

**Ірина Романівна Стахів¹, Віктор Васильович Ворох²,
Владислав Олександрович Деркач³, Сергій Віталійович Чепіль⁴**

¹ кандидат геологічних наук, асистент кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: stakhivira@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3090-6988>

² аспірант кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: fainkucha@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

³ студент бакалаврату, кафедра геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: vladd120904@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7803-2224>

⁴ студент магістратури, кафедра геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)
E-mail: chepil.sergey@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9296-1106>

ТЕХНОЛОГІЇ ГІС ТА ДЗЗ В ЕФЕКТИВНОМУ ВИКОРИСТАННІ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

У дослідженні розглянуто можливості застосування геоінформаційних систем (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для моніторингу стану та ефективності використання земельних ресурсів. Дослідження виконано на прикладі території Каховського водосховища, що зазнала суттєвих трансформацій унаслідок порушення гідрологічного режиму. На основі супутникових знімків Sentinel-2 та індексу NDWI проаналізовано просторово-часову динаміку водної поверхні упродовж червня – серпня 2023 року, що дозволило кількісно оцінити масштаби скорочення водної поверхні та трансформації земель.

З використанням платформ Copernicus Browser і Google Earth Engine здійснено картографування змін та просторову інтерпретацію площ водної акваторії. Отримані результати свідчать про скорочення площі відкритої водної поверхні більш ніж на 85 % упродовж червня 2023 року, що є індикатором масштабної трансформації землекористування та втрати водорегулювальної функції Каховського водосховища.

Ключові слова: землекористування; геоінформаційні системи (ГІС); дистанційне зондування Землі (ДЗЗ); нормалізований диференційний водний індекс (NDWI); Sentinel-2; моніторинг земель; водний стрес.

Рис.: 22. Табл.: 1. Бібл.: 23.

Актуальність теми дослідження. Земля як просторовий базис господарської діяльності одночасно виступає природним ресурсом, засобом виробництва та ключовим елементом екосистемної рівноваги. Саме поєднання цих функцій зумовлює складність оцінки змін землекористування, особливо в умовах різких природних і антропогенних порушень. Вона виступає просторовою основою господарської діяльності, джерелом родючих ґрунтів, регулятором водного балансу та важливим компонентом глобального вуглецевого циклу. В умовах зростання чисельності населення світу та посилення антропогенного навантаження земельні ресурси зазнають дедалі інтенсивнішого використання, що потребує впровадження ефективних механізмів управління та контролю з метою запобігання деградаційним процесам і забезпечення продовольчої безпеки в довгостроковій перспективі [8; 13].

Проблема деградації земель має глобальний характер. За оцінками міжнародних організацій, понад 2 млрд га земель у світі вже зазнали різних форм деградації, що безпосередньо впливає на умови життя більш ніж одного мільярда людей. Значна частина орних земель втратила частину своїх фізичних, хімічних та біологічних функцій, що призводить до зниження продуктивності агроландшафтів і погіршення екологічного стану територій [22]. Негативні процеси землекористування супроводжуються зростанням викидів вуглецю в атмосферу, частка яких, за оцінками дослідників, сягає близько 20 % глобальних антропогенних викидів щороку [19].

Для України проблема ефективного використання земельних ресурсів має особливу актуальність. Країна володіє значним земельно-ресурсним потенціалом, зокрема унікальними чорноземними ґрунтами, які формують основу аграрного виробництва та експортного потенціалу держави. Водночас високий рівень розораності території, інтенсивне сільськогосподарське використання, дефіцит органічних і мінеральних добрив, а також тривалі деградаційні процеси призвели до суттєвого погіршення якісного стану ґрунтового покриву.

Ситуація ускладнюється наслідками повномасштабної військової агресії Російської Федерації, що спричинила значні прямі та непрямі збитки аграрному сектору, забруднення земель вибухонебезпечними предметами та порушення усталених систем землекористування [15].

В умовах сучасних викликів традиційні підходи до оцінки та моніторингу стану земельних ресурсів, що базуються переважно на наземних обстеженнях, не завжди забезпечують необхідну оперативність, повноту та просторову узгодженість даних. Прийняття управлінських рішень на основі фрагментарної або застарілої інформації знижує ефективність землекористування та ускладнює реалізацію принципів сталого розвитку. У зв'язку з цим зростає роль сучасних геоінформаційних технологій (ГІС) і даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують отримання актуальних, об'єктивних і масштабованих просторових даних про стан земельного покриву та його динаміку [4; 1].

Технології ДЗЗ дозволяють здійснювати систематичний моніторинг землекористування на різних просторових рівнях — від локального до глобального — з використанням багатоспектральних, гіперспектральних, радарних та лідарних даних. Супутникові місії нового покоління, зокрема програми Sentinel і Landsat, забезпечують регулярне оновлення інформації з високою просторовою та часовою розрізненністю, що є особливо важливим для аналізу деградаційних процесів, змін у структурі угідь, стану рослинного покриву та водних ресурсів. Поєднання даних ДЗЗ з аналітичними можливостями ГІС створює інформаційну основу для інтеграції природних, соціально-економічних та правових аспектів землекористування [10; 14].

Застосування ГІС і ДЗЗ відкриває широкі можливості для вирішення практичних завдань землеустрою, зокрема інвентаризації земель, оцінки їх якісного стану, виявлення деградаційних осередків, аналізу просторово-часової динаміки землекористування та підтримки прийняття управлінських рішень. Отримані за допомогою цих технологій дані дозволяють оперативно оцінювати наслідки природних і антропогенних впливів, прогнозувати розвиток негативних процесів та формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо раціонального використання і відновлення земельних ресурсів. Саме тому комплексне застосування технологій ГІС та ДЗЗ є необхідною умовою формування сучасної системи ефективного землекористування в Україні.

За таких умов застосування ГІС і даних ДЗЗ набуває особливої актуальності для оцінки змін землекористування в умовах сучасних екологічних і соціально-економічних викликів.

Особливої гостроти зазначені проблеми набули для південних регіонів України після руйнування Каховської гідроелектростанції в червні 2023 року. Порушення гідрологічного режиму призвело до різкого зниження рівня води, оголення значних площ дна водосховища та трансформації прибережних і заплавлених земель. За таких умов виникла необхідність оперативної та об'єктивної оцінки змін землекористування з використанням сучасних геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування Землі.

Постановка проблеми. Незважаючи на активний розвиток ГІС і доступність супутникових даних відкритого доступу, на практиці землеустрою залишається недостатньо опрацьованим аспект інтеграції даних ДЗЗ у процеси оперативного аналізу та управління земельними ресурсами. Більшість управлінських рішень і надалі ґрунтується на фрагментарних або застарілих даних, що ускладнює своєчасне виявлення просторових змін і оцінку їхніх масштабів.

У практиці землеустрою такі методичні обмеження особливо проявляються під час аналізу кризових змін земного покриву, зумовлених раптовими гідрологічними порушеннями. Відсутність кількісно обґрунтованих підходів до оцінки втрати водних площ і трансформації прибережних територій ускладнює прийняття управлінських рішень щодо подальшого використання та відновлення земель. Це зумовлює необхідність застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ як інструментів оперативного просторового аналізу змін землекористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика раціонального використання та охорони земельних ресурсів широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. У роботах українських дослідників значну увагу приділено теоретичним і прикладним аспектам землеустрою, земельного кадастру та управління земельними відносинами, зокрема питанням деградації ґрунтів, екологічної безпеки землекористування та формування сталих моделей використання земель. У цьому контексті у працях А. М. Третяка, Л. Я. Новаковського, В. І. Зацерковного, Д. С. Добряка та інших авторів обґрунтовуються підходи до оцінки стану земель і необхідність удосконалення системи управління земельними ресурсами з урахуванням екологічних факторів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням ГІС як інструменту аналізу та інтеграції просторових даних. У наукових публікаціях зазначається, що ГІС забезпечують можливість поєднання різномірної інформації про земельний покрив, природні умови та господарську діяльність, що створює основу для просторового аналізу і підтримки прийняття управлінських рішень у сфері землекористування [4, 21]. Водночас більшість робіт у цьому напрямі зосереджена на загальних методичних аспектах побудови ГІС-моделей, тоді як прикладні питання використання таких моделей для оперативного моніторингу змін землекористування залишаються недостатньо деталізованими.

Значна кількість зарубіжних досліджень присвячена застосуванню даних ДЗЗ для аналізу земного покриву та водних об'єктів. У працях S. McFeeters, В. Gao, показано ефективність використання спектральних індексів для картографування водної поверхні та оцінки її динаміки за супутниковими знімками [18, 9]. Разом із тим такі дослідження, як правило, орієнтовані на вирішення окремих тематичних задач ДЗЗ і не завжди розглядають результати аналізу в контексті практичних потреб землеустрою та управління земельними ресурсами. Водночас у зазначених роботах основна увага приділяється методичним аспектам дистанційного зондування, тоді як питання практичного використання отриманих результатів у системі землеустрою залишаються недостатньо висвітленими.

Незважаючи на наявність наукових досліджень та значного обсягу супутникових даних відкритого доступу, питання комплексного використання ГІС і матеріалів ДЗЗ для оцінки просторово-часових змін землекористування залишаються недостатньо систематизованими. Зокрема, потребують подальшого опрацювання методичні підходи до інтеграції спектральних індексів у практику землеустрою з метою кількісної оцінки трансформацій земельного покриву та підтримки прийняття управлінських рішень. Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування практично орієнтованих методів використання даних ДЗЗ і ГІС для підвищення ефективності землекористування. Особливо це стосується територій, що зазнали раптових гідрологічних і антропогенних порушень.

Водночас аналіз наукових публікацій свідчить, що питання використання спектральних індексів для кількісної оцінки трансформації землекористування в умовах раптового осушення великих водосховищ залишаються недостатньо опрацьованими. Більшість досліджень зосереджена на загальному картографуванні водних об'єктів або екологічних наслідках змін, тоді як інтеграція результатів дистанційного зондування в практику землеустрою потребує подальшого методичного обґрунтування.

Метою роботи є кількісна оцінка просторово-часової динаміки водної поверхні в межах досліджуваної території на основі даних Sentinel-2 та індексу NDWI з подальшою оцінкою змін структури землекористування.

Виклад основного матеріалу. Землекористування розглядається як складна соціально-економічна та природна система, що відображає способи використання земельних ресурсів у межах певної території з урахуванням її природних властивостей, функціонального призначення та правового режиму. У наукових дослідженнях підкреслюється, що земля одночасно виступає просторовою основою розміщення господарських об'єктів, засобом виробництва у сільському господарстві та ключовим компонентом природного середовища, що зумовлює необхідність її раціонального та екологічно збалансованого використання [3].

Формування системи землекористування відбувається під впливом комплексу природних, економічних і правових чинників. Порушення збалансованості між цими складовими призводить до низки негативних процесів, таких як деградація ґрунтів, порушення водного режиму, зниження родючості земель та неефективної просторової організації територій. Узагальнені проблеми у сфері земельних відносин і землекористування, характерні для сучасного етапу розвитку земельної сфери України, проілюстровано на рис. 1 [2].

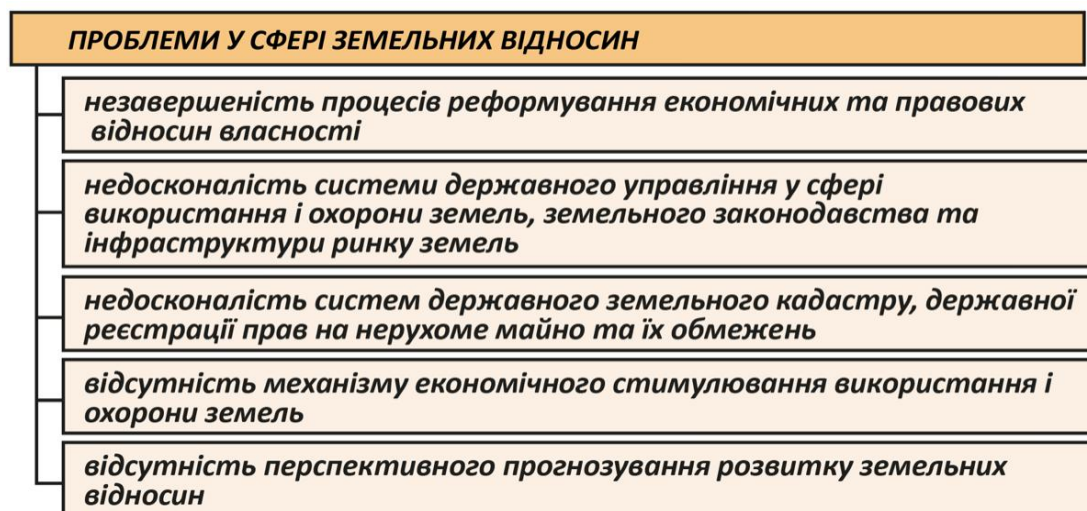


Рис. 1. Проблеми у сфері земельних відносин

Виявлені проблеми у сфері земельних відносин свідчать про необхідність переосмислення підходів до управління земельними ресурсами та посилення ролі землеустрою як системоутворюючого елементу державної земельної політики. За умов фрагментарності нормативно-правового регулювання, недостатньої узгодженості управлінських рішень і зростання антропогенного навантаження на земельні ресурси традиційні механізми регулювання виявляються малоефективними. У таких обставинах землеустрій перестає бути суто технічним інструментом і набуває значення комплексного механізму впорядкування земельних відносин.

Сучасна система землеустрою має забезпечувати інтеграцію правових, екологічних, економічних і просторових чинників у процесі прийняття управлінських рішень. Це передбачає перехід від ізольованого розв'язання окремих землевпорядних завдань до формування узгодженої системи просторового планування, орієнтованої на раціональне використання земель, збереження природного потенціалу та збалансований розвиток територій. Особливої актуальності такий підхід набуває для регіонів із високим рівнем трансформації земного покриву, де необхідно враховувати як природні обмеження, так і соціально-економічні потреби.

Важливою умовою реалізації зазначених підходів є належне інформаційне забезпечення процесів землеустрою. Формування обґрунтованих управлінських рішень потребує наявності актуальних, повних і просторово узгоджених даних про стан земельних ресурсів та динаміку їх змін. У цьому контексті зростає значення сучасних інформаційно-аналітичних інструментів, які дозволяють перейти від статичних облікових характеристик до системного аналізу просторових процесів землекористування.

Застосування ГІТ і матеріалів ДЗЗ у системі землеустрою створює можливості для оперативного виявлення проблемних ділянок, оцінки наслідків антропогенного впливу та прогнозування розвитку земельних процесів. Це забезпечує науково обґрунтовану основу для формування адаптивних управлінських рішень і підвищення ефективності використання земельних ресурсів. Узагальнення зазначених підходів дозволяє виокремити основні напрями вирішення проблем у сфері землеустрою, що відображено на рис. 2.

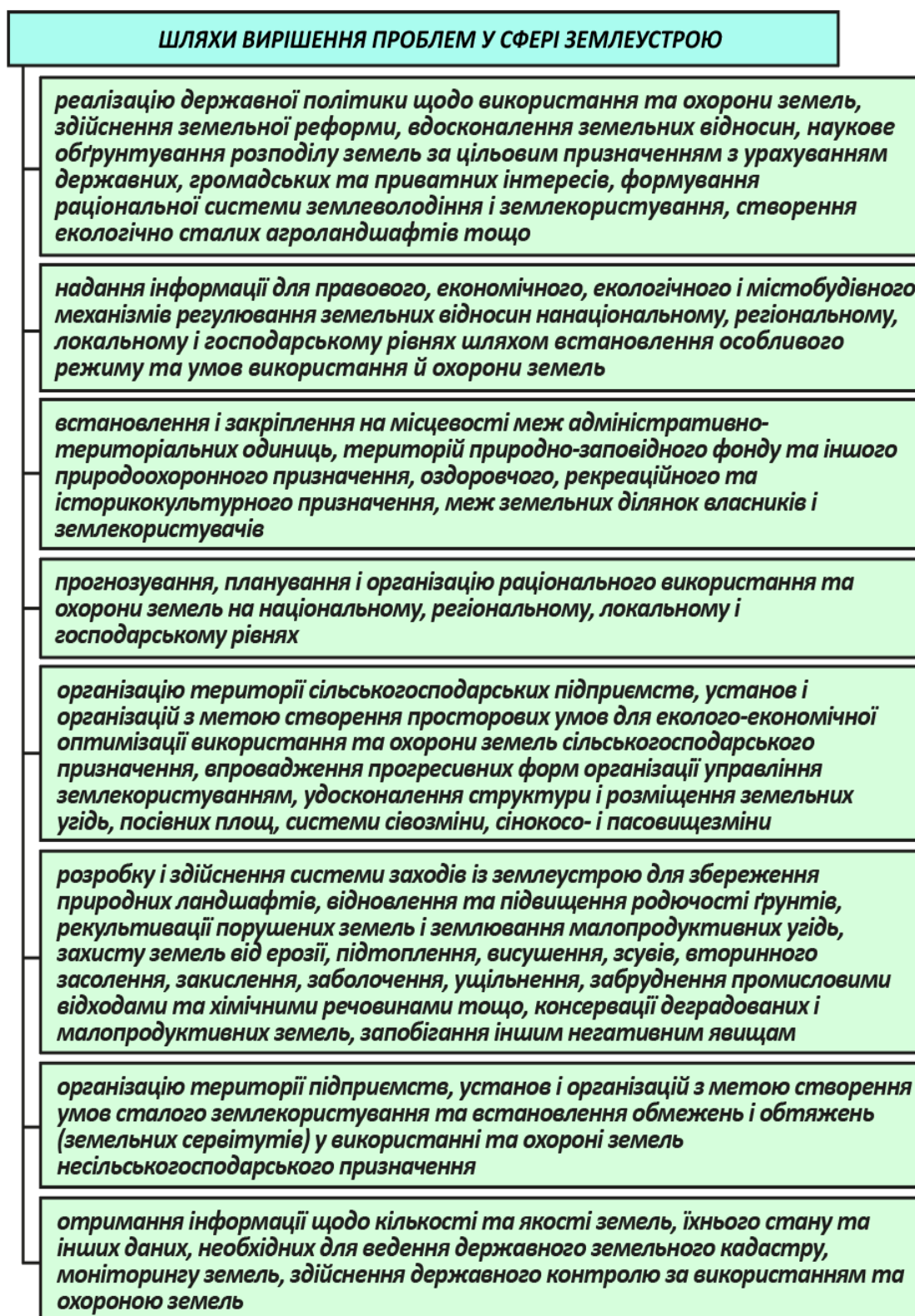


Рис. 2. Шляхи вирішення проблем у сфері землеустрою

Реалізація визначених напрямів удосконалення землеустрою потребує їх чіткого інституційного та функціонального закріплення в системі управління земельними ресурсами. Землеустрій у цьому контексті виступає ключовим механізмом реалізації державної земельної політики, оскільки забезпечує узгодження правових, організаційних,

технічних та екологічних аспектів використання й охорони земель. Функціональний підхід дозволяє розглядати землеустрій не лише як сукупність окремих землевпорядних робіт, а як цілісну систему взаємопов'язаних дій, спрямованих на формування збалансованого землекористування та просторового розвитку територій.

Відповідно до чинного законодавства України, землеустрій спрямований на раціональне використання та охорону земель, забезпечення екологічної безпеки й створення передумов для сталого розвитку. У межах системи управління земельними ресурсами він виконує низку взаємодоповнювальних функцій, серед яких провідну роль відіграють екологічна, правова, організаційна та технічна. Їх реалізація передбачає перехід від фрагментарного регулювання земельних відносин до системного просторового планування, що ґрунтується на узгодженні землекористування з природними умовами, рівнем господарського освоєння та стратегічними цілями розвитку регіонів.

У такому підході землеустрій розглядається як інструмент державного управління, за допомогою якого забезпечується інтеграція екологічних вимог, економічних інтересів і соціальних потреб у процесі прийняття управлінських рішень. Сукупність функцій і завдань землеустрою в системі державного управління земельними ресурсами узагальнено та систематизовано на рис. 3 [2].



Рис. 3. Функції та завдання землеустрою

Функції землеустрою відображають багатогранний характер його впливу на процеси використання та охорони земель і охоплюють взаємопов'язані правові, екологічні, технічні, організаційні та економічні аспекти. Кожна з цих функцій виконує окрему роль, проте їх практична реалізація можлива лише за умови комплексного застосування в межах єдиної системи управління земельними ресурсами.

Правова функція землеустрою спрямована на забезпечення законності землекористування, захист прав власників і користувачів земель, а також дотримання встановлених обмежень і режимів використання територій. Вона створює нормативну основу для реалізації землевпорядних рішень та контролю за їх виконанням. Екологічна функція полягає у збереженні природних властивостей земель, запобіганні деградаційним процесам і забезпеченні екологічної безпеки землекористування шляхом урахування природних умов та екологічних обмежень.

Технічна та організаційна функції землеустрою забезпечують практичну реалізацію землевпорядних заходів і включають встановлення меж земельних ділянок, інвентаризацію земель, просторове впорядкування територій і планування землекористування. Водночас економічна функція пов'язана з оцінкою ефективності використання земель, обґрунтуванням напрямів їх господарського освоєння та формування передумов економічно обґрунтованого просторового розвитку територій.

Сукупна реалізація зазначених функцій формує цілісну систему землеустрою, яка забезпечує узгодження інтересів держави, територіальних громад і землекористувачів, а також створює передумови для сталого розвитку земельних відносин.

У межах цього дослідження землеустрій розглядається не як сукупність окремих видів документації (рис. 4), а як інструмент просторового аналізу та управління земельними ресурсами (рис. 5). У цьому контексті застосування ГІС і матеріалів ДЗЗ дозволяє наповнити землевпорядні рішення актуальною просторовою інформацією, забезпечити кількісну оцінку змін землекористування та підвищити обґрунтованість управлінських рішень у кризових умовах [1].



Рис. 4. Види документації із землеустрою

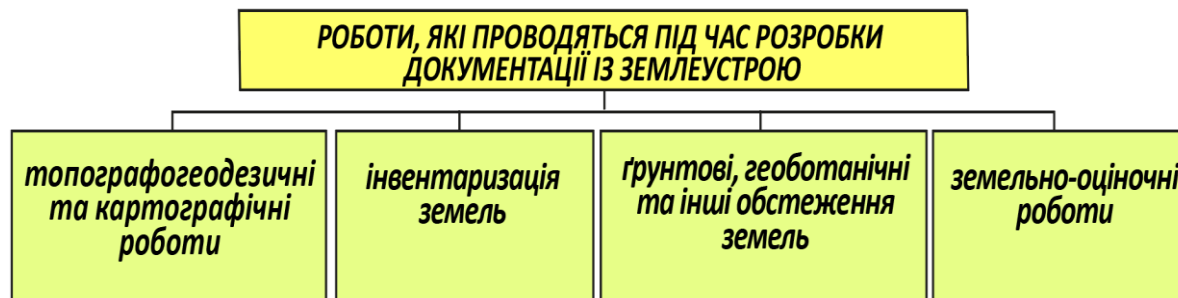


Рис. 5. Роботи, що виконуються під час розроблення документації із землеустрою

Важливе значення в процесі землекористування має оцінка стану земельних ресурсів та умов їх використання, що визначається природними й антропогенними чинниками. Земельний фонд України відзначається різноманітністю ґрунтового покриву та істотною просторовою мінливістю агроекологічних умов. Такі особливості зумовлюють неоднаковий рівень родючості земель, їх екологічну стійкість і чутливість до негативних впливів.

Просторовий розподіл агроекологічних характеристик, наявність несприятливих природно-антропогенних процесів, а також техногенне забруднення ґрунтів істотно впливають на напрями та інтенсивність використання земель. Урахування зазначених чинників є необхідним під час обґрунтування землевпорядних рішень та оцінки сучасного стану землекористування. Узагальнену характеристику агроекологічного стану земель і наявних обмежень землекористування в межах території України наведено на рис. 6-10.



Рис. 6. Карта агроекологічної оцінки ґрунтів України [5]

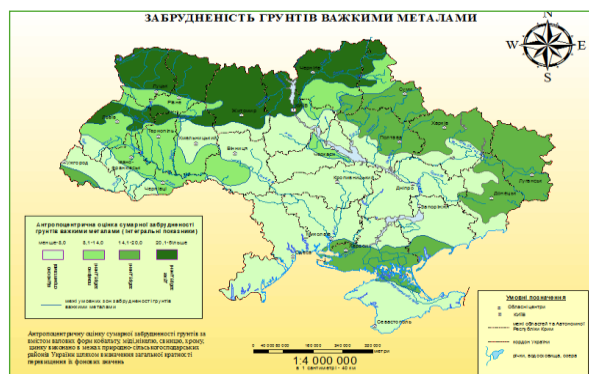


Рис. 7. Карта забрудненості ґрунтів важкими металами [5]

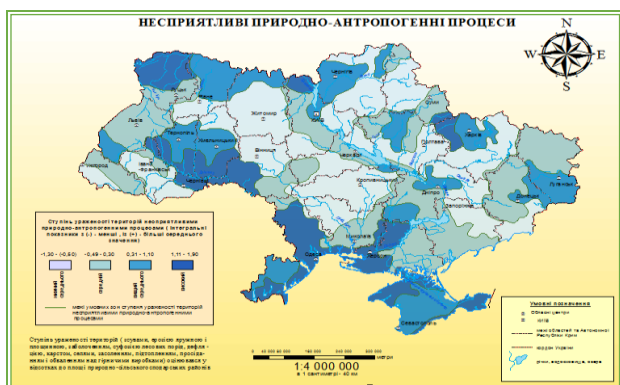


Рис. 8. Карта несприятливих природно-антропогенних процесів [5]

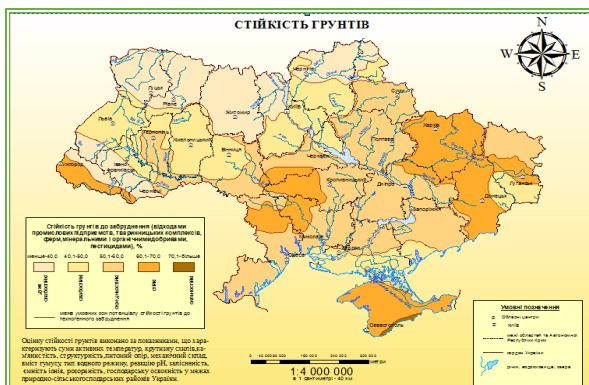


Рис. 9. Карта стійкості ґрунтів України [5]

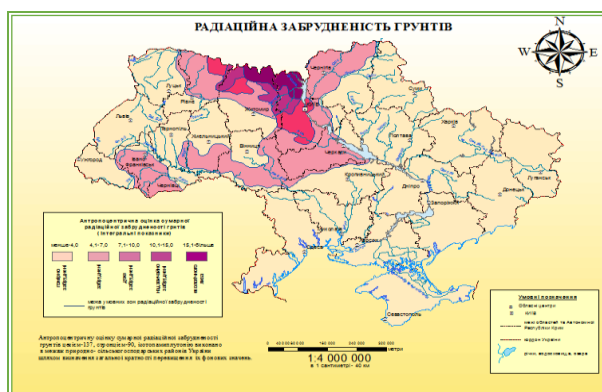


Рис. 10. Карта радіаційного забруднення ґрунтів України

Наведені характеристики землекористування та агроекологічного потенціалу є базою для аналізу територій, що зазнали різких антропогенних трансформацій, зокрема і внаслідок порушення гідрологічного режиму. Отже, землекористування слід розглядати як багатокомпонентну систему, у межах якої земля виступає одночасно природним ресурсом, об’єктом господарської діяльності та елементом просторової організації території. Сучасні виклики у сфері використання земельних ресурсів зумовлюють необхідність застосування інструментів, здатних забезпечити кількісну оцінку змін у структурі угідь та стані земель, що обґрунтовує доцільність використання ГІС і матеріалів ДЗЗ.

Об’єктом дослідження є територія осушеної частини Каховського водосховища та прилеглі земельні ділянки, трансформація яких після порушення гідрологічного режиму зумовила істотні зміни структури землекористування. Досліджувана ділянка охоплює прибережні та заплавні землі Дніпра, які зазнали суттєвих змін після руйнування гідротехнічної споруди, що зумовило різке зниження рівня води та оголення значних площ дна водосховища.

Вихідними даними слугували багатоспектральні супутникові знімки Sentinel-2, отримані в межах програми Copernicus [7]. Просторова розрізненість знімків (10 м) у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах забезпечує можливість детального аналізу змін водної поверхні. Для візуальної перевірки та просторової верифікації результатів додатково використовувалися матеріали платформи Google Earth Engine [12].

Для виділення водної поверхні у межах досліджуваної території використано нормалізований диференційний водний індекс (NDWI), вибір якого зумовлений його чутливістю до змін співвідношення між відбивною здатністю води та суходолу в зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах, який розраховувався за формулою:

$$NDWI = \frac{B_{green} - B_{NIR}}{B_{green} + B_{NIR}}, \tag{1}$$

де B_{green} — відбивна здатність у зеленому спектральному каналі (B3 Sentinel-2),

B_{NIR} — відбивна здатність у ближньому інфрачервоному каналі (B8 Sentinel-2).

Розрахунок індексу NDWI та класифікація пікселів виконувалися з використанням аналітичного скрипту в середовищі Copernicus Browser. Пікселі з додатними значеннями NDWI належать до класу водної поверхні, тоді як від’ємні значення відповідали суходолу.

Площа водної поверхні визначалася шляхом автоматизованого підрахунку кількості пікселів, класифікованих як водні, з подальшим перерахунком у площинні показники за формулою:

$$S = N * A_{pix}, \tag{2}$$

де S — площа водної поверхні, км²;

N — кількість пікселів, віднесених до класу води.

A_{pix} — площа одного пікселя супутникового знімка Sentinel-2.

Моніторинг ефективного використання регіональних земельних ресурсів є комплексним процесом, що передбачає систематичне спостереження, оцінювання та аналіз стану земель з метою забезпечення їх раціонального використання і збереження природного потенціалу. Ефективність землекористування охоплює не лише економічні показники, а й екологічну стійкість, соціальну значущість та відповідність природним умовам конкретної території. У цьому контексті ГІС виступають ключовим інструментом інтеграції просторових, статистичних і тематичних даних, що дозволяє формувати цілісне уявлення про стан земельних ресурсів на регіональному рівні [8].

Важливим завданням моніторингу є виявлення деградаційних процесів, зокрема ерозії ґрунтів, вторинного засолення, заболочування або пересихання територій. Такі процеси мають просторово неоднорідний характер і зумовлені поєднанням природних чинників та антропогенного впливу. Геоінформаційний підхід дає змогу аналізувати динаміку цих змін у часі, порівнювати різні часові зрізи та визначати тенденції трансформації земного покриву [17].

Особливу роль у системі моніторингу відіграє водний фактор, оскільки доступність водних ресурсів безпосередньо впливає на продуктивність земель, особливо в аграрних регіонах. Зміни гідрологічного режиму призводять до трансформації землекористування та зростання екологічних ризиків. Застосування ГІС і даних ДЗЗ дозволяє оцінювати просторовий розподіл водозабезпечення земель і виявляти зони підвищеного водного стресу [20].

Спектральні індекси є узагальненими числовими показниками, що обчислюються на основі комбінацій спектральних каналів і використовуються для підвищення інформативності супутникових зображень. Їх застосування дає змогу зменшити вплив зовнішніх чинників і зосередити аналіз на конкретних властивостях земної поверхні, зокрема стані рослинності, вологості ґрунтів та наявності водних об'єктів [16].

Індекс NDWI займає особливе місце серед водних індексів, оскільки він спеціально розроблений для виділення відкритих водних поверхонь. Теоретичною основою індексу є контраст між високим відбиттям води у зеленому діапазоні та низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному спектрі, що дозволяє ефективно відокремлювати водні об'єкти від суходолу [18]. Інтерпретація значень NDWI потребує врахування природних і антропогенних особливостей території, оскільки проміжні значення можуть відповідати вологим заплавам або перехідним станам зволоження [23]. Разом із тим застосування фіксованого порогового значення NDWI ($NDWI > 0$) може призводити до певних похибок у випадках наявності вологих ґрунтів, мілководдя або ділянок із водною рослинністю. У зв'язку з цим результати спектрального аналізу інтерпретувалися з урахуванням візуальної перевірки за оптичними зображеннями та просторового контексту досліджуваної території.

Сучасні веборієнтовані геоінформаційні платформи суттєво розширюють можливість використання ГІС та ДЗЗ у практиці моніторингу земельних ресурсів. Вони забезпечують інтерактивний доступ до супутникових даних і інструментів їх аналізу без потреби використання спеціалізованого програмного забезпечення, що підвищує оперативність і доступність просторового аналізу [11].

Однією з ключових ініціатив у цій сфері є програма Copernicus Європейського Союзу, яка надає відкритий доступ до даних супутників серії Sentinel. Дані Sentinel-2 широко застосовуються для аналізу земельних і водних ресурсів завдяки високому просторовому та спектральному розрізненню [6].

Для практичної оцінки стану земельних ресурсів використано вебплатформу Copernicus Browser [7], інтерфейс якої наведено на рис. 11.

Територією дослідження обрано район Каховської гідроелектростанції та прилеглу частину колишнього Каховського водосховища, що зазнала значних змін після руйнування греблі 05.06.2023р. (рис. 12).

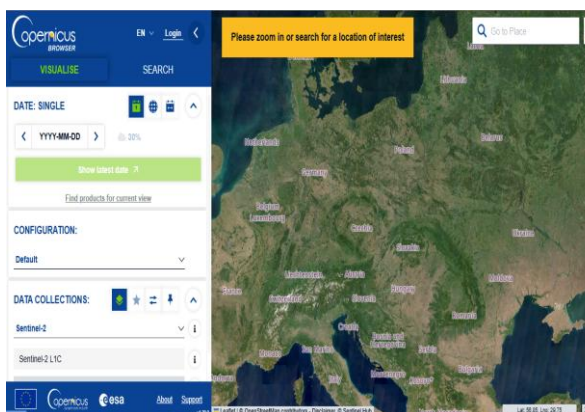


Рис. 11. Інтерфейс платформи Copernicus Browser

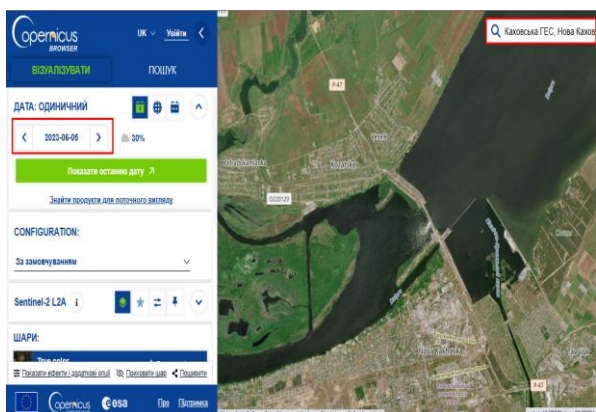


Рис. 12. Задання території дослідження та дати зйомки

У межах платформи було використано стандартні візуальні шари та користувацький аналітичний шар на основі скриптів JavaScript. Набір доступних шарів Sentinel-2 наведено на рис. 13, а процес активації та налаштування користувацького шару Custom Script — на рис. 14–15.

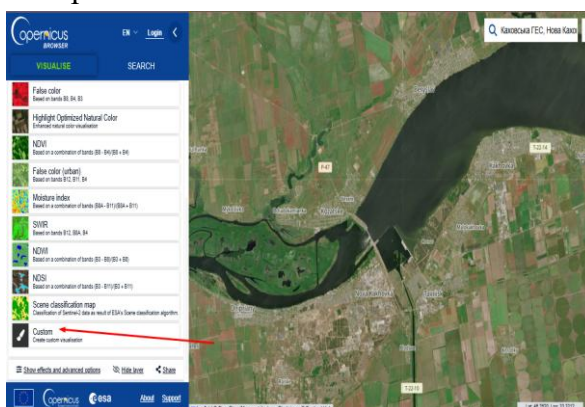


Рис. 13. Набір доступних шарів Sentinel-2 у Copernicus Browser

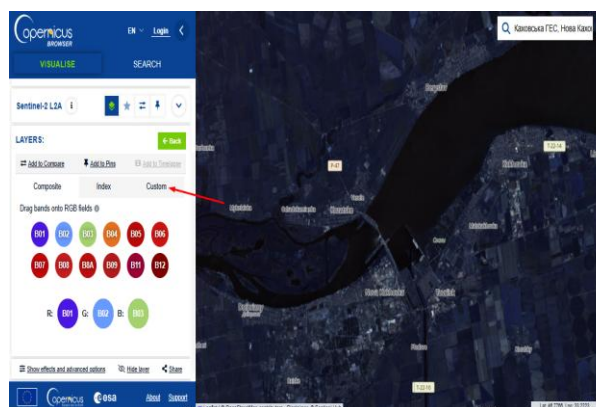


Рис. 14. Активація користувацького шару Custom Script

Розрахунок індексу NDWI дозволив отримати серію карт просторового розподілу водних об'єктів і вологих поверхонь. Стан території безпосередньо після події представлено на рис. 16, де ще зберігаються значні площі з позитивними значеннями індексу.



Рис. 15. Поле введення користувацького коду для розрахунку NDWI

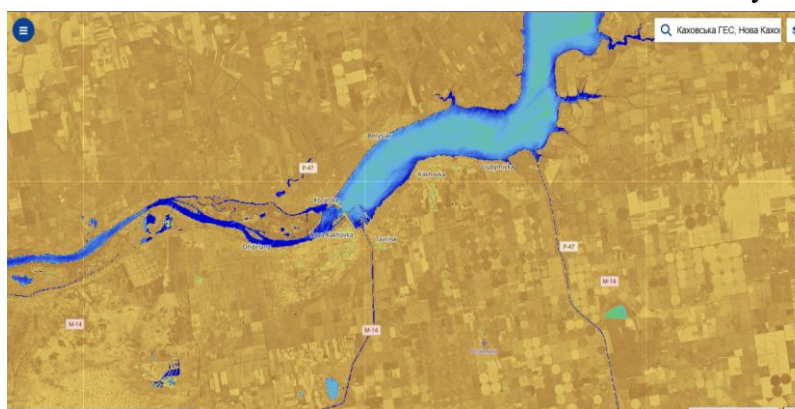


Рис. 16. Просторовий розподіл NDWI станом на 05.06.2023 р.

Подальшу динаміку трансформації території на 18.06.2023 відображено на рис. 17–18, що свідчить про швидке скорочення водних площ.

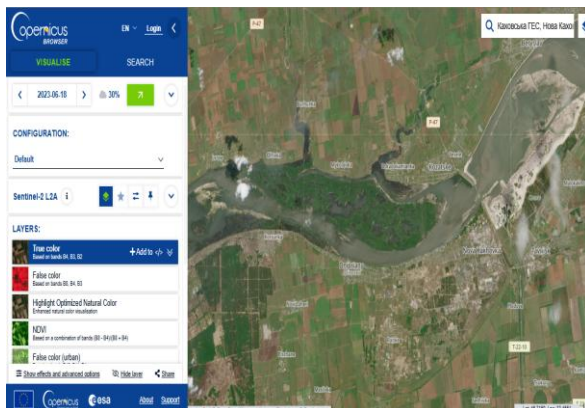


Рис. 17. Візуальний стан території (True Color) станом на 18.06.2023 р.

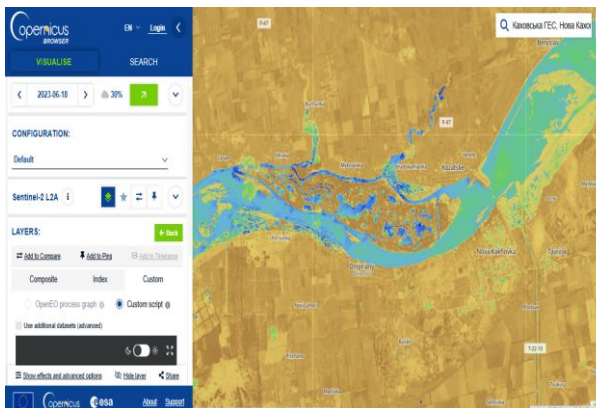


Рис. 18. Розподіл NDWI станом на 18.06.2023 р.

Результати станом на 30.06.2023 (рис. 19) демонструють домінування від’ємних значень NDWI, що вказує на повну втрату ознак водного покриття на значній частині території.

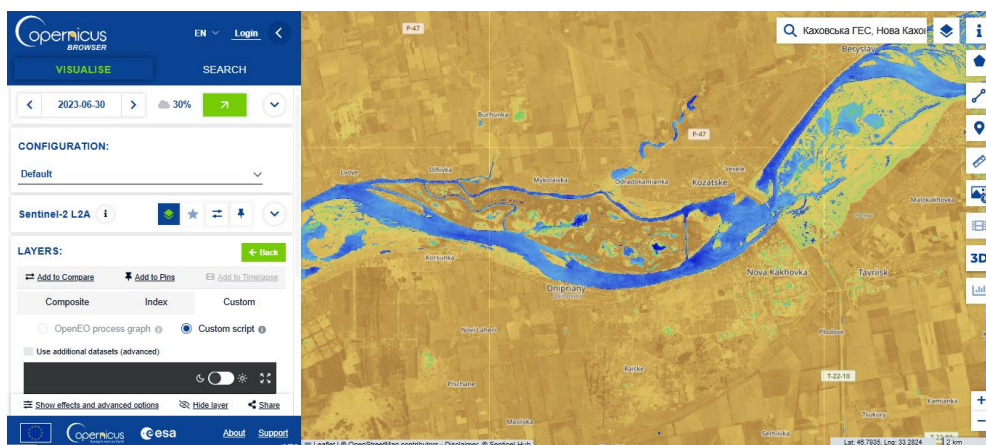


Рис. 19. Подальша деградація водних площ за NDWI на 30.06.2023 р.

Максимальний прояв водного стресу зафіксовано на початку серпня 2023 року (рис. 20–21), коли колишнє дно водосховища остаточно трансформувалося у сухі поверхні. Отримані результати підтверджують різке погіршення умов водозабезпечення земель і зниження ефективності їх використання, що підкреслює необхідність застосування ГІС і ДЗЗ для оперативного моніторингу та обґрунтування управлінських рішень.

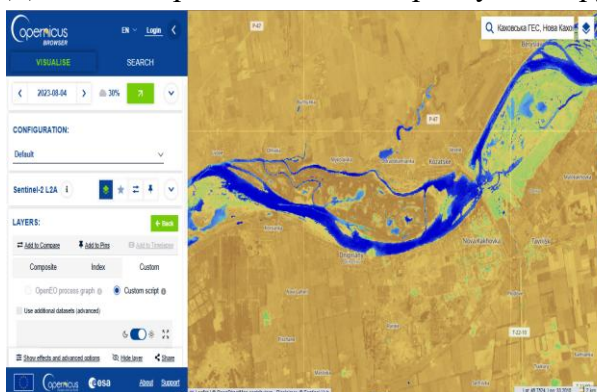


Рис. 20. NDWI та прояви водного стресу станом на 04.08.2023 р.

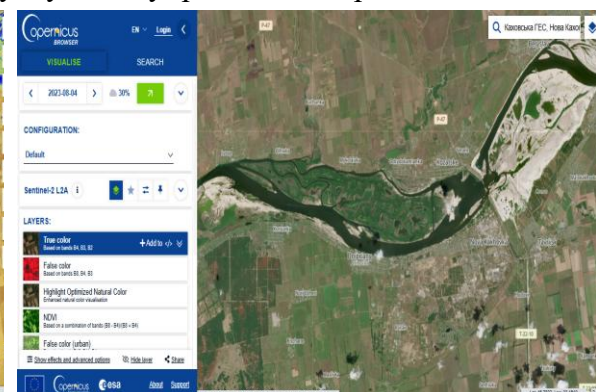


Рис. 21. Візуальне підтвердження осушення території (True Color)

Порівняння візуального зображення у режимі True Color з відповідними картами розподілу індексу NDWI (рис. 21) свідчить про високу узгодженість результатів спектрального аналізу з фактичним станом поверхні. Території, які на NDWI-картах характеризуються від’ємними значеннями індексу, на оптичному зображенні відповідають сухим або слабо зволуженим ділянкам без ознак відкритої води.

Отримані результати підтверджують, що станом на початок серпня 2023 року процес осушення досліджуваної території набув системного характеру, а колишнє дно водосховища втратило функції акумуляції та регулювання водних ресурсів. Це створює передумови для подальшої трансформації землекористування, зростання водного стресу та зниження екологічної стійкості прилеглих земель.

Підрахунок площ водної поверхні, виконаний у середовищі Google Earth Engine (рис. 22) [12], дозволив перейти від візуальної оцінки змін землекористування до їх кількісного аналізу. Автоматизована обробка супутникових знімків Sentinel-2 із застосуванням індексу NDWI забезпечила об’єктивне визначення площ ділянок, що зберігали ознаки відкритої води на різних етапах трансформації території.



Рис. 22. Підрахунок площ деградації за платформою Google Earth Engine.

Отримані значення площ водної поверхні чітко відображають динаміку деградації Каховського водосховища після порушення гідрологічного режиму. Уже впродовж перших тижнів після події спостерігається різке скорочення водної акваторії, що свідчить про високу чутливість водних екосистем до антропогенних впливів. Подальше зменшення площ води в літній період свідчить про формування стійкого водного стресу та втрату водорегулювальної функції території.

Для узагальнення результатів просторового аналізу та переходу від візуальної інтерпретації до кількісної оцінки було виконано підрахунок площ водної поверхні за результатами обробки даних у середовищі Google Earth Engine, що представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Динаміка площі водної поверхні за індексом NDWI на території дослідження

Дата зйомки	Період агрегації	Площа водної поверхні, км ²	Коментар
05.06.2023	01–07.06.2023	179.37	Початковий стан після руйнування греблі
07.06.2023	07–13.06.2023	—	Недостатня кількість валідних пікселів після маскування хмар
18.06.2023	12–18.06.2023	46.21	Початковий етап осушення
30.06.2023	20–26.06.2023	21.32	Подальша деградація водних площ

Примітка. Площа водної поверхні визначена шляхом класифікації пікселів із додатними значеннями індексу NDWI ($NDWI > 0$) на основі супутникових знімків Sentinel-2 у середовищі Google Earth Engine.

Узагальнення отриманих результатів свідчить, що впродовж червня 2023 року площа відкритої водної поверхні в межах досліджуваної території скоротилася більш ніж на 85 %, що є індикатором масштабної трансформації землекористування та втрати водорегулювальної функції Каховського водосховища.

Загалом поєднання картографічного аналізу, спектрального індексу NDWI та автоматизованого підрахунку площ дозволило комплексно оцінити масштаби трансформації землекористування в районі Каховського водосховища. Отримані результати демонструють, що застосування ГІТ і даних ДЗЗ є ефективним інструментом як для оперативного моніторингу кризових змін, так і для формування науково обґрунтованих рішень у сфері управління земельними ресурсами.

Висновки. У статті розглянуто можливості застосування ГІС і даних ДЗЗ для моніторингу стану та ефективності використання земельних ресурсів у регіональному масштабі. На прикладі території Каховського водосховища показано, що просторовий аналіз супутникових знімків дозволяє оперативно виявляти суттєві зміни землекористування, зумовлені порушенням гідрологічного режиму.

Використання багатоспектральних даних Sentinel-2 у поєднанні зі спектральним індексом NDWI дало змогу простежити динаміку скорочення водної поверхні та трансформацію колишніх водних і прибережних територій у суходіл. Отримані картографічні матеріали наочно відображають поступове зростання водного стресу та деградацію водних екосистем упродовж червня–серпня 2023 року.

Кількісна оцінка площ водної поверхні, виконана в середовищі Google Earth Engine, підтвердила результати візуального аналізу та засвідчила різке зменшення водної акваторії в перші тижні після руйнування гідротехнічної споруди. Такі зміни мають безпосередній вплив на ефективність землекористування, умови ведення сільського господарства та екологічну стійкість регіону.

Проведене дослідження підтвердило придатність індексу NDWI для моніторингу змін водної поверхні в умовах різкої трансформації територій. Водночас інтерпретація отриманих результатів потребує урахування локальних природних умов і характеру порушень, що особливо важливо для післякризових територій.

Загалом результати роботи підтверджують об'єктивну необхідність інтеграції ГІС і матеріалів ДЗЗ у практику землеустрою та управління земельними ресурсами, особливо в умовах кризових змін природного середовища. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення землепорядної документації, оцінки наслідків надзвичайних ситуацій та планування відновлення деградованих територій.

Перспективними напрямками подальших досліджень є поєднання водних і вегетаційних спектральних індексів, аналіз процесів вторинної сукцесії на осушених територіях та оцінка потенціалу їх подальшого використання в системі землекористування з урахуванням екологічних обмежень.

Список використаних джерел.

1. Бурачек, В. Г., Зацерковний, В. І., & Железняк, О. О. (2011). *Геоінформаційний аналіз просторових даних*. НДУ імені М. Гоголя.
2. Добряк, Д. С., Третяк, А. М., & Канащ, О. П. (2014). *Землеустрій в Україні: Теорія, методологія, практика*. Аграрна наука.
3. Новаковський, Л. Я. (2013). *Земельні ресурси України та їх використання*. Урожай.
4. Зацерковний, В. І., Тішаєв, І. В., & Віршило, І. В. (2016). ГІС та GPS-технології в агроєкологічному моніторингу. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 83, 112–121.
5. Зацерковний, В. І. (2014). Геоінформаційні системи і системи дистанційного зондування Землі в задачах ефективного землекористування. *Математичне моделювання в економіці*, (1), 40–48.
6. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.

7. European Commission. (2023). *Copernicus programme*. European Union. <https://www.copernicus.eu>
8. FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
9. Gao, B.-c. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3).
10. Giri, C. P. (2012). Brief overview of remote sensing of land cover. In C. P. Giri (Ed.), *Remote sensing of land use and land cover: Principles and applications* (pp. 1–10). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11964>.
11. Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>
12. Google Earth Engine. (n.d.). *Google Earth Engine Code Editor*. <https://code.earthengine.google.com/>.
13. Ibebuchi, C. C., & Abu, I.-O. (2024). Interpolation of environmental data using deep learning and model inference. *Machine Learning: Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/ad4b94>.
14. Jensen, J. R., & Cowen, D. J. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(5), 611–622.
15. Kyiv School of Economics (2024). *The impact of Russia's full-scale invasion on Ukraine's agricultural sector*. Kyiv School of Economics.
16. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
17. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized water difference (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
19. Murphy, D., De Vit, C., & Nolet, J. (2009). *Climate change mitigation through land use measures in the agriculture and forestry sectors*. International Institute for Sustainable Development.
20. Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2003). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8080–8085 <https://doi.org/10.1073/pnas.1231333100>.
21. Tomlinson, R. (2013). *Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers* (5th ed.). Esri Press.
22. United Nations. (2001). *Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development: Agriculture, land and desertification*. United Nations.
23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

References

1. Burachek, V.H., Zatserkovnyi, V. I., & Zhelezniak, O. O. (2011). Heoinformatsiyni analiz prostorovykh danykh [Geoinformation analysis of spatial data.] *NDU imeni M. Hoholia – Hohol State National University*.
2. Dobriak, D. S., Tretiak, A. M., & Kanash, O. P. (2014). Zemleustrii v Ukraini: Teoriia, metodolohiia, praktyka. [Land management in Ukraine: Theory, methodology, practice] *Ahrarna nauka – Agrarian sciences*.
3. Novakovskiy, L. Ya. (2013). Zemelni resursy Ukrainy ta yikh vykorystannia. [Zemelni resursy Ukrainy ta yikh vykorystannia.] *Urozhai - Harvest*.
4. Zatserkovnyi, V. I., Tischaiev, I. V., & Virshylo, I. V. (2016). GIS and GPS technologies in agroecological monitoring. [HIS ta GPS-tekhnologii v ahroekolohichnomu monitorynhu.] *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia - Geodesy, cartography and aerial photography*, 83, 112–121.

5. Zatserkovnyi, V. I. (2014). Heoinformatsiini systemy i systemy dystantsiinoho zonduvannia Zemli v zadachakh efektyvnoho zemlekorystuvannia. [Geographic information systems and remote sensing systems in the context of effective land use.] *Matematychni modeliuvannia v ekonomitsi - Mathematical modelling in economics*, (1), 40–48.
6. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: Esa's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>.
7. European Commission. (2023). *Copernicus programme*. European Union. <https://www.copernicus.eu>.
8. FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
9. Gao, B.-c. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3).
10. Giri, C. P. (2012). Brief overview of remote sensing of land cover. In C. P. Giri (Ed.), *Remote sensing of land use and land cover: Principles and applications* (pp. 1–10). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11964>.
11. Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211–221. <https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y>.
12. Google Earth Engine. (n.d.). *Google Earth Engine Code Editor*. <https://code.earthengine.google.com/>.
13. Ibebuchi, C. C., & Abu, I.-O. (2024). Interpolation of environmental data using deep learning and model inference. *Machine Learning: Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/ad4b94>.
14. Jensen, J. R., & Cowen, D. J. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65(5), 611–622.
15. Kyiv School of Economics (2024). *The impact of Russia's full-scale invasion on Ukraine's agricultural sector*. Kyiv School of Economics.
16. Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
17. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 703–726. <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>.
18. McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized water difference (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
19. Murphy, D., De Vit, C., & Nolet, J. (2009). *Climate change mitigation through land use measures in the agriculture and forestry sectors*. International Institute for Sustainable Development.
20. Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2003). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8080–8085. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231333100>.
21. Tomlinson, R. (2013). *Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers* (5th ed.). Esri Press.
22. United Nations. (2001). *Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development: Agriculture, land and desertification*. United Nations.
23. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.01.2025

Iryna Stakhiv¹, Victor Vorokh², Vladislav Derkach³, Sergiy Chepil⁴

¹PhD in Geological Sciences, Assistant at the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University Vasylykivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: stakhivira@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-3090-6988>

²Graduate Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylykivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: fainkucha@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-0112-8422>

³Bachelor's Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylykivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: vladd120904@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0002-7803-2224>

⁴Master's Student of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University, Vasylykivska Street, 90, Kyiv, 03022, Ukraine,
E-mail: chepil.sergey@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0007-9296-1106>

**GIS AND REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR EFFICIENT
LAND RESOURCE USE**

The article examines the possibilities of applying geographic information systems (GIS) and remote sensing (RS) data to monitor the condition and efficiency of land resource use. The study is conducted using the territory of the Kakhovka Reservoir as a case study, which has undergone significant transformations because of disturbances in the hydrological regime. Based on Sentinel-2 satellite imagery and the NDWI index, the spatial-temporal dynamics of the water surface during June–August 2023 are analyzed, enabling a quantitative assessment of the scale of water surface reduction and land transformation.

Using the Copernicus Browser and Google Earth Engine platforms, changes are mapped and a spatial interpretation of the water area is performed. The obtained results indicate a reduction of the open water surface area by more than 85% during June 2023, which serves as an indicator of large-scale land use transformation under conditions of abrupt hydrological disruption and the loss of the water-regulation function of the Kakhovka Reservoir.

Keywords: land use; geographic information systems (GIS); Earth remote sensing (RS); normalized difference water index (NDWI); Sentinel-2; land monitoring; water stress.

Fig.: 22. Table: 1. References: 23.