

## ВОЄННО ЗУМОВЛЕНА ДЕГРАДАЦІЯ ЗРОШУВАНИХ ЕКОСИСТЕМ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ ТА ДИСТАНЦІЙНИЙ АНАЛІЗ

Пічура В.І., Потравка Л.О.

Херсонський державний аграрно-економічний університет  
вул. Стрітенська, 23, 73006, м. Херсон  
[pichuravitalii@gmail.com](mailto:pichuravitalii@gmail.com)

Представлено результати комплексної оцінки воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем Херсонської області, що сформувалася внаслідок руйнування гідротехнічної інфраструктури, окупації територій та знищення Каховського водосховища як ключового джерела водозабезпечення Півдня України. Метою дослідження було встановлення просторово-часових закономірностей трансформації агроландшафтів у довоєнний і воєнний періоди на основі інтеграції геоінформаційного моделювання та даних дистанційного зондування Землі. Інформаційною базою дослідження стали супутникові знімки Sentinel-2, температурні продукти Sentinel-3 SLSTR, цифрова модель рельєфу SRTM, матеріали гідрогеолого-меліоративних досліджень і відкриті бази Copernicus. Аналіз виконано для липня 2021–2024 рр., що дозволило зіставити період активного функціонування зрошення, початок окупації, етап руйнування Каховської ГЕС і період повної відсутності водоподачі. Для оцінки екологічного стану території використано спектральні індекси NDVI, LAI, BSI, NDMI, DELC, NDMI<sub>STRESS</sub> та показники температури підстильної поверхні (LST). Результати супутникового моніторингу засвідчили різке скорочення площ активної вегетації, деградацію рослинного покриву та розширення територій оголених ґрунтів. Встановлено критичне зростання водного стресу й евапотранспірації, підвищення температури підстильної поверхні, осушення водних об'єктів і зниження рівнів ґрунтових вод. Ідентифіковано осередки вторинного засолення, дефляційної деградації та масштабного пожежного ураження агроландшафтів і степових біотопів. Доведено, що припинення функціонування зрошувальних систем стало тригером каскадних деградаційних процесів, які охопили аграрні і природні екосистеми, включно з територіями природно-заповідного фонду. Встановлені тенденції свідчать про формування передумов посилення аридизації та набуття ознак опустелювання територій колишнього зрошення. Використаний геоінформаційно-дистанційний підхід є ефективним інструментом моніторингу екологічного стану важкодоступних і окупованих територій та є важливим для оцінки екологічних збитків, планування повоєнного відновлення зрошення і розроблення адаптаційних стратегій природокористування. *Ключові слова:* зрошення, війна, клімат, водний стрес, деградація, дистанційне зондування Землі, геоінформаційне моделювання, Каховське водосховище.

**War-induced degradation of irrigated ecosystems of the Kherson region: geoinformation and remote sensing analysis.**  
**Pichura V., Potravka L.**

The paper presents the results of a comprehensive assessment of war-induced degradation of irrigated ecosystems in the Kherson region, which developed as a consequence of the destruction of hydraulic infrastructure, occupation of territories, and the demolition of the Kakhovka Reservoir as the key water supply source for Southern Ukraine. The aim of the study was to identify spatial and temporal patterns of agrolandscape transformation during pre-war and wartime periods based on the integration of geoinformation modeling and Earth remote sensing data. The information base of the research included Sentinel-2 satellite imagery, Sentinel-3 SLSTR land surface temperature products, SRTM digital elevation model, hydrogeological and land reclamation survey materials, and Copernicus open databases. The analysis covered July 2021–2024, enabling comparison of the period of active irrigation functioning, the onset of occupation, the stage of the Kakhovka HPP destruction, and the period of complete cessation of water supply. To assess the ecological condition of the territory, spectral indices NDVI, LAI, BSI, NDMI, DELC, and NDMI<sub>STRESS</sub>, as well as land surface temperature (LST), were applied. Satellite monitoring results revealed a sharp reduction in active vegetation areas, degradation of plant cover, and expansion of bare soil territories. A critical increase in water stress and evapotranspiration, rising land surface temperatures, drying of water bodies, and lowering groundwater levels were identified. Foci of secondary salinization, deflation degradation, and large-scale fire damage of agrolandscapes and steppe biotopes were detected. It has been proven that the termination of irrigation system functioning became a trigger for cascading degradation processes affecting both agricultural and natural ecosystems, including protected areas. The identified trends indicate the formation of preconditions for intensified aridization and the emergence of desertification features within formerly irrigated territories. The applied geoinformation and remote sensing approach has proven to be an effective tool for environmental monitoring of hard-to-reach and occupied territories and is important for assessing environmental damage, planning post-war irrigation restoration, and developing adaptive nature management strategies. *Key words:* irrigation, war, climate, water stress, land degradation, Earth remote sensing, geoinformation modeling, Kakhovka Reservoir.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах глобальних кліматичних змін і зростання техногенного навантаження особливої гостроти набуває деградація водоресурсного потенціалу територій, що супроводжується зниженням природного вологозабезпечення, порушенням гідрологічного балансу та трансформацією екосистем [1]. Для степової зони України водний дефіцит є ключовим ліміту-



ючим чинником функціонування агроландшафтів, оскільки природна кількість атмосферних опадів не покриває біологічних потреб рослинності [2]. За таких умов зрошувальні меліорації виступають базовим інструментом стабілізації аграрного виробництва, підтримання біопродуктивності ґрунтів і формування сприятливих мікрокліматичних умов [3, 4].

Ситуація набула критичного характеру внаслідок повномасштабної військової російської агресії проти України, що призвела до окупації понад 80% площ зрошуваних земель [5], руйнування гідротехнічної інфраструктури та знищення Каховського водосховища – ключового джерела водозабезпечення Півдня України. Це спричинило системну екологічну кризу, пов'язану з осушенням територій, деградацією рослинного покриву, активізацією засолення ґрунтів і порушенням функціонування природних та аграрних екосистем [3, 5, 6-9].

**Актуальність дослідження.** Актуальність зумовлена необхідністю оцінки масштабів і встановлення просторових закономірностей воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем, визначення екологічних наслідків втрати зрошення та формування наукової основи для повоєнного відновлення територій. Особливої ваги набуває моніторинг природних ресурсів в зоні активних бойових дій та на тимчасово окупованих територіях, де проведення традиційних польових досліджень є обмеженим або неможливим. У таких умовах пріоритетного значення набувають методи дистанційного зондування Землі та геоінформаційного аналізу, які забезпечують оперативну оцінку трансформації ландшафтів, водного стресу, стану рослинності й температурного режиму підстильної поверхні.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Дослідження виконано у межах наукових напрямів, пов'язаних із оцінкою екологічного стану агроландшафтів, моніторингом деградаційних процесів ґрунтового покриву та аналізом впливу кліматичних змін і воєнних дій на природно-ресурсний потенціал територій. Отримані результати орієнтовані на розв'язання науково-прикладних завдань, зокрема: оцінювання екологічних збитків, завданих зрошуваним екосистемам; визначення просторових масштабів критичного водного стресу; обґрунтування заходів повоєнного відновлення зрошення; розроблення адаптаційних стратегій землекористування в умовах кліматичних ризиків і воєнних наслідків; інформаційне забезпечення планування відновлення деокупованих територій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика водного дефіциту, деградації зрошуваних земель і трансформації агроландшафтів в умовах кліматичних змін широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних учених [1, 3, 5,

6-11]. Значна частина досліджень присвячена оцінці водного стресу та його впливу на функціонування екосистем [5], урожайність сільськогосподарських культур [12, 13] і соціально-економічний розвиток територій [14]. Окремий науковий напрям сформували роботи, що обґрунтовують застосування дистанційного зондування Землі для моніторингу стану довкілля [15-19]. До повної масштабної війни особлива увага зосереджувалася на функціонуванні зрошувальних систем Півдня України, їх впливі на ґрунтоутворні процеси, біопродуктивність земель і регіональний мікроклімат. Водночас новітній науковий дискурс посилюється дослідженнями екологічних наслідків війни [3, 5, 6-9, 11, 14] – руйнування гідротехнічних споруд, порушення водного режиму та деградації природних ресурсів.

**Невирішені раніше частини загальної проблеми.** Попри значну кількість наукових праць, присвячених комплексній оцінці воєнного впливу на довкілля, питання деградації зрошуваних екосистем Півдня України залишаються недостатньо опрацьованими. Найменш дослідженими є просторово-часові закономірності трансформації агроландшафтів після руйнування Каховського водосховища, оцінка водного стресу на тимчасово окупованих територіях, зміни температури підстильної поверхні в умовах припинення зрошення, а також масштаби та локалізація процесів вторинного засолення, дефляційної деградації й пожежної небезпеки, вплив втрати зрошення на природні екосистеми та об'єкти природно-заповідного фонду. Відсутність фізичного доступу до окупованих територій істотно обмежує можливості отримання достовірних польових даних і зумовлює необхідність активного застосування супутникових методів дослідження.

**Новизна дослідження.** Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексній оцінці воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем Херсонської області на основі інтеграції геоінформаційного моделювання та даних дистанційного зондування Землі. У межах дослідження здійснено просторово-часовий аналіз трансформації зони зрошення у довоєнний і воєнний періоди (2021–2024 рр.); встановлено закономірності змін рослинного покриву, евапотранспірації та водного стресу після втрати зрошення; виявлено осередки вторинного засолення та дефляційної деградації ґрунтів; визначено тенденції підвищення температури підстильної поверхні в умовах осушення територій; оцінено вплив деградаційних процесів на природні екосистеми, включно з об'єктами природно-заповідного фонду. Отримані результати формують науково-інформаційну основу для екологічної оцінки збитків і планування відновлення зрошуваного землеробства Півдня України.

**Методологічне та загальнонаукове значення дослідження.** Методологічне значення роботи полягає у використанні комплексного підходу до оцінки воєнно зумовленої деградації зрошуваних екосистем на основі поєднання геоінформаційного моделювання, даних дистанційного зондування Землі та індикаторів природно-кліматичної трансформації територій. Запропонована методика інтегрує спектральні індекси стану рослинності, вологості та деградації ґрунтів із температурними показниками підстильної поверхні, що забезпечує багатфакторний просторово-часовий аналіз екологічного стану агроландшафтів. На відміну від традиційних польових підходів, методика є важливою для моніторингу важкодоступних і тимчасово окупованих територій, де наземні обстеження є обмеженими або неможливими, і тим самим розширює інструментарій сучасної екології, ландшафтознавства та природокористування в умовах воєнних дій.

Загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні уявлень про закономірності функціонування зрошуваних екосистем у зоні ризикового землеробства та їх трансформацію під впливом кліматичних і воєнно-техногенних чинників. Отримані результати дозволили простежити причинно-наслідкові зв'язки між втратою гідротехнічного водозабезпечення, змінами водного балансу й температурного режиму, деградацією рослинного покриву та розвитком деградаційних процесів ґрунтів. Запропонований підхід забезпечує аналітичну основу для екологічного моніторингу зрошуваних територій, оцінювання наслідків руйнування гідротехнічної інфраструктури, моделювання водного стресу агроландшафтів, аналізу процесів аридизації та проявів опустелювання, а також для обґрунтування адаптаційних повоєнної стратегій землекористування. Універсальність підходу ґрунтується у доцільності його застосування для інших територій, що зазнали воєнних дій, гідрологічних катастроф та втрати систем штучного зволоження.

**Джерела даних і матеріали дослідження.** Інформаційною основою дослідження стали супутникові знімки Sentinel-2 L2A (просторова роздільна здатність 10 м), температурні продукти Sentinel-3 SLSTR L1B, цифрова модель рельєфу SRTM (30 м), матеріали гідрогеолого-меліоративних досліджень, дані про мережу зрошувальних систем, а також відкриті ресурси Copernicus Browser. Аналіз виконано для липня 2021–2024 рр., що забезпечило порівняльність за однаковим фенологічним періодом і дозволило зіставити довоєнний період активного зрошення (2021), період початку окупації (2022), період руйнування Каховської ГЕС (2023) та період відсутності зрошення (2024). Для обробки добиралися безхмарні супутникові знімки.

**Етапи дослідження.** Дослідження включали вісім послідовних етапів: 1 – аналіз трансформації рослинного покриву за індексами BSI, LAI, NDVI, DELC, NDMI<sub>STRESS</sub>; 2 – оцінювання змін температури підстильної поверхні (LST); 3 – аналіз стану водних об'єктів; 4 – виявлення проявів засолення та осолонцювання ґрунтів; 5 – ідентифікація пожежної небезпеки; 6 – аналіз проявів вітрової ерозії; 7 – оцінка впливу деградаційних процесів на природно-заповідні території; 8 – візуалізація природно-кліматичної трансформації за сценаріями супутникових зображень.

**Індекси дистанційного зондування.** Для оцінки стану рослинності, вологості та деградаційних процесів використано спектральні індекси Sentinel-2 [5, 15-19]: BSI (Bare Soil Index) – для ідентифікації оголених ґрунтів; LAI (Leaf Area Index) – для оцінювання щільності листової поверхні та біомаси; NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – для визначення стану та активності вегетації; DELC (Detection of Evapotranspiration Levels Composite) – для оцінювання евапотранспірації та випаровування; NDMI<sub>STRESS</sub> (Normalized Difference Moisture Index for Crop Moisture Stress) – для характеристики водного стресу та зрошуваності агроценозів; NDMI (Normalized Difference Moisture Index) – для оцінювання вологості рослинного покриву.

**Температура підстильної поверхні.** Для аналізу теплового режиму використано дані приладу SLSTR супутника Sentinel-3. Канал F2 (10,854 мкм) у тепловому інфрачервоному діапазоні (просторова роздільна здатність 270 м) застосовано для визначення просторово-часових змін Land Surface Temperature (LST). Порівняльний аналіз проведено для липня як періоду пікових температур і максимального водного стресу, що забезпечило коректність зіставлення довоєнних і воєнних умов функціонування зрошуваних екосистем.

**Характеристика території дослідження.** Об'єктом дослідження є зрошувані екосистеми Херсонської області, розташовані на півдні України в межах Причорноморської низовини (рис. 1).

Регіон належить до степової природно-кліматичної зони та характеризується високими температурами повітря, низькою кількістю атмосферних опадів і значним дефіцитом природного вологозабезпечення. Загальна площа області становить 2 846,1 тис. га, з яких 1 971,0 тис. га (69,3%) – землі сільськогосподарського призначення, у тому числі рілля – 1 777,6 тис. га. Ґрунтовий покрив представлений переважно південними чорноземами та темно-каштановими ґрунтами. Територія має високий рівень розораності та значну залежність агровиробництва від штучного зволоження. Проектна площа зрошуваних земель області становила 426,4 тис. га, а фактичне використання

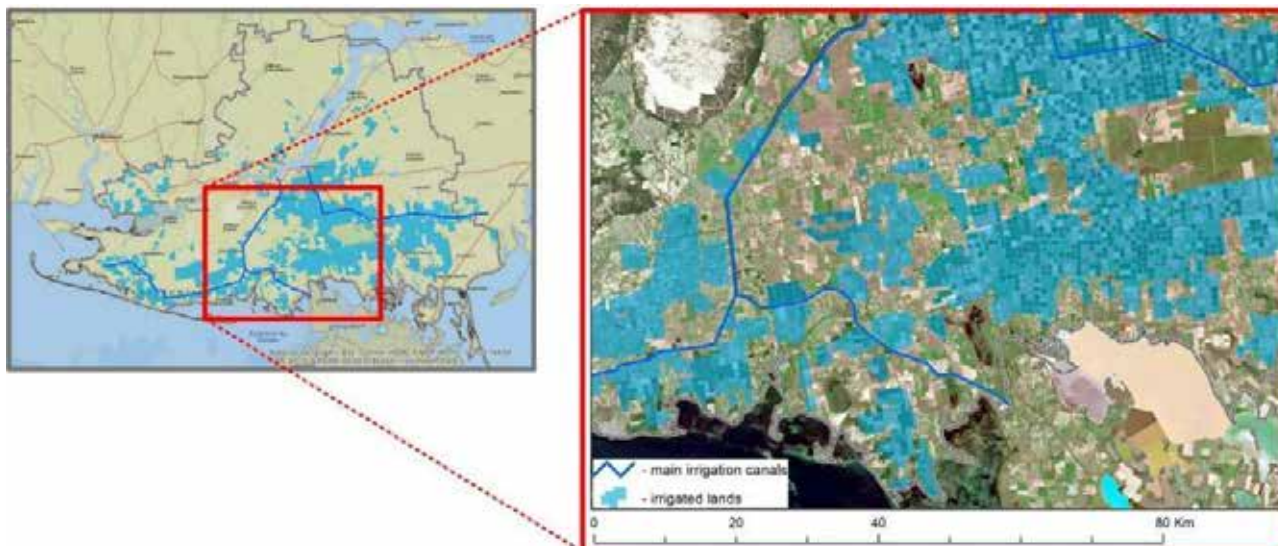


Рис. 1. Розміщення зрошуваних земель і магістральних зрошувальних каналів у межах лівобережжя Херсонської області (червоним кольором виділена територія дослідження)

у 2003–2021 рр. – 250–315 тис. га. Основні зрошувальні системи зосереджені на лівобережжі Дніпра (Каховська, Каланчацька, Краснознам'янська), джерелом водопостачання яких було Каховське водосховище; частина Інгулецької зрошувальної системи функціонувала на правобережжі області. Клімат регіону посушливий: середньорічна кількість опадів становить 300–500 мм, причому у кожен другий рік їх кількість є критично низькою (<400 мм). Потенційна евапотранспірація у два рази перевищує надходження атмосферних опадів, що обумовлює природну аридизацію території.

**Викладення основного матеріалу.** До початку повномасштабних воєнних дій зрошуване землеробство було визначальним чинником функціонування аграрного сектору Херсонської області та важливою складовою продовольчої безпеки Півдня України. У довоєнний період фактична площа зрошення в Україні перевищувала 550 тис. га, а основна частка зрошуваних земель зосереджувалася у степовій зоні. Води Каховського водосховища забезпечували зрошення близько 77% зрошуваних земель держави. У межах Херсонської області станом на 2021 рік зрошувальні системи забезпечували полив близько 315 тис. га сільськогосподарських угідь, що сприяло підвищенню урожайності зернових культур до 3,8–5,4 т/га порівняно з 2,4 т/га на незрошуваних землях, а також формувало сприятливі мікрокліматичні умови територій зони зрошення.

Руйнування гідротехнічної інфраструктури, окупація лівобережжя Херсонської області та знищення Каховського водосховища призвели до фактичного припинення функціонування зрошувальних систем і стали тригером масштабної природно-антропоген-

ної трансформації агроландшафтів. Втрата штучного зволоження спричинила різке погіршення стану рослинного покриву, що узгоджується з результатами дешифрування супутникових знімків Sentinel-2 за індексами BSI, LAI та NDVI (рис. 2). У липні 2021 року, за умов активного зрошення, територія характеризувалася високими значеннями вегетаційних індексів, що відповідало щільному рослинному покриву та інтенсивній вегетації агроценозів. У 2022 році, після початку окупації, зафіксовано скорочення площ оброблюваних земель приблизно на 60%. У 2023 році, після руйнування дамби Каховської ГЕС, площі сільськогосподарського виробництва зменшилися на 80% порівняно з довоєнним періодом. Станом на липень 2024 року лише близько 7% сільськогосподарських земель використовувалися у виробництві, тоді як переважна частина територій характеризувалася оголеними ґрунтами, сухостоєм або деградованою степовою рослинністю; частка площ із розвиненим рослинним покривом не перевищувала 20%.

Деградація рослинності безпосередньо відобразилася на водному балансі та процесах евапотранспірації. Аналіз індексів DELC і  $NDMI_{STRESS}$  засвідчив різке посилення водного стресу у зоні припиненого зрошення (рис. 3).

Якщо у 2021 році близько 80% площ характеризувалися низьким або помірним рівнем випаровування, що відповідало відносно сприятливим умовам вегетації, то у 2024 році понад 80% земель сільськогосподарського призначення мали високі значення евапотранспірації, з яких близько 20% перебували у стані критичного дефіциту ґрунтової вологи. Осередки відносного збереження зво-

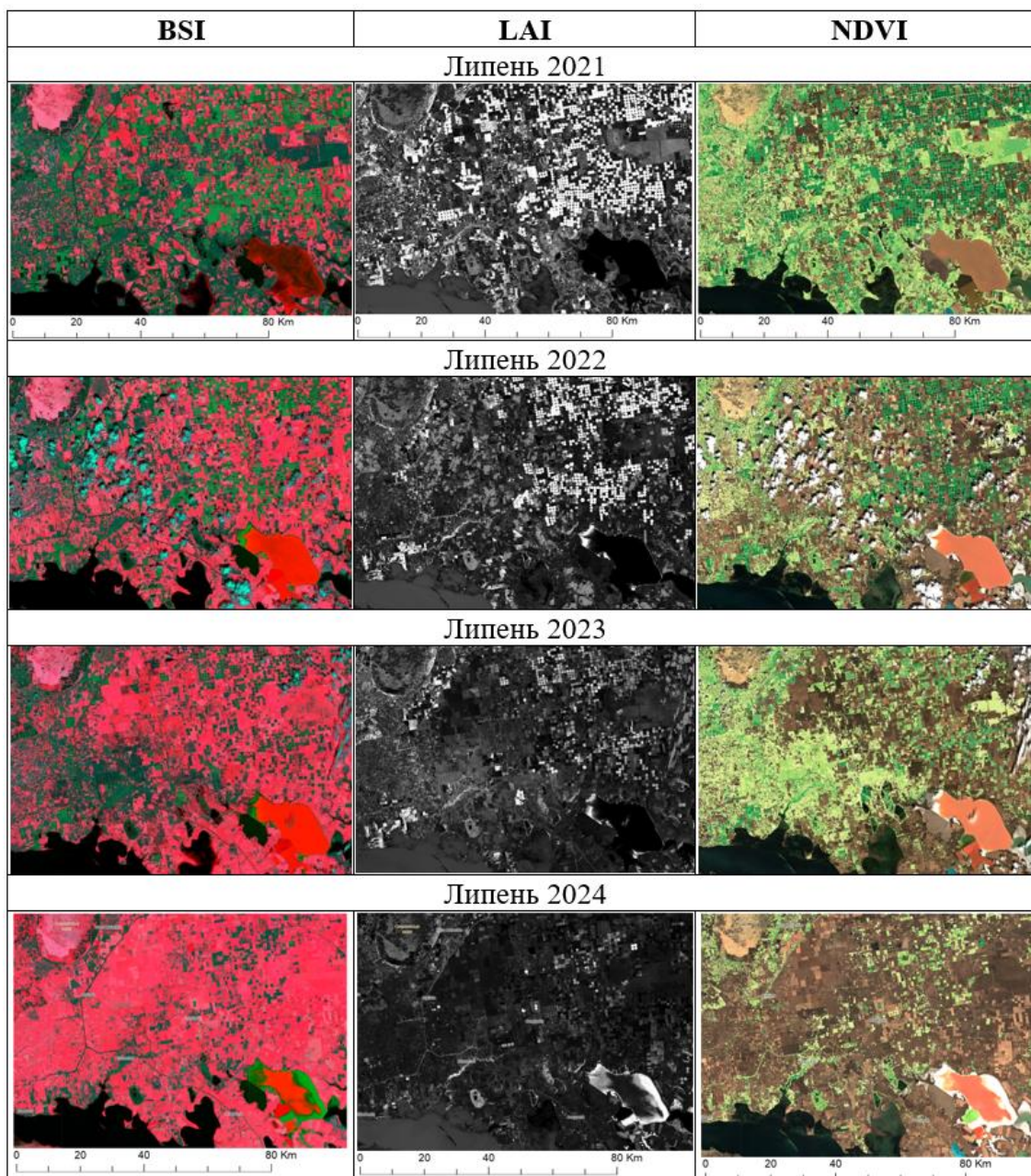


Рис. 2. Просторово-часова динаміка стану рослинного покриву та оголеності ґрунтів у зоні зрошення лівобережжя Херсонської області за індексами BSI, LAI та NDVI (липень 2021–2024 рр.), дані Sentinel 2 L2A

**Спектральні індекси:** BSI – індекс оголеності ґрунтів, де червоні відтінки відповідають оголеним поверхням і сухостою, тоді як зелені – ділянкам, вкритим рослинністю активною вегетацією. LAI – індекс щільності листової поверхні: білі тони відображають зрошувані агроценози з високою біомасою, сірі – природну рослинність і посіви на незрошуваних землях. NDVI – індекс стану вегетації, де відтінки зеленого характеризують рослинність різної інтенсивності розвитку, а коричневі – оголені ґрунти та сухостій.

ложення фіксувалися локально – у прибережних смугах, вздовж зрошувальних каналів, у зонах близького залягання ґрунтових вод і на ділянках із лісосмугами.

Посилення водного стресу супроводжувалося суттєвими змінами теплового режиму підстильної поверхні. Аналіз даних Sentinel-3 SLSTR виявив негативні просторово-часові тенденції підвищення

Land Surface Temperature (LST) у межах колишньої зони зрошення (рис. 4).

Упродовж 2021–2024 рр. встановлено середній тренд зростання температури поверхні на +9,0 °C. Максимальні значення LST підвищилися з 39 °C у 2021 році до 56 °C у 2024 році, а локально температура поверхні ґрунту досягала 67 °C. Такі показники свідчать про формування екстремального

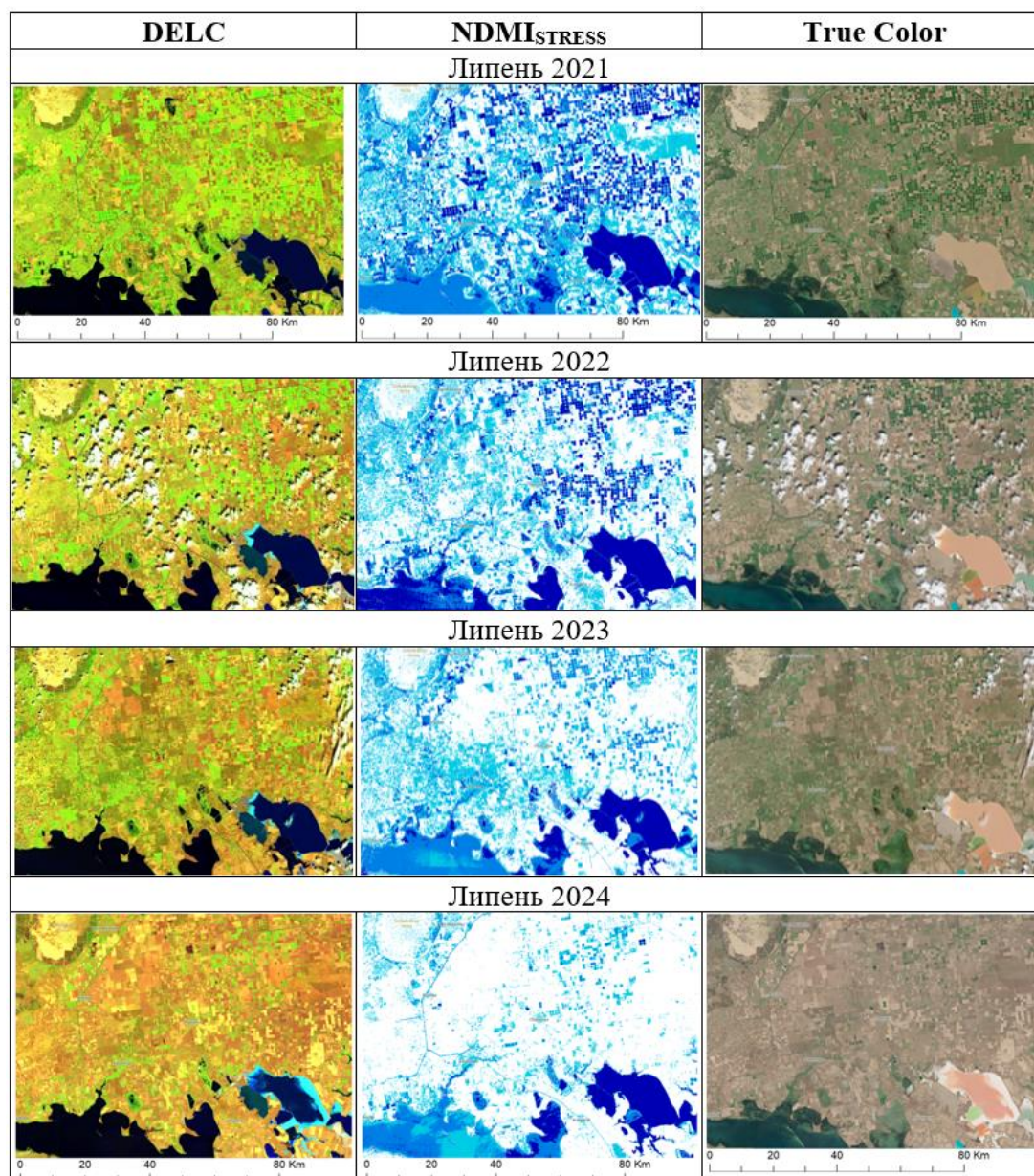


Рис. 3. Просторово-часова динаміка водного стресу та евапотранспірації у зоні зрошення лівобережжя Херсонської області за індексами DELС і NDMISTRESS (липень 2021–2024 рр.), дані Sentinel 2 L2A

**Спектральні індекси:** DELС – інтенсивність евапотранспірації (зелені відтінки – зволожені ділянки, жовто-коричневі – посушливі). NDMI<sub>STRESS</sub> – рівень водного стресу (білий колір – високий, світло-блакитні – низький, темно-сині – відсутній стрес). True Color – природне кольорове відображення поверхні. Простежується поступове зростання водного стресу, посилення випаровування та деградація угідь в зоні зрошення у воєнний період, особливо після припинення функціонування систем зрошення.

теплого навантаження, що посилює дисбаланс водного режиму, прискорює дегідратацію ґрунту та пригнічує розвиток рослинності.

Паралельно відбулися суттєві зміни у водному фонді території. Втрата Каховського водосховища спричинила осушення каналів, зниження водності малих річок і деградацію водойм. За результатами дешифрування супутникових знімків встановлено обміління річки Каланчак та погіршення якості води до рівня, непридатного для водоспоживання.

Осушення водних об'єктів супроводжувалося зниженням рівня ґрунтових вод, що активізувало процеси вторинного засолення ґрунтів. Унаслідок випаровування мінералізованих ґрунтових вод відбувалося переміщення солей у верхні горизонти ґрунтового профілю; на супутникових знімках засолені землі проявлялися світло-сірими та білими контурами (рис. 6). Зафіксовано розширення площ вторинного засолення й осолонцювання, а площі окремих осередків виходу солей на поверхню коли-

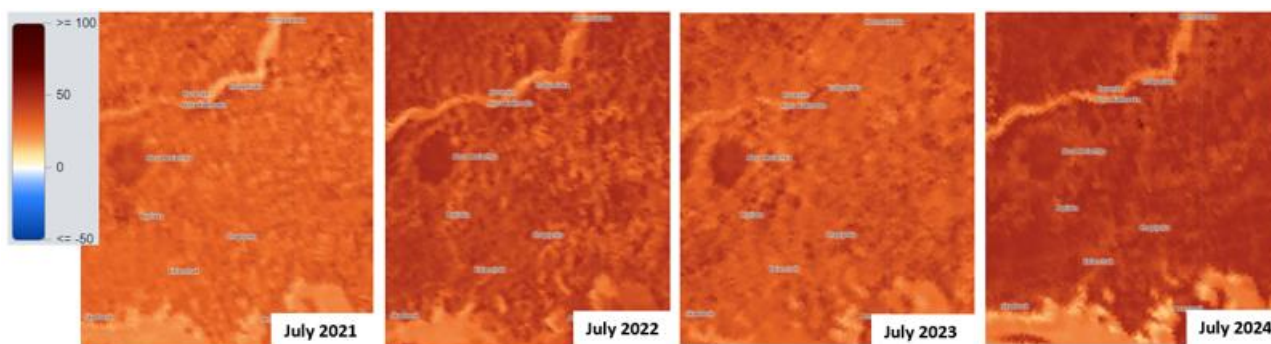


Рис. 4. Динаміка температури підстильної поверхні (LST) у зоні зрошення лівобережжя Херсонської області за даними супутникового моніторингу (2021–2024 рр.)

**Примітка:** шкала кольорів відображає градації температури підстильної поверхні: від нижчих значень (світлі тони) до підвищених і екстремальних (темно-червоні). Встановлено стійку тенденцію підвищення температурного фону та розширення осередків екстремального теплового навантаження у межах колишньої зони зрошення, що корелює з припиненням водоподачі та деградацією рослинного покриву.



Рис. 5. Осушення водних об'єктів на тимчасово окупованій території лівобережжя Херсонської області, дані Sentinel 2 L2A

**Примітка:** Простежується істотне зниження рівня води, оголення донних відкладів і деградація прибережних ландшафтів унаслідок руйнування гідротехнічної інфраструктури та припинення водоподачі.

валися від 1 до понад 400 га. Такі процеси супроводжуються погіршенням агрохімічних властивостей ґрунтів і втратою їх продуктивності.

Осушення територій, оголення ґрунтового покриву та аномально високі температури зумовили різке зростання пожежної небезпеки. У літньо-осін-

ній період 2024 року зафіксовано масштабні пожежі агроландшафтів, степових біотопів і лісосмуг на площі понад 200 тис. га (рис. 7). Водночас відсутність рослинного покриву та пориви вітру швидкістю 20–30 м/с активізували процеси вітрової ерозії; зафіксовані втрати ґрунту досягали 600 т/га (рис. 8),



Рис. 6. Осередки засолення та осолонцювання ґрунтів на лівобережжі Херсонської області (2024 р.), дані Sentinel 2 L2A

**Примітка:** відображено просторову локалізацію процесів вторинного засолення та осолонцювання земель у межах лівобережної частини Херсонської області станом на 23 вересня 2024 року. Площа спостереження складає 40 тис. га.



Рис. 7. Осередки пожеж (чорні відтінки) в агроландшафтах Херсонської області за супутниковими даними (2024 р.), дані Sentinel 2 L2A

що вказує на катастрофічний рівень дефляційної деградації.

Деградаційні процеси поширилися і на природні екосистеми. Значна частина об'єктів природно-заповідного фонду області опинилася у зоні окупації та під впливом порушення гідрологічного режиму. На прикладі біосферного заповідника «Асканія-Нова» встановлено зниження зволоження рослинності, вигорання степових біотопів, зростання

пожежної небезпеки та зниження біопродуктивності (рис. 9).

Зміни індексу NDMI засвідчили формування осередків критичного водного стресу навіть у природоохоронних ландшафтах, які раніше отримували додаткове іригаційне підживлення через гідрологічний перерозподіл зрошувальних вод.

**Обговорення результатів.** Отримані результати свідчать, що деградація зрошуваних екосис-



Рис. 8. Прояви вітрової ерозії (дефляції) на лівобережжі Херсонської області (2024 р.), дані Sentinel-2 L2A; фотофіксація

**Примітка:** представлено супутникові та наземні свідчення розвитку вітрової ерозії на території лівобережної частини Херсонської області у 2024 році. Фіксується формування пилових шлейфів, оголення ґрунтового покриття та переміщення дрібнодисперсних часток унаслідок осушення територій, деградації рослинності та посилення аридизаційних процесів.

тем Херсонської області має комплексний характер і зумовлена поєднанням кліматичних змін та воєнно-техногенних чинників. Припинення функціонування зрошувальних систем після руйнування гідротехнічної інфраструктури та Каховського водосховища стало ключовим тригером каскадних деградаційних процесів (рис. 10).

Супутниковий моніторинг підтвердив різке зниження продуктивності рослинного покриття та скорочення площ активної вегетації, що посилює випаровування і водний стрес та, відповідно, активізувало аридизаційні тенденції. Підвищення температури підстильної поверхні є закономірним наслідком втрати зрошення і деградації рослинності: зменшення транспіраційного охолодження сприяло зростанню теплового навантаження та загостренню дефіциту вологи. Осушення водних об'єктів і зниження рівнів ґрунтових вод засвідчують руйнування сформованої гідрологічної системи території, що підсилює ризики вторинного засолення та довготривалої втрати біокліматичної стійкості ґрантів. Оголення поверхні й високі температури також створили передумови для масштабних пожеж і дефляції,

що формує стійкі екологічні ризики та може прискорювати процеси опустелювання. Виявлені зміни у природно-заповідних ландшафтах підтверджують, що зрошення виконувало важливу агропромислову та екосистемну регуляторну функцію у підтриманні водного та теплового режимів регіону.

**Головні висновки.** Зрошення екосистеми Херсонської області зазнали масштабної природно-антропогенної деградації внаслідок поєднання воєнного та кліматичного впливу, осушення Каховського водосховища і руйнування гідротехнічної інфраструктури. Припинення зрошення спричинило різке скорочення площ агропромисловості, деградацію рослинного покриття та розширення території оголених і малопродуктивних ґрунтів, частка яких перевищила 80% досліджуваної зони. За результатами аналізу індексів дистанційного зондування встановлено критичне посилення водного стресу та евапотранспірації, а також стійку тенденцію підвищення температури підстильної поверхні (середній тренд близько +9 °С; максимальні значення 56–67 °С), що відображає термодеградацію ландшафтів і порушення водного балансу. Осушення водосхо-

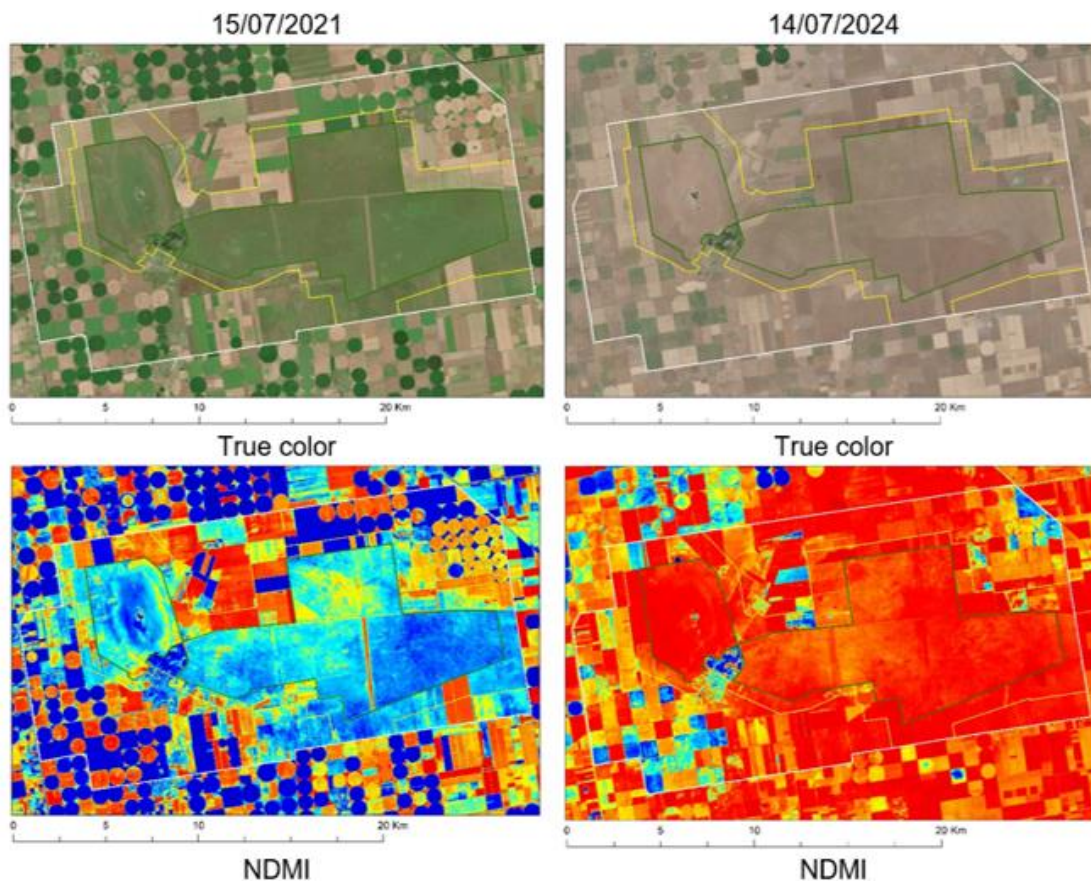


Рис. 9. Динаміка зволоження рослинного покриву на території Біосферного заповідника «Асканія-Нова» за індексом NDMI (2021 і 2024 рр.), дані Sentinel-2 L2A

**Примітка:** представлено просторово-часові зміни рівня зволоження та стану рослинного покриву в межах Біосферного заповідника «Асканія-Нова» у 2021 і 2024 рр. за даними індексу Normalized Difference Moisture Index (NDMI) у поєднанні з природним відображенням поверхні (True Color). Встановлено зростання площ із дефіцитом вологи та ознаками вигорання рослинності, що пов'язано з припиненням іригаційного підживлення, посиленням аридизаційних процесів та воєнних дій.

NDMI: червоні відтінки – території з критичним водним стресом, сухою рослинністю або її відсутністю; жовті – низький рівень зволоження і пригнічена вегетація; бірюзові – задовільне зволоження та помірна вегетація; сині – високий рівень зволоження і добра вегетація.

вища зумовило деградацію водного фонду, активізацію вторинного засолення, дефляції та пожежної небезпеки, що супроводжувалося значними дефляційними втратами родючого шару ґрунтів і погіршенням агроecологічного стану зони зрошення. Використаний геоінформаційно-дистанційний підхід є важливим для моніторингу ecологічного стану важкодоступних і окупованих територій та ефективним для оцінки ecологічних збитків, розроблення заходів повоєнного відновлення зрошення і формування адаптаційних стратегій природокористування в умовах кліматичних і воєнних ризиків.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати доцільно використовувати для ecологічного моніторингу зрошуваних територій, оцінки воєнно зумовлених збитків при-

родним ресурсам, обґрунтування заходів важливості повоєнного відновлення гідротехнічної інфраструктури та планування адаптаційних стратегій землекористування в умовах кліматичних змін. Геоінформаційно-дистанційний підхід доцільно застосовувати для оперативного аналізу стану агроландшафтів на важкодоступних і тимчасово окупованих територіях.

#### Подяки

The research is supported by the Canadian Institute of Ukrainian Studies (CIUS) of the University of Alberta from the Ihor Roman Bukowsky Sustainable Development Endowment Fund.

The project was supported by Documenting Ukraine, a program of the Institute for Human Sciences, IWM Vienna.

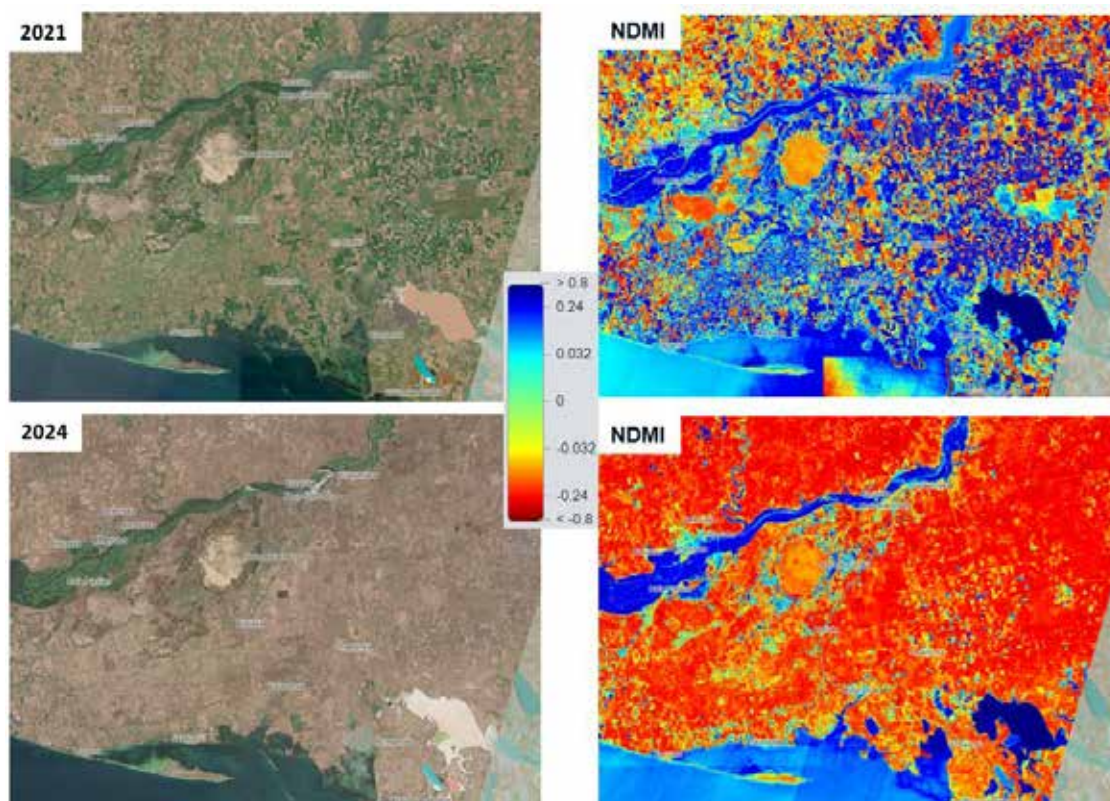


Рис. 10. Природно-кліматична трансформація території зрошуваного землеробства Херсонської області за індексом NDMI (2021 і 2024 pp.), дані Sentinel-2 L2A

**Примітка:** знімки зліва відображають природне кольорове відображення поверхні (True Color), справа – розподіл індексу зволоження Normalized Difference Moisture Index (NDMI). Простежується різке скорочення площ із достатнім рівнем вологості, посилення водного стресу, деградація рослинного покриву та аридизація агроландшафтів унаслідок припинення функціонування зрошення у воєнний період.

### Література

1. Dikshit A., Pradhan B., Alamri A. M. Long lead time drought forecasting using lagged climate variables and a stacked long short-term memory model. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755 (2). 142638. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142638>
2. Pichura V., Potravka L., Vdovenko N., Biloshkurenko O., Strachuk N., Baysha K. Changes in climate and bioclimatic potential in the Steppe Zone of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2022. Vol. 23 (12). P. 189–202. <https://doi.org/10.12911/22998993/154844>
3. 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*. 2025. Vol. 50 (2). P. 104–120. <https://doi.org/10.1080/02508060.2025.2472718>
4. 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*. 2021. No. 48 (I–III). P. 182–196. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.136161>
5. Pichura V., Potravka L. Impact of war on natural and climatic transformation of territories in the irrigation zone of Ukraine. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7. 783. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07404-4>
6. 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*. 2024. Vol. 21. 100167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>
7. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A. et al. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*. 2023. Vol. 6. P. 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
8. Vyshnevskiy V., Shevchuk S., Komorin V., Oleynik Yu., Gleick P. The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*. 2023. Vol. 48 (5). P. 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>
9. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. The destruction of the Kakhovka dam and the future of the Kakhovske reservoir. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81 (1). P. 275–288. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2320033>
10. Felice M. Di, Soares M. B., Alessandri A., Troccoli A. Scoping the potential usefulness of seasonal climate forecasts for solar power management. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 142. P. 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.134>
11. Pichura V., Potravka L., Stoiko N., Dudych H. Scenarios for the functioning of the Kakhovka Reservoir territory. *Journal of Landscape Ecology*. 2025. Vol. 18 (3). P. 118–154. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2025-0023>

12. Domaratskiy E. O., Bazaliy V. V., Domaratskiy O. O., Dobrovolskiy A. V., Kyrychenko N. V., Kozlova O. P. Influence of mineral nutrition and combined growth regulating chemical on nutrient status of sunflower. *Indian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 45 (1). P. 126–129.
13. Domaratskiy Ye., Kozlova O., Kaplina A. Economic efficiency of applying environmentally friendly fertilizers in production technologies in the South of Ukraine. *Indian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 47 (3). P. 624–629.
14. Potravka L., Pichura V., Melnyk V. Results of the sociological research “Kakhovka reservoir: past, present, and future”. *Vodni bioresursy ta akvakultura*. 2025. No. 2 (18). P. 204–223. <https://doi.org/10.32782/wba.2025.2.12>
15. Nguyen C. T., Chidthaisong A., Diem P. K., Huo L.-Z. A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia using Landsat 8. *Land*. 2021. Vol. 10. P. 2–17. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
16. Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C. B., Jensen N. O., Schelde K., Thomsen A. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81 (2–3). P. 179–193. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00342-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00342-X)
17. Ashok A., Rani H. P., Jayakumar K. V. Monitoring of dynamic wetland changes using NDVI and NDWI based Landsat imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. Vol. 23. 100547. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100547>
18. Azcon-Bieto J., Talon M. *Fundamentos de fisiologia vegetal*. 2nd ed. Madrid : McGraw-Hill Interamericana, 2013. 669 p.
19. Tibangayuka N., Mulungu D. M. M., Izdori F. Analysis of spatiotemporal surface water variability and drought conditions using remote sensing indices in the Kagera River Sub-Basin, Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2025. Vol. 37. 101405. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101405>

Дата першого надходження статті до видання: 03.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026