферних опадів.

2024–2025 рр. – розглядалися як перші повні вегетаційні сезони без функціонування Каховського водосховища як джерела зрошення та

регулятора водного режиму. Саме в цей період стали найбільш виразними наслідки постіригаційної трансформації: формування стійкого водного дефіциту, посилення теплового навантаження, зниження біопродуктивності рослинного покриву, деградація агроєкосистем і посилення ознак аридизації.

Ключовим аналітичним місяцем обрано липень як період максимального теплового навантаження та водного стресу рослин. У гідроекологічному аспекті липень є найбільш інформативним періодом для діагностики порушень водного режиму, оскільки саме в цей час поєднуються високі температури, інтенсивне випаровування, зниження доступної ґрунтової вологи та максимальна потреба рослин у воді. За умов функціонування зрошення ці чинники частково компенсувалися штучним водопостачанням, тоді як у постіригаційний період вони безпосередньо трансформуються у водний і тепловий стрес.

Саме в липні відбуваються критично важливі фенологічні фази розвитку пізніх ярих культур – соняшнику, кукурудзи, сої та овочевих культур, які на зрошуваних землях перебувають у стадіях активної вегетації, цвітіння та формування біомаси. Це забезпечує найбільш контрастну диференціацію між зрошуваними, прилеглими та незрошуваними землями. Тому липень обрано як репрезентативний період для виявлення просторових наслідків втрати іригаційного водозабезпечення, оцінювання біофізичного стану рослинності та діагностики гідроекологічної деградації території.

Джерела даних. У дослідженні використано комплекс різнотипних даних, що дозволяють оцінити зміни водного режиму, кліматичних умов, стану рослинності, гідротермічного навантаження та агровиробничої продуктивності. Інтеграція гідрогеологічних, меліоративних, кліматичних, супутникових і статистичних даних забезпечила можливість комплексної оцінки гідроекологічної трансформації території після втрати водорегулюючої функції Каховського водосховища.

До основних джерел даних належать матеріали Каховської гідрогеолого-меліоративної експедиції, які використано для аналізу розподілу гідротехнічної мережі, просторового положення зрошуваних земель, функціональної структури меліоративних систем і рівнів залягання ґрунтових вод. Ці дані є важливими для оцінювання довоєнної гідроекологічної організації території, оскільки дозволяють визначити просторові зони впливу зрошення, ділянки з близьким заляганням ґрунтових вод і території, найбільш чутливі до порушення водного балансу.

Дані Державного агентства водних ресурсів України використано для характеристики площ зрошення, обсягів водозабору, подачі зрошувальної води та функціонування водогосподарської інфраструктури. Вони

дали змогу оцінити роль Каховського водосховища у забезпеченні штучного водопостачання, а також кількісно описати зміну водогосподарського режиму після руйнування гідротехнічного комплексу.

Матеріали Департаменту розвитку сільського господарства та зрощення Херсонської обласної державної адміністрації використано для аналізу динаміки врожайності, втрат посівів, скорочення оброблюваних площ і загального стану аграрного виробництва. У межах цього дослідження агропромислові показники розглядалися як опосередковані індикатори гідроекологічного стану території, що відображають наслідки втрати водного забезпечення, посилення посухи та деградації рослинного покриву.

Кліматичний блок даних сформовано на основі матеріалів Meteostat (<https://meteostat.net/>), NOAA GSOD (<https://www.ncdc.noaa.gov/>) та ERA5-Land (<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Для аналізу використано показники атмосферних опадів, середньої та максимальної температури повітря, суми активних температур, кількості днів із максимальною температурою понад +35°C, нічних температур і потенційного випаровування. Поєднання станційних спостережень і реаналізу забезпечило можливість перевірки узгодженості кліматичних рядів, оцінювання температурних аномалій і визначення гідротермічного навантаження на територію у критичні періоди вегетації.

Супутникові дані Sentinel-3 OLCI (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) використано для оцінювання хлорофільної активності рослинного покриву за індексом OTCI. Ці дані дозволяють здійснювати просторово-часовий моніторинг стану рослинності на регіональному рівні та виявляти реакцію агроландшафтів на зміну водного режиму. В умовах обмеженого доступу до значної частини території через окупацію та воєнні дії, дистанційне зондування Землі є ключовим джерелом об'єктивної інформації про стан природно-господарських систем.

Крім того, використано геоінформаційні шари зрошувальних систем, магістральних каналів, землекористування, природної дренажної мережі, водойм, водотоків та меж адміністративних одиниць. Просторова інтеграція цих шарів дала змогу встановити взаємозв'язок між гідротехнічною інфраструктурою, природними елементами водного перерозподілу, структурою землекористування та зонами деградації рослинного покриву.

Комплексне використана база даних дозволила оцінити гідроекологічні наслідки осушення Каховського водосховища на кількох рівнях: водогосподарському – через зміну функціонування зрошувальних систем; гідрокліматичному – через динаміку опадів, температури, ГТК та ET₀; біофізичному – через зміну хлорофільної активності рослинності; просторовому – через геоінформаційний аналіз зон трансформації.

Оцінювання хлорофільної активності рослинності за індексом OTCI. Для оцінювання стану рослинного покриву, інтенсивності фотосин-

тетичної активності та просторово-часової динаміки біопродуктивності використано Terrestrial Chlorophyll Index (OTCI). У межах цього дослідження OTCI розглядається як показник вмісту хлорофілу та біопродуктивності, а також як біофізичний індикатор гідроекологічного стану території. Такий підхід обґрунтований тим, що хлорофільна активність рослинного покриву безпосередньо реагує на зміни доступної ґрунтової вологи, інтенсивність теплового навантаження, порушення водного балансу та розвиток водного стресу.

Індекс розраховано на основі супутникових даних Sentinel-3 OLCI Level-1B. Використання даних Sentinel-3 є доцільним для регіональних досліджень гідроекологічної трансформації, оскільки просторове охоплення сенсора дозволяє аналізувати великі території зрошуваних і незрошуваних земель, а спектральні канали в області red-edge є чутливими до змін фізіологічного стану рослинності.

OTCI визначали за формулою [23, 24]:

$$OTCI = (B12 - B11) / (B11 - B10) \quad (1)$$

де B10, B11, B12 – значення відбиття відповідних спектральних каналів сенсора OLCI: B10 – червона зона спектра, чутлива до поглинання хлорофілом; B11 – зона red-edge; B12 – ближній інфрачервоний діапазон.

Алгоритм базується на аналізі форми спектральної кривої в області red-edge, що є чутливою до концентрації хлорофілу, щільності листового покриву та фізіологічного стану рослинності. Зміщення та зміна крутизни red-edge ділянки спектра відображають зміни пігментного складу рослин, їх водозабезпечення, активності фотосинтезу та ступеня стресового навантаження. Саме тому OTCI є придатним для виявлення деградації рослинного покриву, зниження продуктивності агроценозів і просторової ідентифікації зон гідроекологічного стресу.

Отримані значення OTCI інтерпретували відповідно до шкали хлорофільної активності: менше 1,8 – дуже низька; 1,8–2,2 – низька; 2,2–2,5 – середня; 2,5–3,0 – підвищена; 3,0–3,5 – висока; понад 3,5 – дуже висока.

У гідроекологічній інтерпретації низькі значення OTCI свідчать про пригнічений стан рослинності, дефіцит хлорофілу, водний або тепловий стрес, зниження транспіраційної активності та втрату продукційної стійкості агроландшафтів. Значення менше 2,2 розглядалися як індикатор значного гідроекологічного стресу, що пов'язаний із дефіцитом продуктивної ґрунтової вологи, припиненням зрошення або несприятливими гідротермічними умовами. Значення 2,5–3,0 і вище характеризують задовільний або добрий стан рослинного покриву, активний фотосинтез, достатнє забезпечення вологою та вищу біопродуктивність агроценозів.

Порівняння значень OTCI між довоєнним, воєнним і постіригаційним періодами дозволило оцінити просторово-часову реакцію рослинності

на втрату водорегулюючої функції Каховського водосховища. Особлива увага приділялася липневим значенням індексу, оскільки в цей період рослинність найбільш чутливо реагує на дефіцит вологи, а контраст між зрошуваними та незрошуваними землями є найбільш виразним.

ОТСІ використано як інтегральний біоіндикатор каскадної гідроекологічної трансформації «осушення водосховища → втрата зрошення → дефіцит ґрунтової вологи → посилення теплового стресу → зниження хлорофільної активності → деградація рослинного покриву».

Оцінювання гідротермічних умов. Для оцінювання атмосферної посухи та співвідношення між надходженням вологи і тепловими ресурсами використано гідротермічний коефіцієнт (ГТК). Цей показник є інформативним для степових територій, де водний режим агроландшафтів визначається сумою опадів, інтенсивністю теплового навантаження та випаровувального попиту атмосфери.

Гідротермічний коефіцієнт розраховували за формулою [8]:

$$\text{ГТК} = \frac{\sum P}{0.1 \sum T_{>10}} \quad (2)$$

де P – сума опадів за період із середньодобовою температурою повітря понад 10°C ; $\sum T_{>10}$ – сума активних температур вище 10°C .

Класифікацію умов зволоження здійснювали за такими градаціями: понад 1,3 – надмірно вологі умови; 1,0–1,3 – достатнє зволоження; 0,7–1,0 – недостатнє зволоження; 0,5–0,7 – посушливі умови; менше 0,5 – дуже посушливі умови.

У межах дослідження ГТК використовувався як показник атмосферного водного дефіциту, що дозволяє порівнювати різні роки за ступенем гідротермічного навантаження. Особливе значення цей показник має для постіригаційного періоду, коли після втрати Каховського водосховища атмосферні опади стали основним джерелом вологозабезпечення агроландшафтів. За таких умов навіть помірне зменшення кількості опадів або підвищення температури може призводити до різкого зниження водозабезпеченості рослин.

Додатково проаналізовано середню температуру липня, аномалію температури відносно кліматичної норми 1991–2020 рр., суму активних температур, кількість днів із максимальною температурою понад $+35^{\circ}\text{C}$, максимальні денні температури, нічні температури, суму опадів і потенційне випаровування. Такий комплекс показників дозволяє оцінити рівень атмосферної посухи, інтенсивність теплового та випаровувального навантаження на територію.

Показник потенційного випаровування E_{To} використано для характеристики випаровувального попиту атмосфери. У поєднанні з кількістю опадів і ГТК він дозволяє визначити ступінь водного дисбалансу в критичний період вегетації. В умовах функціонування зрошення високі значення

ЕТо частково компенсувалися штучним водопостачанням, тоді як після осушення Каховського водосховища вони стали чинником швидкого виснаження доступної ґрунтової вологи.

Окрему увагу приділено кількості днів із максимальною температурою понад +35 °С, оскільки такі температури є критичними для багатьох сільськогосподарських культур у фазах цвітіння, запилення та формування генеративних органів. Поєднання високих денних температур із підвищеними нічними температурами посилює фізіологічний стрес рослин, збільшує дихальні втрати асимілятів і знижує ефективність фотосинтезу. У гідроекологічному контексті це означає послаблення здатності рослинного покриву виконувати регуляторні функції, зокрема транспіраційне охолодження та підтримання мікрокліматичної стабільності.

Оцінювання гідротермічних умов дозволило встановити, яким чином втрата водорегулюючої функції Каховського водосховища посилила чутливість території до кліматичних екстремумів і сприяла переходу від іригаційно стабілізованого водного режиму до постіригаційної аридизації.

Геоінформаційний аналіз. Просторове моделювання досліджуваних процесів виконано із застосуванням геоінформаційних технологій у програмному середовищі ArcGIS. Методичний підхід ґрунтувався на комплексній обробці та інтеграції різнотипних просторових даних, зокрема дешифруванні супутникових знімків, накладанні тематичних шарів і подальшій тематичній інтерпретації.

Геоінформаційний аналіз був спрямований на виявлення просторових закономірностей гідроекологічної трансформації території після втрати водорегулюючої функції Каховського водосховища. Основна увага приділялася зіставленню просторового розміщення зрошуваних земель, магістральних каналів, природної дренажної мережі, зон із різним рівнем ґрунтового зволоження та ділянок деградації рослинного покриву.

Геоінформаційний аналіз включав просторову ідентифікацію зрошуваних земель, аналіз розміщення магістральних каналів і гідротехнічної мережі, оцінювання змін хлорофільної активності рослинного покриву, порівняння стану зрошуваних і незрошуваних земель, визначення зон найбільш інтенсивної деградації рослинності та узгодження супутникових індикаторів із кліматичними й агровиробничими даними.

Окремим етапом було зіставлення зон колишнього іригаційного впливу з динамікою ОТСІ у 2021–2025 рр. Це дозволило визначити просторово-часову відмінність території найбільшого зниження хлорофільної активності з масивами, які до 2023 року залежали від водопостачання з Каховського водосховища. Такий підхід дав змогу інтерпретувати деградацію рослинного покриву як наслідок кліматичної посухи і результат втрати гідроекологічного регулювання.

Також здійснювалося порівняння правобережної та лівобережної (окупованої РФ) частин області з урахуванням відмінностей у джерелах водопостачання, структурі зрошувальних систем і доступності земель для господарського використання. Це дозволило врахувати просторову неоднорідність гідроекологічної трансформації та уникнути надмірного узагальнення результатів для всієї території області.

На основі інтеграції супутникових, кліматичних, меліоративних і просторових даних було сформовано аналітичну схему оцінки гідроекологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС і осушення водосховища. Вона передбачала послідовний аналіз таких взаємопов'язаних блоків: втрата водорегулюючої функції; порушення зрошувального водопостачання; посилення гідротермічного стресу; зниження хлорофільної активності рослинного покриву; деградація біопродуктивності агроландшафтів.

Геоінформаційний підхід забезпечив просторову верифікацію гідроекологічних змін і дозволив встановити причинно-наслідкові зв'язки між руйнуванням водогосподарської інфраструктури, втратою зрошення, зміною водного режиму та деградацією рослинного покриву в зоні зрошення та впливу осушеного водосховища в межах територій Херсонської області.

Результати дослідження

Довоєнний стан функціонування зони зрошення як водорегульованої гідроекологічної системи. До початку повномасштабних воєнних дій зрошуване землеробство було визначальним чинником функціонування природно-господарських систем Херсонської області та важливою складовою продовольчої безпеки Півдня України. Водночас у межах цього дослідження зрошення розглядається як агротехнологічний інструмент підвищення врожайності та ключовий елемент гідроекологічного регулювання території. Саме Каховське водосховище та пов'язана з ним мережа магістральних каналів забезпечували формування антропогенно регульованого водного режиму, який компенсував природний дефіцит атмосферного зволоження у степовій зоні.

Води Каховського водосховища забезпечували зрошення основних меліоративних масивів області, а зрошувальні системи станом на 2021 рік підтримували полив близько 315 тис. га сільськогосподарських угідь. Такий масштаб штучного водопостачання формував просторово розгалужену систему перерозподілу вологи, яка впливала на врожайність культур та рівні ґрунтових вод, мікрокліматичні умови, стан рослинного покриву, водність локальних водойм і загальну гідроекологічну стійкість агроландшафтів.

Зрошення забезпечувало значне підвищення продуктивності агроландшафтів. Урожайність зернових культур на зрошуваних землях досягала 3,8–5,4 т/га порівняно з близько 2,0–2,4 т/га на незрошуваних зем-

лях. Крім прямого продукційного ефекту, іригація формувала сприятливі мікрокліматичні умови, підтримувала водний баланс ґрунтів, зменшувала прояви теплового стресу в періоди високих температур і забезпечувала стабільну біофізичну активність рослинного покриву в критичні фази вегетації.

Добра зволоженість території Херсонської області забезпечувалася комплексним перерозподілом вологи через природні водотоки та гідротехнічну мережу зрошувальних систем (рис. 2). Профільно-горизонтальний перерозподіл водних потоків відбувався з півночі на південь області, що сприяло підтриманню водності водойм і водотоків, збалансованості водного режиму території та добрій біологічній активності ґрунтового покриву.

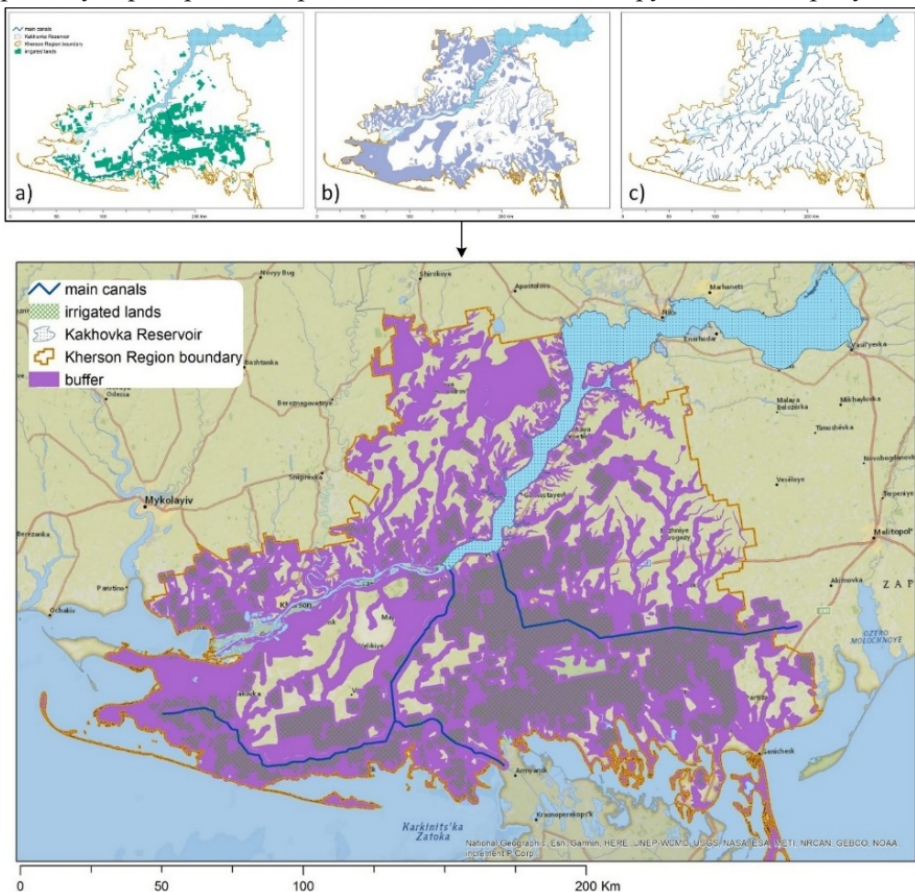


Рис. 2. Гідротехнічний та гідрологічний розподіл вологи на території Херсонської області: *a* – розміщення зрошуваних земель і магістральних каналів; *b* – території з рівнем залягання ґрунтових вод до 5 м; *c* – водотоки природного гідрологічного перерозподілу вологи

У гідроекологічному вимірі така система виконувала роль штучно підтримуваного водного каркасу території. Магістральні канали, міжгосподарська й внутрішньогосподарська мережа, водозабірні споруди та зрошувальні масиви забезпечували подачу води на поля та перерозподіл водних ресурсів у межах локальних ландшафтних систем. Завдяки цьому формувалися умови для підтримання вологи у ґрунтовому профілі, зниження амплітуди температурних коливань підстильної поверхні та збереження продукційної активності агроценозів у посушливий період.

У період функціонування Каховське водосховище виконувало роль потужного гідрологічного водопору, що сприяло підвищенню рівнів ґрунтових вод у правобережній частині області (правобережжя річки Дніпро). Для лівобережних територій водосховище було важливим джерелом розвантаження вод і підтримання оптимального ґрунтового зволоження. Прісні зрошувальні води забезпечували промивний режим ґрунтів, сприяли їх розсоленню, збільшенню запасів прісних ґрунтових вод і зниженню рівня їх мінералізації.

До руйнування Каховської ГЕС водосховище виконувало важливу функцію акумуляції водних ресурсів та роль базового регулятора гідроекологічної рівноваги степових систем. Його вплив поширювався на поверхневі води, ґрунтові води, меліоративний стан земель, водно-сольовий режим ґрунтів, біопродуктивність рослинного покриву та стійкість аграрного виробництва до кліматичних екстремумів.

Кількісні параметри водозабезпечення підтверджують провідну роль іригації у компенсації кліматичного дефіциту вологи. Упродовж 1966–2021 рр. (рис. 3) у вододефіцитний період вирощування культур (травень–вересень), сума атмосферних опадів у напрямі з півдня на північ варіювала в межах 155–330 мм. Зрошення додатково компенсувало дефіцит природного зволоження на рівні 80–200 мм, а в посушливі роки – до 300 мм.

Сумарна водоподача на зрошуваних землях становила 345–410 мм, що забезпечувало підвищення біокліматичного потенціалу зрошуваних і прилеглих агроландшафтів у 1,2–3,0 раза, а врожайності – у середньому в 2,5 раза. З гідроекологічної позиції ці показники свідчать про те, що іригація фактично змінювала природний водний режим території, переводячи агроландшафти зі стану хронічного атмосферного водного дефіциту до стану штучно підтримуваної водної забезпеченості.

Кореляційна залежність між сумою атмосферних опадів і обсягами зрошення свідчить про обернений нелінійний зв'язок: зі зменшенням природного зволоження потреба у штучному водопостачанні закономірно зростала. Це підтверджує компенсаторну роль іригації у формуванні водного балансу агроландшафтів і стабілізації їх продукційного потенціалу. Водночас така залежність засвідчує високу чутливість зони зрошення до втрати

штучного водного компонента: за умов припинення водоподачі територія повертається до природного дефіцитного режиму зволоження, який не здатний забезпечувати попередній рівень біопродуктивності.

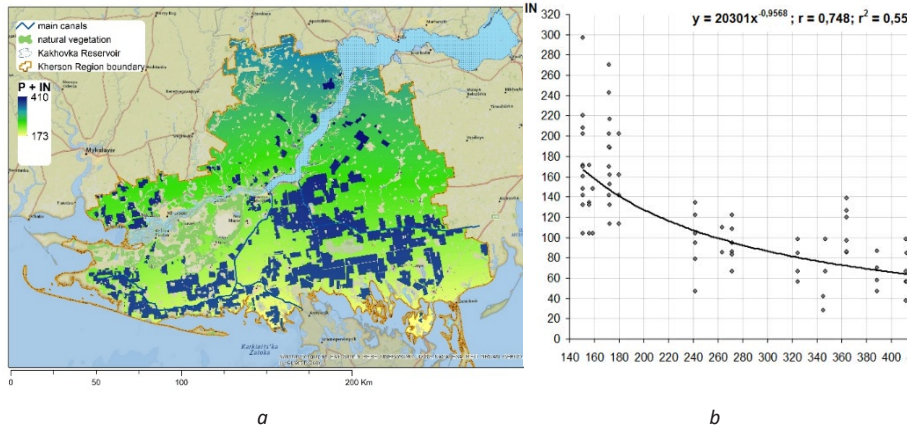


Рис. 3. Сумарне природно-штучне вологозабезпечення території Херсонської області у вегетаційний період 1966–2021 рр.: *a* – просторовий розподіл вологи; *b* – залежність обсягів зрошення від кількості атмосферних опадів

Супутникова верифікація біопродуктивності та гідроекологічного стану рослинності у 2021 році. Виявлені закономірності водного забезпечення мають прямий прояв у стані рослинного покриву, його біопродуктивності та інтенсивності фотосинтетичних процесів. Просторово-часова реакція агроценозів на поєднання природного зволоження і штучного водопостачання простежується за супутниковими індикаторами вмісту хлорофілу та щільності рослинності.

У межах цього дослідження індекс ОТСІ використано як біофізичний індикатор гідроекологічного стану агроландшафтів, оскільки хлорофільна активність рослинного покриву безпосередньо залежить від доступності ґрунтової вологи, рівня теплового навантаження та стабільності водного режиму. В умовах зрошення високі значення ОТСІ комплексно відображають продуктивність культур та ефективність водорегулюючої функції іригаційної системи.

Аналіз індексу ОТСІ упродовж вегетаційного періоду 2021 року (рис. 4) засвідчив виразну просторову диференціацію хлорофільної активності між зрошуваними та незрошуваними землями. У травні переважна частина території характеризувалася підвищеними та високими значеннями індексу, що відповідало доброму природному зволоженню та активному фотосинтезу озимих і ранніх ярих культур.

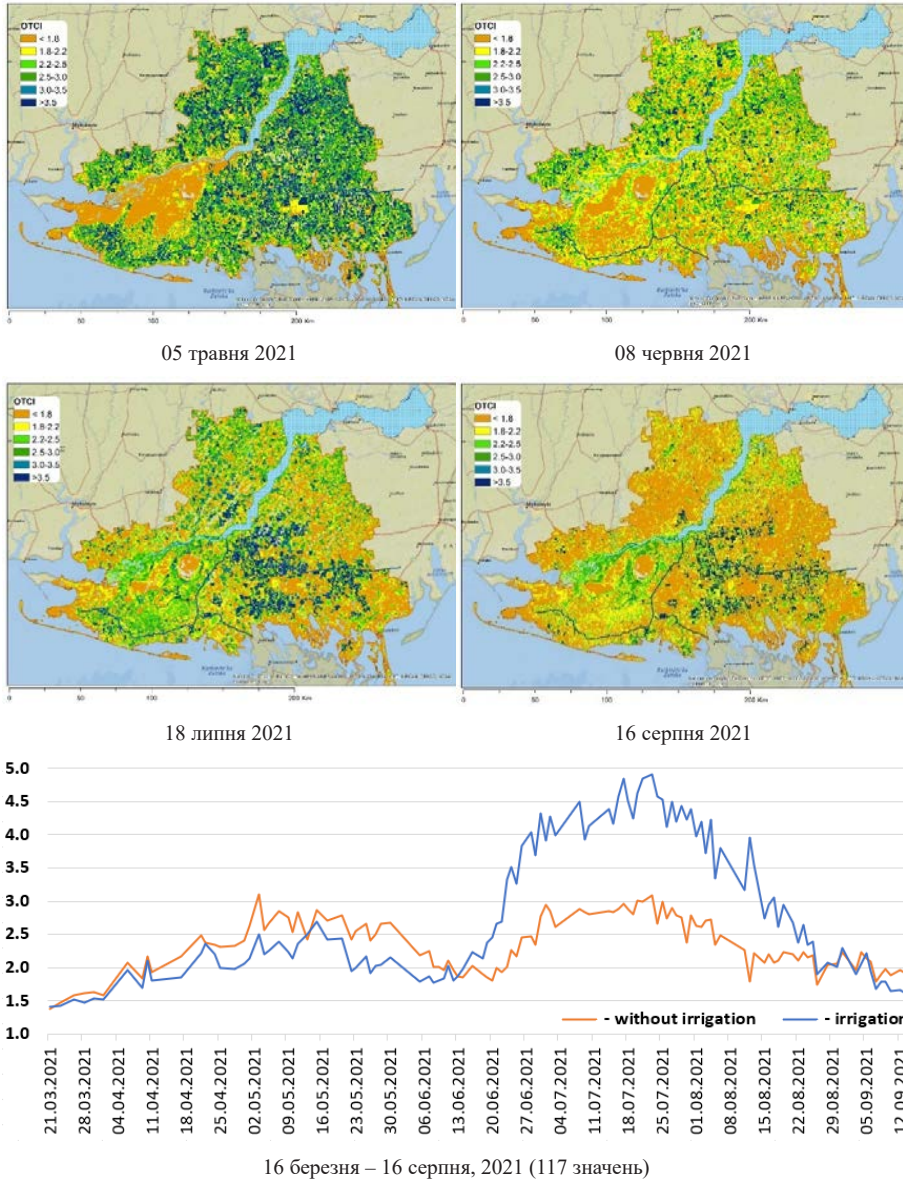


Рис. 4. Просторово-часова динаміка індексу ОТСІ та роль зрошення у формуванні біопродуктивності й гідроекологічної стабільності рослинного покриву Херсонської області у 2021 році

У червні висока біопродуктивність зберігалася переважно в межах іригаційних масивів, де посіви пізніх ярих культур перебували в активній початковій фенологічній фазі розвитку. Натомість на незрошуваних землях

поширювалися зони середніх і низьких значень індексу, що було зумовлено завершенням вегетації озимих і ранніх ярих культур та уповільненим розвитком пізніх ярих посівів за умов зростання водного дефіциту.

У липні – період максимального теплового навантаження – контраст між зрошуваними і незрошуваними угіддями суттєво посилювався. На богарних землях домінував водний стрес, тоді як у зоні поливу зберігалися підвищені показники хлорофілу. Це свідчить про те, що зрошення забезпечувало додаткове надходження вологи і підтримувало фізіологічно активний стан рослинності в умовах найвищого гідротермічного навантаження.

У серпні фіксувалося загальне сезонне зниження індексу, однак зрошувані масиви й надалі демонстрували кращий фітосанітарний стан пізніх ярих культур. Така динаміка підтверджує, що у довоєнний період іригаційна система продовжувала виконувати компенсаторну гідроекологічну функцію навіть у фазі природного виснаження атмосферної вологи.

Часова діаграма ОТСІ підтвердила визначальну роль зрошення: значення індексу на поливних землях стабільно перевищували показники незрошуваних угідь на 1,0–1,8 одиниці. Загалом результати засвідчують, що зрошення формувало підвищений біопродуктивний і хлорофільний потенціал агроландшафтів, зменшувало прояви водного стресу та забезпечувало стабільність функціонування рослинного покриву в посушливих кліматичних умовах регіону.

Супутникова верифікація довоєнного стану підтвердила, що території, пов'язані з іригаційним водозабезпеченням, мали вищу біофізичну активність рослинності, кращий водний стан агроценозів і більшу стійкість до літнього теплового навантаження. Це дозволяє розглядати ОТСІ як діагностичний індикатор біопродуктивності та гідроекологічної стабільності зони зрошення.

Просторово-часова деградація рослинного покриву за індексом ОТСІ у 2021–2025 рр. Війна та втрата штучного водопостачання спричинили різке зниження біопродуктивної стійкості зони зрошення і деградацію рослинного покриву, що чітко простежується за супутниковими індикаторами хлорофільної активності. Просторово-часова трансформація рослинного покриву Херсонської області за індексом ОТСІ упродовж 2021–2025 рр. (рис. 5) демонструє послідовне зниження біопродуктивності та рівня зволоження рослинності в межах колишньої зони зрошення.

У гідроекологічному контексті динаміка ОТСІ відображає реакцію рослинного покриву на втрату водного регулювання. Зниження індексу свідчить про зменшення біомаси та зниження хлорофілу, а також посилення водного стресу, зниження транспіраційної активності, втрату здатності рослинності пом'якшувати локальне теплове навантаження та погіршення функціонального стану агроландшафтів.

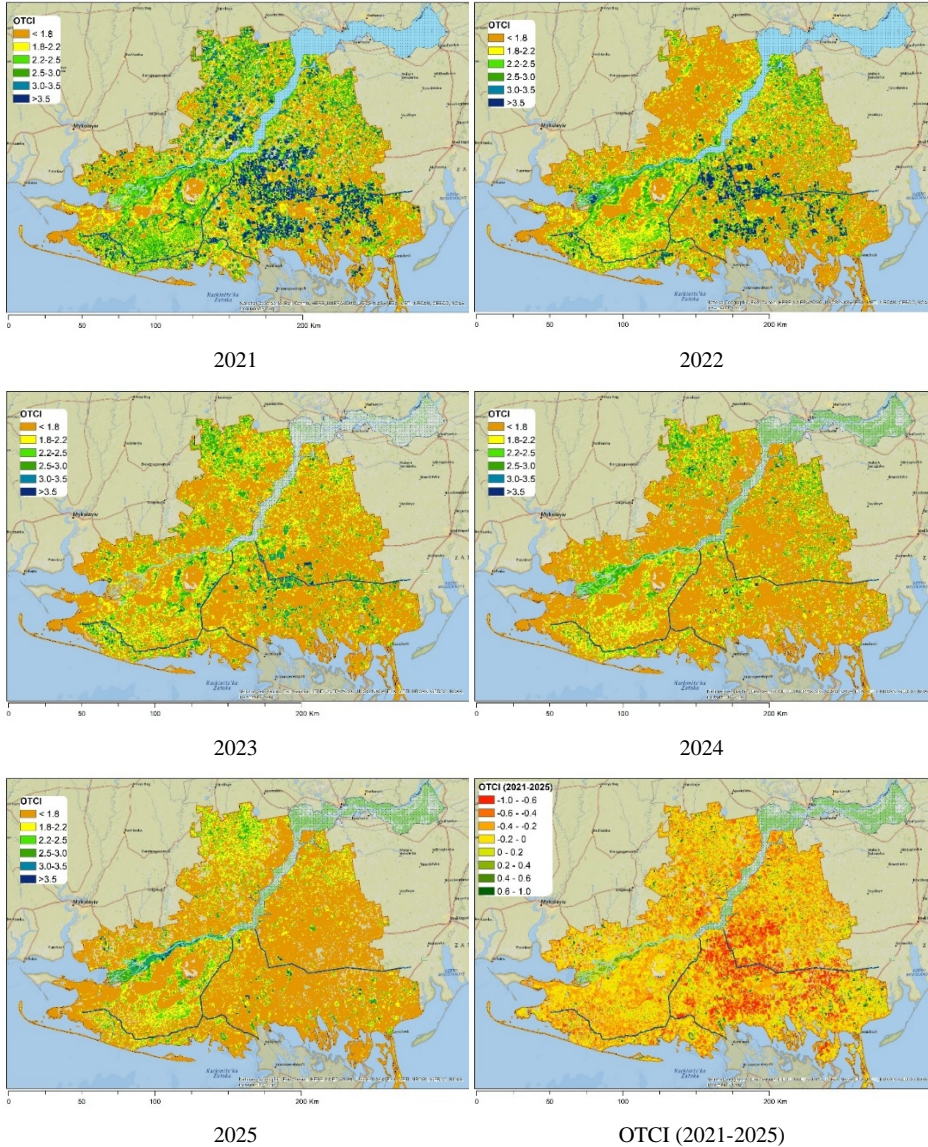


Рис. 5. Просторово-часова динаміка індексу ОТСІ та деградація рослинного покриву зрошуваних систем Херсонської області у липні 2021–2025 рр.

У липні 2021 року, за умов активного функціонування іригаційної інфраструктури, територія характеризувалася підвищеними та високими значеннями індексу – понад 2,5–3,5 і більше 3,5. Це відповідало доброму водозабезпеченню, щільному рослинному покриву та інтенсивній вегетації агроценозів. Просторове поширення високих значень ОТСІ узгоджувалося

із зонами функціонування зрошувальних систем, що підтверджує роль іригації у підтриманні гідроекологічної стабільності рослинного покриву.

У 2022 році фіксується зростання площ із середніми та низькими значеннями ОТСІ, що зумовлено скороченням агровиробництва в умовах воєнних дій і зменшенням площ оброблюваних земель. Частина територій, які раніше характеризувалися високою хлорофільною активністю, перейшла до класів середнього або зниженого стану. Це свідчить про початкову дестабілізацію функціонування агроландшафтів, хоча водорегулююча роль Каховського водосховища ще зберігалася.

Після руйнування Каховської ГЕС та осушення Каховського водосховища у 2023 році спостерігається різке збільшення територій із низькими значеннями індексу – менше 2,2. Це свідчить про критичний водний стрес, деградацію рослинного покриву та фактичне зниження продукційної активності колишніх зрошуваних масивів. Особливо важливим є те, що просторове зниження ОТСІ збігається з територіями, які до 2023 року були функціонально пов'язані з подачею води з Каховського водосховища.

У 2024–2025 рр. деградаційні процеси поглиблювалися, формуючи суцільні ареали низької хлорофільної активності та поширення оголених і деградованих земель. На лівобережній окупованій території лише незначна частина сільськогосподарських земель використовувалася у виробництві, тоді як переважна частина площ характеризувалася оголеними ґрунтами, сухостоєм або деградованою степовою рослинністю. Це свідчить про перехід значних площ із режиму продуктивного агроландшафту до режиму деградованого постіригаційного ландшафту.

Інтегральна карта змін ОТСІ за 2021–2025 рр. відображає осередки найбільш інтенсивного зниження біопродуктивності, які просторово узгоджуються із зонами втрати іригаційного водозабезпечення та осушення зрошувальних систем. Це підтверджує визначальну роль зрошення у підтриманні фітопродуктивного потенціалу та екологічної стійкості агроландшафтів регіону. Водночас така просторова узгодженість свідчить про гідроекологічну природу деградації рослинного покриву, зумовлену втратою водного регулювання та підсилену міжрічною кліматичною варіабельністю.

Подальша кількісна верифікація динаміки ОТСІ на зрошуваних землях (рис. 6) засвідчує поетапне зниження хлорофільної активності. У 2021 році, за повноцінного функціонування зрошувальних систем, індекс ОТСІ досягав 4,5–4,8 у пікові фази вегетації, що відповідало дуже високому вмісту хлорофілу, доброму зволоженню та інтенсивному фотосинтезу культур.

У 2022 році максимальні значення ОТСІ не перевищували 3,8–4,0, а тривалість періоду високої біопродуктивності скорочувалася, що відображало часткове порушення режимів зрошення та агровиробництва.

Таке зниження можна розглядати як перший сигнал втрати стабільності системи, зумовлений воєнними чинниками та обмеженням нормального функціонування аграрного виробництва.

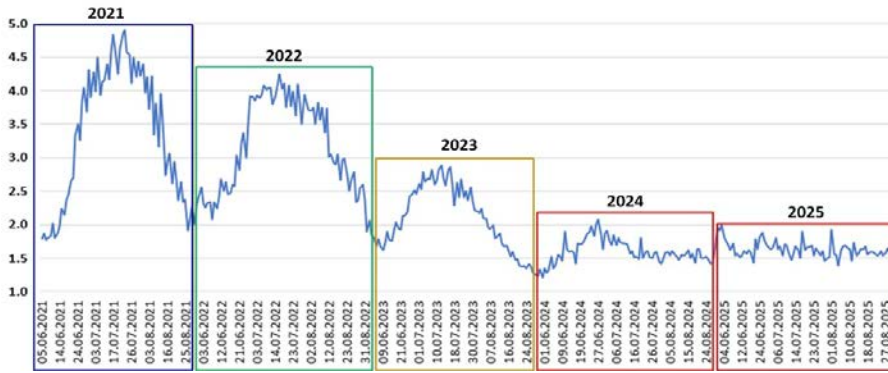


Рис. 6. Динаміка індексу ОТСІ на зрошуваних землях Херсонської області у 2021–2025 рр.

У 2023 році, після руйнування греблі Каховської ГЕС і припинення водоподачі, пікові значення ОТСІ знизилися до 2,5–2,8, що відповідало недостатньому зволоженню та свідчило про системну деградацію рослинного покриву колишніх зрошуваних масивів. Саме цей рік є ключовим для фіксації переходу від порушеної, але ще потенційно регульованої системи до системи, яка втратила базове джерело водного забезпечення.

У 2024 році деградаційна тенденція посилилася: значення ОТСІ стабілізувалися переважно в межах 1,4–2,0, що відповідало низькому вмісту хлорофілу та значному водному стресу рослин. Вегетаційні піки практично згладилися, що вказує на втрату продукційної стійкості агроценозів. У гідроекологічному аспекті це означає, що рослинний покрив втратив здатність підтримувати попередній рівень функціональної активності в літній період без штучного водопостачання.

У 2025 році сформувався стаціонарно депресивний стан рослинного покриву: коливання ОТСІ відбувалися у вузькому діапазоні 1,5–1,8 без виражених сезонних максимумів. Це свідчить про розвиток стійкої ґрунтової посухи, деградацію агроландшафтів і набуття ними ознак аридизованих та напівпустельних екосистем. Відсутність сезонних піків ОТСІ є особливо важливою ознакою, оскільки вона вказує не лише на тимчасове пригнічення рослинності, а на зміну режиму функціонування території.

Динаміка ОТСІ підтверджує каскадний характер гідроекологічної трансформації: осушення та втрата водорегулюючої функції Каховського водосховища призвела до припинення зрошення, посилення вод-

ного стресу, зниження хлорофільної активності та деградації рослинного покриву. У цьому сенсі ОТСІ виступає важливим індикатором стану рослинності та просторово-часовим маркером постіригаційної аридизації.

Трансформація термічних і гідротермічних умов вегетаційного періоду. Окрім порушення водного режиму, важливим чинником деградації зрошуваних агроландшафтів стала трансформація термічних і гідротермічних умов вегетаційного періоду. У сукупності ці чинники формують інтегральний теплово-посушливий стрес і визначають інтенсивність процесів аридизації.

У гідроекологічному аспекті термічні та гідротермічні показники мають особливе значення, оскільки після втрати іригації саме співвідношення між опадами, температурою та потенційним випаровуванням починає визначати реальну водозабезпеченість території. Якщо до 2023 року дефіцит атмосферного зволоження компенсувався поливною водою, то у 2024–2025 рр. агроландшафти функціонували переважно в межах природного кліматично обмеженого режиму.

До термічного блоку індикаторів включено середню місячну температуру повітря, її аномалію відносно кліматичної норми 1991–2020 рр., суму активних температур, кількість днів із максимальною температурою понад +35 °С, максимальні денні та середні нічні температури. Така система показників дозволяє комплексно оцінити інтенсивність теплового навантаження на рослинний покрив і потенційні прояви теплово-посушливого стресу в умовах порушення або повної втрати зрошення.

У 2021–2022 рр. (табл. 1) температурні умови липня характеризувалися значеннями, близькими до кліматичної норми. Середні місячні температури становили 24–26 °С, а їх аномалії коливалися в межах 0...+2 °С. За таких умов сума активних температур формувала достатнє теплозабезпечення агроценозів, кількість днів із $T_{\max} > 35^{\circ}\text{C}$ була незначною, а нічні температури переважно залишалися нижчими за +20 °С. За наявності зрошення тепловий стрес мав низький або низький–помірний характер і не спричиняв істотного зниження продуктивності.

Таблиця 1. Кліматичні показники та індикатори теплового стресу агроекосистем Херсонської області у липні 2021–2025 рр.

Рік	Середня t° , °С	Аномалія до норми, °С	Тип року	$\Sigma T > 10^{\circ}\text{C}$	Днів $> 35^{\circ}\text{C}$	T_{\max} , °С	Нічні t° , °С	Оцінка теплового стресу
2021	24–25	+0...+1	Нормальний	744–775	0–2	31–33	16–18	Низький
2022	25–26	+1...+2	Теплий	775–806	1–3	32–35	17–19	Низький–помірний
2023	25–26	+1...+2	Теплий	775–806	3–5	34–36	18–21	Помірний
2024	27–28	+3...+4	Дуже жаркий / екстремальний	837–868	8–12	39–42	21–24	Екстремальний
2025	26–27	+2...+3	Дуже жаркий	806–837	5–8	37–39	20–22	Високий

Примітка: кліматична норма липня $\approx +24,0^{\circ}\text{C}$

У 2023 році відбувся перехід до стійко теплішого режиму. Середня температура липня становила 25–26°C, аномалія – +1...+2°C, сума активних температур зросла до 775–806°C, а кількість екстремально спекотних днів збільшилася до 3–5. Водночас руйнування Каховської ГЕС і осушення водосховища призвели до порушення регіонального водного балансу, зниження рівня ґрунтових вод і втрати капілярного підживлення орного шару.

Особливість 2023 року полягає в тому, що температурні умови ще не були екстремальними порівняно з 2024 роком, однак саме в цей період система втратила головний механізм компенсації водного дефіциту. Тому навіть помірне підвищення температури та збільшення кількості спекотних днів почали мати значно сильніший вплив на стан рослинності, ніж у попередні роки за умов функціонування зрошення.

Починаючи з 2024 року, зафіксовано різку трансформацію термічного режиму. Середня температура липня підвищилася до 27–28°C, що на +3...+4°C перевищувало кліматичну норму. Сума активних температур зросла до 837–868°C, кількість днів із $T_{\max} > 35^\circ\text{C}$ збільшилася до 8–12, а максимальні денні температури сягали 39–42°C. Одночасно сформувався виражений ефект «теплих ночей», коли середні нічні температури підвищувалися до 21–24 °C.

Таке поєднання денного перегрівання та підвищених нічних температур має особливо негативне значення для водозалежних агроландшафтів. Високі денні температури підсилюють випаровування з поверхні ґрунту та транспіраційний попит рослин, тоді як теплі ночі збільшують дихальні втрати й знижують ефективність накопичення органічної речовини. За відсутності зрошення ці процеси швидко трансформуються у водний дефіцит, фізіологічне пригнічення рослин і втрату продукційної стійкості.

У 2025 році, попри певне зниження температурного фону порівняно з екстремальним 2024 роком, умови залишалися дуже жаркими. Середня температура липня становила 26–27°C, кількість днів із $T_{\max} > 35^\circ\text{C}$ досягла 5–8, що підтримувало високий рівень теплового навантаження. Таким чином, два послідовні роки після втрати водорегулюючої функції характеризувалися поєднанням високих температур і відсутності штучної компенсації водного дефіциту.

Посилення теплового навантаження супроводжувалося синхронним поглибленням атмосферної посухи (табл. 2). У 2021 році нестача опадів була відносно помірною, однак уже у 2022 році кількість опадів зменшилася до 15–25 мм, а гідротермічний коефіцієнт знизився до рівня, характерного для дуже посушливих умов.

У 2023 році кількість опадів становила 40–50 мм, що відповідало або дещо перевищувало кліматичну норму. Проте цей приріст атмосферного зволоження не компенсував підвищених обсягів випаровування й не

стримав втрат продуктивної ґрунтової вологи після осушення водосховища. Це свідчить про те, що після втрати іригації сам факт випадіння опадів у межах або дещо вище норми вже не гарантує стабілізації водного режиму, оскільки порушено підземне, капілярне та штучне водне підживлення території.

Критична гідрокліматична трансформація відбулася у 2024 році, коли опади скоротилися до 10–15 мм, гідротермічний коефіцієнт знизився до 0,12–0,18, а потенційне випаровування перевищило 210 мм. У 2025 році аридизація кліматичних умов зберігалася на екстремально високому рівні: сума опадів становила лише 14–15 мм, гідротермічний коефіцієнт – 0,17–0,19, а потенційне випаровування залишалось підвищеним.

Сукупність термічних і гідротермічних показників свідчить, що після втрати зрошення навіть помірні температурні аномалії стали здатними трансформуватися в критичний водний стрес. У 2024–2025 рр. поєднання високих температур, дефіциту атмосферних опадів і відсутності штучного водопостачання сформувало стійку атмосферно-ґрунтову посуху в критичний період розвитку сільськогосподарських культур.

З гідроекологічної точки зору це означає, що територія втратила здатність до буферизації кліматичних екстремумів. До осушення Каховського водосховища високий випаровувальний попит компенсувався поливною водою, тоді як після 2023 року дефіцит опадів, висока температура та підвищене ET_0 почали діяти синхронно, формуючи умови для прискореної постіригаційної аридизації.

Вплив втрати зрошення на продуктивність агроecosystem як індикатор гідроекологічної деградації. Кліматично зумовлена аридизація та втрата іригаційного водозабезпечення безпосередньо відобразилися на продуктивності агроландшафтів. Динаміка врожайності у 2021–2025 рр. демонструє поетапний перехід від високопродуктивного зрошуваного землеробства до екстремального богарного типу господарювання.

У межах гідроекологічної логіки врожайність розглядається як інтегральний наслідковий показник, що відображає стан водного режиму,

Таблиця 2. Гідротермічні умови та показники атмосферної посухи Херсонської області у липні 2021–2025 рр.

Рік	Опади, мм	Відхилення від норми, мм	ГТК	Клас зволоження	ET_0 , мм
2021	30–35	–5...–10	0,46–0,53	Посушливий	160–170
2022	15–25	–15...–25	0,27–0,45	Дуже посушливий	170–180
2023	40–50	0...+10	0,50–0,62	Близький до норми	155–165
2024	10–15	–25...–30	0,12–0,18	Екстремально посушливий	210–230
2025	14–15	–25...–26	0,17–0,19	Екстремально посушливий	195–210

Примітка: кліматична норма липня \approx 40 мм

доступність продуктивної вологи, інтенсивність теплового стресу, фізіологічний стан рослинності та здатність агроландшафтів підтримувати функціональну продуктивність. Тому зниження врожайності після 2023 року слід розглядати передусім як наслідок втрати водорегулюючої стабільності території. Водночас економічним проявом воєнного впливу стало скорочення площ посівів, обмеження доступу до земель, руйнування виробничої інфраструктури та зниження можливостей ведення повноцінного агровиробництва.

У 2021 році, за умов повноцінного функціонування зрошувального комплексу, врожайність зернових становила 4,5–5,0 т/га, соняшнику – 2,2–2,6 т/га. Такі показники відповідали стану стабільного водозабезпечення, коли дефіцит атмосферних опадів компенсувався поливною водою, а рослинний покрив мав можливість підтримувати активний фотосинтез у критичні фази розвитку.

У 2022 році під впливом воєнних чинників і часткового порушення водопостачання врожайність знизилася до 3,0–3,5 т/га для зернових і 1,5–1,8 т/га для соняшнику. Це зниження було пов'язане як із воєнними обмеженнями, так і з порушенням нормального функціонування агровиробничих і водогосподарських процесів. Водночас повної втрати водорегулюючої функції ще не відбулося, тому продуктивність знижувалася, але не досягала критичних рівнів постіригаційного періоду.

Після руйнування Каховської ГЕС у 2023 році агроландшафти втратили основне джерело поливної води, що зумовило падіння врожайності зернових до 2,0–2,5 т/га. Цей період відображає початок системної деградації продукційного потенціалу, коли рослинність уже не мала стабільного доступу до штучного водозабезпечення, а водний режим території почав визначатися переважно атмосферними опадами та залишковими запасами ґрунтової вологи.

У 2024 році – першому повному вегетаційному сезоні без зрошення – продуктивність агроландшафтів визначалася виключно природним зволоженням на тлі екстремальної спеки та дефіциту опадів у літній період. Водночас аномально вологий зимово-весняний період частково сформував стартові запаси ґрунтової вологи, що забезпечило врожайність зернових на рівні 2,4–2,6 т/га. Урожайність соняшнику становила лише 0,8–1,0 т/га. Незважаючи на відносно вищі показники зернових порівняно з 2023 роком, структура продуктивності свідчить про різку вразливість культур до відсутності поливу, особливо соняшнику, який у період формування врожаю зазнавав значного водного та теплового стресу.

Найбільш критична ситуація сформувалася у 2025 році, коли поєднання екстремальної атмосферної та ґрунтової посухи, високих температур, дефіциту опадів, весняних заморозків і повної відсутності поливної

води зумовило критичне зниження врожайності: зернових – до 1,2–1,4 т/га, соняшнику – до 0,2–0,7 т/га, що на 70–90% нижче довоєнного рівня.

У 2024 році на правобережжі Херсонської області зафіксовано втрату близько 40% площ посівів. У 2025 році ситуація істотно погіршилася внаслідок поєднання весняних заморозків, весняно-літньої посухи та воєнних ризиків, що спричинило втрату більше 60% посівів і критичне зниження продуктивності решти площ. У гідроекологічному аспекті це свідчить про втрату агроландшафтами здатності компенсувати кліматичні та воєнні стресори через водне регулювання.

Отримані результати засвідчують, що втрата зрошення в умовах степового клімату не є суто технічним або водогосподарським порушенням. Вона змінює сам режим функціонування агроєкосистем, позбавляючи їх головного механізму компенсації кліматичного дефіциту вологи.

Продукційні показники узгоджуються з результатами супутникового та гідротермічного аналізу і підтверджують системний характер трансформацій: після руйнування Каховської ГЕС та осушення Каховського водосховища зона зрошення Херсонської області перейшла до нового постіригаційного стану, у якому врожайність, хлорофільна активність і водний режим стали безпосередньо залежними від атмосферних опадів і температурних екстремумів. Це є ключовою ознакою гідроекологічної деградації території та формування постіригаційної аридизації.

Обговорення. Отримані результати свідчать, що руйнування Каховської ГЕС і подальше осушення Каховського водосховища стали тригером глибокої системної перебудови гідроекологічного функціонування зони зрошення Півдня України. У довоєнний період водосховище виконувало роль ключового регулятора регіонального водного балансу, формуючи антропогенно стабілізований гідрологічний режим, який забезпечував акумуляцію, перерозподіл і утримання прісної води в агроландшафтах. Такий режим створював ефект гідрологічного буфера, згладжував кліматичні коливання, знижував амплітуду водного дефіциту та підтримував стабільний рівень ґрунтового зволоження. Подібна роль іригаційних систем у підтриманні стабільності агроландшафтів степової зони України була показана у попередніх дослідженнях довготривалих змін зрошуваних територій та їхньої залежності від водорегулюючої інфраструктури [7, 11].

Втрата цього буфера внаслідок осушення водосховища спричинила різкий перехід від керованого водного режиму до кліматично детермінованого функціонування території. За змістом це відповідає режимному зсуву, коли система після втрати стабілізуючого фактора переходить до нового стану з іншою структурою взаємозв'язків і зворотних реакцій [19]. Така інтерпретація узгоджується з положеннями теорії резиліентності та критичних переходів в екосистемах, відповідно до яких складні природно-ан-

тропогенні системи можуть різко втрачати стійкість після досягнення порогових значень зовнішнього впливу [15-18]. У випадку Херсонської області таким пороговим чинником стала втрата водорегулюючого ядра, що забезпечувало функціональну зв'язаність між поверхневими водами, іригаційною мережею, ґрунтовим зволоженням і рослинним покривом.

Руйнування Каховської ГЕС спричинило комплекс наслідків, які виходять за межі локального водогосподарського порушення. Дослідження наслідків катастрофи вказують на масштабну трансформацію гідрологічного режиму регіону Нижнього Дніпра, зміну умов функціонування колишньої акваторії, деградацію водної інфраструктури та формування довготривалих екологічних ризиків для водних і прибережних екосистем [9, 12, 30, 32]. У контексті зони зрошення ці наслідки проявляються через припинення водоподачі до магістральних каналів, втрату можливості компенсації природного дефіциту вологи та посилення залежності агроландшафтів від атмосферних опадів.

Результати супутникового моніторингу за індексом ОТСІ підтверджують гідроекологічну трансформацію на рівні біофізичних характеристик рослинного покриву. Просторово-часова динаміка хлорофільної активності відображає послідовний перехід від високопродуктивних зрошуваних агроценозів до депресивного стану з низьким рівнем фотосинтетичної активності. Це узгоджується з методичною природою ОТСІ як індикатора вмісту хлорофілу, фізіологічного стану рослинності та інтенсивності фотосинтезу [23, 24].

Згладжування сезонних піків ОТСІ у 2024–2025 рр. свідчить про втрату здатності агроекосистем підтримувати характерну сезонну динаміку розвитку в умовах літнього водного дефіциту та підвищеного теплового навантаження. У межах зони зрошення Херсонської області цей процес має специфічну просторово-функціональну природу: деградація рослинного покриву зумовлена передусім припиненням іригаційного водозабезпечення, що призвело до різкого зниження доступності продуктивної вологи. Це відрізняє досліджувані агроландшафти від територій осушеного ложа водосховища, де домінують процеси вторинної сукцесії та формування піонерних рослинних угруповань на оголених алювіальних відкладах із підвищеним рівнем зволоження [12, 31].

Аналіз гідротермічних умов показує, що після втрати іригаційного водозабезпечення кліматичні фактори набули визначального значення. Помірні температурні аномалії в умовах відсутності поливу здатні трансформуватися у критичний водний стрес, оскільки територія втрачає механізм штучної компенсації дефіциту вологи. Найбільш виразно це проявилось у 2024–2025 рр., коли поєднання високих температур, дефіциту опадів і зростання потенційного випаровування сформувало стійку атмос-

ферно-грунтову посуху. Така динаміка відповідає загальним тенденціям посилення посушливості та кліматичних ризиків в Україні, зокрема в її степовій зоні [1, 8].

До 2023 року зрошення виконувало функцію кліматичної стабілізації агроландшафтів. Як показано в попередніх дослідженнях, іригація здатна зменшувати інтенсивність теплових екстремумів, змінювати локальний радіаційно-енергетичний баланс та знижувати температурне навантаження на підстильну поверхню [33, 34]. Втрата зрошення в Херсонській області означає припинення дії цього стабілізуючого механізму, що раніше забезпечував часткову компенсацію літнього водно-теплого стресу. У результаті функціонування агроландшафтів стало безпосередньо залежним від міжрічної варіабельності атмосферних умов, що проявляється у стійкій тенденції до зниження біопродуктивності та стійкості агроландшафтів.

Встановлено синергетичний ефект взаємодії воєнних і кліматичних чинників. Руйнування гідротехнічної інфраструктури, втрата контролю над водними ресурсами, мінування територій, обстріли, обмеження доступу до сільськогосподарських угідь і скорочення площ посівів поєдналися з кліматично зумовленим дефіцитом вологи та підвищеним температурним режимом. Така комбінація факторів формує мультиплікативний ефект впливу, за якого воєнні порушення водогосподарської системи підсилюють чутливість агроландшафтів до кліматичних екстремумів. Отримані результати узгоджуються з сучасними дослідженнями водної безпеки України в умовах війни, які засвідчують, що руйнування водної інфраструктури підвищує вразливість територій до кліматичних коливань і суттєво ускладнює перспективи післявоєнного відновлення [2-5, 30].

Зниження врожайності у 2023–2025 рр. виступає інтегральним індикатором гідроекологічного стану території. Врожайність акумулює сукупний вплив водного режиму, теплового навантаження, доступності продуктивної вологи та фізіологічного стану рослинності. Її динаміка відображає перехід агроєкосистем до постіригаційного режиму функціонування з підвищеною залежністю від атмосферних умов. Отримані результати узгоджуються з попередніми оцінками трансформації природно-кліматичних умов і зниження стабільності агроландшафтів у зоні зрошуваного землеробства України [7, 10].

З гідроекологічної точки зору встановлені зміни відповідають формуванню постіригаційної аридизації – специфічного типу деградаційного процесу, що поєднує кліматично зумовлене посилення посушливості з антропогенно спричиненою втратою водорегулюючих механізмів [19]. Цей процес характеризується високою швидкістю розвитку, просторовою неоднорідністю та чіткою просторовою прив'язкою до колишніх зон функціонування зрошувальних систем і впливу Каховського водосховища. На

відміну від поступової кліматичної аридизації, постіригаційна аридизація розгортається у прискореному режимі, що зумовлено раптовим припиненням водного підживлення агроландшафтів і різким порушенням сформованого водного балансу території.

Отримані результати мають практичне значення для формування підходів до післявоєнного відновлення Півдня України. Відновлення аграрного виробництва без відновлення або трансформації систем водозабезпечення є обмеженим і нестійким. Необхідним є формування адаптивних і компромісних підходів до управління водними ресурсами з урахуванням змін клімату, зростання варіабельності опадів, ризиків втрати централізованих джерел водопостачання та потреби у відновленні або трансформації водогосподарського ядра регіону. Такий підхід узгоджується із сучасними оцінками перспектив відновлення іригаційної системи України, у межах яких обґрунтовується доцільність переходу від відтворення попередньої моделі до її структурної трансформації з урахуванням нових безпекових, кліматичних і ресурсних обмежень [3, 5, 10, 27].

Руйнування Каховської ГЕС і осушення Каховського водосховища спричинили гідроекологічний режимний зсув у зоні зрошення Херсонської області. Його основними проявами є втрата водорегулюючої стабільності, посилення атмосферно-грунтової посухи, зниження хлорофільної активності рослинного покриву, критичне зниження врожайності та формування постіригаційного режиму функціонування агроландшафтів. Отримані результати дають підстави розглядати постіригаційну аридизацію як ключовий гідроекологічний наслідок руйнування Каховської ГЕС та осушення Каховського водосховища для зони зрошення Півдня України.

Висновки

1. Каховське водосховище та пов'язана з ним іригаційна інфраструктура забезпечували формування антропогенно регульованого гідрологічного режиму Півдня України, виконуючи важливу функцію гідрологічного буфера, який компенсував природний дефіцит вологи, підтримував продуктивне ґрунтове зволоження та стабілізував функціонування агроєкосистем.

2. Руйнування Каховської ГЕС і осушення водосховища спричинили системний гідрологічний колапс, що призвів до втрати іригаційного водозабезпечення, порушення балансу поверхневих і підземних вод та переходу зрошуваних агроландшафтів Херсонської області до кліматично детермінованого режиму функціонування.

3. Встановлено, що втрата водорегулюючої стабільності спричинила перебудову взаємозв'язків між ґрунтовим зволоженням, температурним режимом і станом рослинності, що проявляється у посиленні водного дефіциту, інтенсифікації теплового навантаження та зниженні біопродуктивності агроландшафтів.

4. За результатами супутникового аналізу індексу ОТСІ підтверджено суттєве зниження хлорофільної активності рослинного покриву у 2021–2025 рр. – від високих значень у довоєнний період до стабільно низьких у 2024–2025 рр., що супроводжується втратою сезонної варіабельності та формуванням депресивного стану біопродуктивності.

5. Виявлено, що після 2023 року трансформація гідротермічних умов характеризується підвищенням температурного режиму, зростанням частоти екстремально спекотних днів, дефіцитом атмосферних опадів і збільшенням потенційного випаровування, що у сукупності формує стійкий атмосферно-грунтовий водний дефіцит у критичні фази розвитку сільськогосподарських культур.

6. Доведено, що воєнно зумовлена трансформація має каскадний характер і реалізується через послідовність взаємопов'язаних процесів: «осушення водосховища → втрата зрошення → зниження ґрунтової вологи → підвищення температури поверхні → пригнічення фізіологічного стану рослинності → зниження біопродуктивності та деградація агровиробництва».

7. Врожайність підтверджує інтегральний характер гідроекологічних змін: у 2025 році зафіксовано зниження продуктивності зернових і соняшнику на 70–90% порівняно з довоєнним рівнем, що відображає втрату продукційної стійкості агроecosystem унаслідок дефіциту водних ресурсів і посилення теплового стресу.

8. Обґрунтовано, що встановлені процеси відповідають формуванню постіригаційної аридизації – специфічного типу деградації агроландшафтів, який виникає внаслідок поєднання кліматичних змін і втрати водорегулюючих механізмів та характеризується високою швидкістю розвитку і просторовою локалізацією в межах колишніх зон зрошення.

9. Отримані результати формують наукову основу для розроблення стратегій післявоєнного відновлення Півдня України, які мають передбачати відновлення або трансформацію водогосподарського ядра, впровадження адаптивних моделей управління водними ресурсами, екологічну реабілітацію деградованих земель і підвищення стійкості агроecosystem в умовах постіригаційної аридизації.

Acknowledgements: The authors gratefully acknowledge the support of the Documenting Ukraine program of the Institute for Human Sciences (IWM), Vienna.

Funding: This research was supported by the Documenting Ukraine program of the Institute for Human Sciences (IWM), Vienna.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

HYDROECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE DESTRUCTION OF THE KAKHOVKA HYDROPOWER PLANT AND THE DRAINAGE OF THE KAKHOVKA RESERVOIR: FROM WATER-REGULATORY STABILITY TO POST-IRRIGATION ARIDIZATION

*Pichura V.I. – Doctor of Agricultural Sciences, Professor
orcid.org/0000-0002-0358-1889
Kherson State Agrarian and Economic University
pichuravitalii@gmail.com*

The study assesses the hydroecological consequences of the destruction of the Kakhovka Hydropower Plant and the drainage of the Kakhovka Reservoir for the irrigation zone of Southern Ukraine, using Kherson region as a case study. It identifies the patterns of transition of agricultural landscapes from water-regulatory stability to post-irrigation aridization. The research is based on the integration of satellite, climatic, and agrotechnical data and focuses on analyzing changes in the water regime, hydrothermal conditions, and bioproductivity during 2021–2025. It is demonstrated that prior to 2023, the Kakhovka Reservoir functioned as a key hydrological buffer, ensuring water storage and redistribution, maintaining productive soil moisture, mitigating temperature extremes, and stabilizing agricultural production. The drainage of the reservoir triggered a systemic hydrological collapse, manifested in the cessation of water supply to main irrigation canals, disruption of the water balance, and a transition to climate-driven functioning of the territory. Satellite-based analysis using the OTCI index revealed a stepwise decline in chlorophyll activity and degradation of vegetation bioproductivity. The spatial pattern of these changes corresponds to areas affected by the loss of irrigation water supply and the former influence of the Kakhovka Reservoir, confirming their hydroecological origin. In 2024–2025, a persistent atmospheric–soil water deficit developed due to the combined effects of high temperatures, precipitation shortages, and increased evapotranspiration. Crop yield dynamics reflect the integrated impact of these transformations: in 2025, yields declined by 70–90% compared to the pre-war period. This indicates a loss of productive stability of agroecosystems and the establishment of a post-irrigation mode of their functioning. The study substantiates that the observed changes correspond to post-irrigation aridization, a specific type of hydroecological transformation associated with the loss of the water-regulating core of the system. The results have practical significance for developing strategies for post-war recovery of territories and for transforming water management systems under climate change conditions.

Key words: Kakhovka Reservoir, hydroecological transformation, irrigated agro-landscapes, post-irrigation aridization, water regime, hydrothermal conditions, OTCI, bioproductivity, satellite monitoring, Kherson region.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Stratichek N., Baysha K. Changes in climate and bioclimatic potential in the steppe zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 23(12), 2022. 189–202. <https://doi.org/10.12911/22998993/154844>
2. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., et al. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 2023. 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
3. Hapich H., Novitskyi R., Onopriienko D., Dent D., Roubik H. Water security consequences of the Russia–Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 21, 2024. 100167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>
4. Snizhko S., Didovets I., Bronstert A. Ukraine’s water security under pressure: Climate change and wartime. *Water Security*, 23, 2024. 100182. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100182>
5. Romashchenko M., Faybishenko B., Onopriienko D., Hapich H., Novitskyi R., Dent D., Saidak R., Usatyi S., Roubik H. Prospects for restoration of Ukraine’s irrigation system. *Water International*, 50(2), 2025. 104–120. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>
6. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Stratichek N. Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 50, 2021. 10–26. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
7. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy E., Stratichek N., Baysha K., Pichura I. Long-term changes in the stability of agricultural landscapes in the areas of irrigated agriculture of the Ukraine Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 2023. 188–198. <https://doi.org/10.12911/22998993/158553>
8. Polevoy A., Barsukova O., Husieva K., Zhygailo O., Volvach O., Kyrnasivska N., Tolmachova A., Zhygailo T., Danilova N., Kostiukievych T. The climate change impact on the development of droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 25(6), 2024. 194–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/187276>
9. Vyshnevskyi V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Y., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48(5), 2023. 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
10. Pichura V., Potravka L. Impact of war on natural and climatic transformation of territories in the irrigation zone of Ukraine. *Discover Applied Sciences*, 7, 2025. 783. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>
11. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Stroganov A., Dyudyaeva O. Spatial differentiation of regulatory monetary valuation of agricultural land in

- conditions of widespread irrigation of steppe soils. *Journal of Water and Land Development*, 48, 2021. 182–196. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136161>
12. Vyshnevskiy V.I., Shevchuk S.A. Natural processes in the area of the former Kakhovske Reservoir after the destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*, 17(2), 2024. 147–164. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0014>
 13. Solokha M., Pereira P., Symochko L., Vynokurova N., Demyanyuk O., Sementsova K., Inacio M., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*, 902, 2023. 166122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
 14. Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*, 964, 2025. 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
 15. Holling C.S. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1973. 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
 16. Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C., Walker B. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 2001. 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
 17. Folke C., Carpenter S.R., Walker B., Scheffer M., Chapin T., Rockström J. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 2010. 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
 18. Rocha J.C., Peterson G., Bodin Ö., Levin S. Cascading regime shifts within and across scales. *Science*, 362(6421), 2018. 1379–1383. <https://doi.org/10.1126/science.aat7850>
 19. Пічура В.І., Потравка Л.О. Воєнно зумовлена трансформація зрошуваних агроєкосистем півдня України: актуалізація проблеми та перспективи досліджень в умовах гідрологічного колапсу. *Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки»*, 1(113), 2026. 242–260. <https://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/ecolog/article/view/1973/1966>
 20. Albergel C., Rüdiger C., Pellarin T., Calvet J.-C., Fritz N., Froissard F., Suquia D., Petitpa A., Pignatelli B., Martin E. From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 2008. 1323–1337. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1323-2008>
 21. Dorigo W., Wagner W., Albergel C., et al. ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding. *Remote Sensing of Environment*, 203, 2017. 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>

22. Copernicus Land Monitoring Service. Daily Soil Water Index Europe V1.0.1 (1 km). European Environment Agency, 2024. https://land.copernicus.eu/en/products/soil-moisture?tab=soil_water_index
23. Dash J., Vuolo F., Lavender S. Algorithm theoretical basis document for OLCI Terrestrial Chlorophyll Index (OTCI). Sentinel-3 L2 products. University of Southampton, 2010.
24. Kovács D.D., Reyes-Muñoz P., Berger K., Mészáros V.I., Caballero G., Verrelst J. Multi-decadal temporal reconstruction of Sentinel-3 OLCI-based vegetation products. *Ecological Informatics*, 83, 2024. 102816. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102816>
25. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Bahinskyi O. Natural and climatic transformation of the Kakhovka Reservoir after the destruction of the dam. *Journal of Ecological Engineering*, 25(7), 2024. 82–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/187961>
26. Pichura V., Potravka L., Boiko P. Climatic and hydrological conditions for the formation of vegetation cover in the drained Kakhovka Reservoir's territory. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(4), 2025. 357–373. <https://doi.org/10.12912/27197050/202227>
27. Pichura V., Potravka L., Stoiko N., Dudych H. Scenarios for the functioning of the Kakhovka Reservoir territory. *Journal of Landscape Ecology*, 18(3), 2025. 118–154. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0023>
28. Lisovets O., Podorozhniy S., Tutova H., Molozhon K., Kunakh O., Zhukov O. Hemeroby reveals the dynamics of vegetation cover following the destruction of the Kakhovka Reservoir. *PeerJ*, 13, 2025. e19607. <https://doi.org/10.7717/peerj.19607>
29. Tutova H., Lisovets O., Kunakh O., Zhukov O. The future of the Kakhovka Reservoir after ecocide. *Studia Biologica*, 19(3), 2025. 171–194. <https://doi.org/10.30970/sbi.1903.838>
30. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387(6739), 2025. 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
31. Kuzemko A., Prylutskyi O., Kolomytsev G., Didukh Y., Moysiienko I., Borsukevych L., Chusova O., Splodytel A., Khodosovtsev O. Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*, 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4137799/v1>
32. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Hyrlya L. The impact of the russian armed aggression on the condition of the water area of the Dnipro-Buh estuary system. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(11), 2024. 58–82. <https://doi.org/10.12912/27197050/192154>
33. Kueppers L.M., Snyder M.A., Sloan L.C. Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 34, 2007. L03703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028679>

34. Thiery W., Visser A.J., Fischer E.M., Hauser M., Hirsch A.L., Lawrence D.M., Lejeune Q., Davin E.L., Seneviratne S.I. Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation. *Nature Communications*, 11, 2020. 290. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14075-4>

REFERENCES

1. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Strachuk N., Baysha K. (2022) Changes in climate and bioclimatic potential in the steppe zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 23(12), 189–202. <https://doi.org/10.12911/22998993/154844>
2. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., et al. (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>
3. Hapich H., Novitskyi R., Onopriienko 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>
4. Snizhko S., Didovets I., Bronstert A. (2024) Ukraine’s water security under pressure: Climate change and wartime. *Water Security*, 23, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100182>
5. Romashchenko M., Faybishenko B., Onopriienko D., Hapich H., Novitskyi R., Dent D., Saidak R., Usatyi S., Roubik H. (2025) Prospects for restoration of Ukraine’s irrigation system. *Water International*, 50(2), 104–120. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>
6. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Strachuk N. (2021) Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 50, 10–26. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
7. Pichura V., Potravka L., Domaratskiy E., Strachuk N., Baysha K., Pichura I. (2023) Long-term changes in the stability of agricultural landscapes in the areas of irrigated agriculture of the Ukraine Steppe Zone. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 188–198. <https://doi.org/10.12911/22998993/158553>
8. Polevoy A., Barsukova O., Husieva K., Zhygailo O., Volvach O., Kyrnasivska N., Tolmachova A., Zhygailo T., Danilova N., Kostyukievych T. (2024) The climate change impact on the development of droughts in Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 25(6), 194–205. <https://doi.org/10.12911/22998993/187276>
9. Vyshnevskyi 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>
10. Pichura V., Potravka L. (2025) Impact of war on natural and climatic transformation of territories in the irrigation zone of Ukraine. *Discover Applied Sciences*, 7, 783. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>

11. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Stroganov A., Dyudyaeva O. (2021) Spatial differentiation of regulatory monetary valuation of agricultural land in conditions of widespread irrigation of steppe soils. *Journal of Water and Land Development*, 48, 182–196. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136161>
12. Vyshnevskiy V.I., Shevchuk S.A. (2024) Natural processes in the area of the former Kakhovske Reservoir after the destruction of the Kakhovka HPP. *Journal of Landscape Ecology*, 17(2), 147–164. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2024-0014>
13. Solokha M., Pereira P., Symochko L., Vynokurova N., Demyanyuk O., Sementsova K., Inacio M., Barcelo D. (2023) Russian-Ukrainian war impacts on the environment: Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*, 902, 166122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
14. Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. (2025) War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
15. Holling C.S. (1973) Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
16. Scheffer M., Carpenter S., Foley J.A., Folke C., Walker B. (2001) Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591–596. <https://doi.org/10.1038/35098000>
17. Folke C., Carpenter S.R., Walker B., Scheffer M., Chapin T., Rockström J. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>
18. Rocha J.C., Peterson G., Bodin Ö., Levin S. (2018) Cascading regime shifts within and across scales. *Science*, 362(6421), 1379–1383. <https://doi.org/10.1126/science.aat7850>
19. Pichura V.I., Potravka L.O. (2026) Voinno zumovlenna transformatsiia zroshuvanykh ahroekosystem pivdnia Ukrainy: aktualizatsiia problemy ta perspektyvy doslidzhen v umovakh hidrolohichnoho kolapsu [War-induced transformation of irrigated agroecosystems of southern Ukraine: actualisation of the problem and research prospects in the context of hydrological collapse]. *Visnyk NUVHP. Seriiia «Silskohospodarski nauky»* [Bulletin of NUVHP. Series "Agricultural Sciences"]. vol. 1(113), pp. 242–260. [in Ukrainian]
20. Albergel C., Rüdiger C., Pellarin T., Calvet J.-C., Fritz N., Froissard F., Suquia D., Petitpa A., Piguët B., Martin E. (2008) From near-surface to root-

- zone soil moisture using an exponential filter. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1323–1337. <https://doi.org/10.5194/hess-12-1323-2008>
21. Dorigo W., Wagner W., Albergel C., et al. (2017) ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>
 22. Copernicus Land Monitoring Service (2024) Daily Soil Water Index Europe V1.0.1 (1 km). European Environment Agency. https://land.copernicus.eu/en/products/soil-moisture?tab=soil_water_index
 23. Dash J., Vuolo F., Lavender S. (2010) Algorithm theoretical basis document for OLCI Terrestrial Chlorophyll Index (OTCI). Sentinel-3 L2 products and algorithm definition. University of Southampton.
 24. Kovács D.D., Reyes-Muñoz P., Berger K., Mészáros V.I., Caballero G., Verrelst J. (2024) Multi-decadal temporal reconstruction of Sentinel-3 OLCI-based vegetation products. *Ecological Informatics*, 83, 102816. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102816>
 25. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Bahinskyi O. (2024) Natural and climatic transformation of the Kakhovka Reservoir after the destruction of the dam. *Journal of Ecological Engineering*, 25(7), 82–104. <https://doi.org/10.12911/22998993/187961>
 26. Pichura V., Potravka L., Boiko P. (2025) Climatic and hydrological conditions for the formation of vegetation cover in the drained Kakhovka Reservoir's territory. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(4), 357–373. <https://doi.org/10.12912/27197050/202227>
 27. Pichura V., Potravka L., Stoiko N., Dudych H. (2025) Scenarios for the functioning of the Kakhovka Reservoir territory. *Journal of Landscape Ecology*, 18(3), 118–154. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0023>
 28. Lisovets O., Podorozhniy S., Tutova H., Molozhon K., Kunakh O., Zhukov O. (2025) Hemeroby reveals the dynamics of vegetation cover following the destruction of the Kakhovka Reservoir. *PeerJ*, 13, e19607. <https://doi.org/10.7717/peerj.19607>
 29. Tutova H., Lisovets O., Kunakh O., Zhukov O. (2025) The future of the Kakhovka Reservoir after ecocide. *Studia Biologica*, 19(3), 171–194. <https://doi.org/10.30970/sbi.1903.838>
 30. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N., et al. (2025) Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, 387(6739), 1181–1186. <https://doi.org/10.1126/science.adn8655>
 31. Kuzemko A., Prylutskyi O., Kolomytsev G., Didukh Y., Moysiyenko I., Borsukevych L., Chusova O., Splodytel A., Khodosovtsev O. (2024) Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4137799/v1>

32. Pichura V., Potravka L., Dudiak N., Hyrlya L. (2024) The impact of the russian armed aggression on the condition of the water area of the Dniπρο-Buh estuary system. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(11), 58–82. <https://doi.org/10.12912/27197050/192154>
33. Kueppers L.M., Snyder M.A., Sloan L.C. (2007) Irrigation cooling effect: Regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 34, L03703. <https://doi.org/10.1029/2006GL028679>
34. Thiery W., Visser A.J., Fischer E.M., Hauser M., Hirsch A.L., Lawrence D.M., Lejeune Q., Davin E.L., Seneviratne S.I. (2020) Warming of hot extremes alleviated by expanding irrigation. *Nature Communications*, 11, 290. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14075-4>

Дата першого надходження статті до видання: 28.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026