УДК 502:504:528.8
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.32

ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА СУПУТНИКОВИХ ІНДИКАТОРІВ ОПУСТЕЛЮВАННЯ ТА ДЕГРАДАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ В АГРОЛАНДШАФТАХ УКРАЇНИ

Тараріко О.Г. (orcid.org/0000-0002-5132-0157),
Ільєнко Т.В. (orcid.org/0000-0001-5406-5449),
Васільєв Д.П. (orcid.org/0009-0005-0578-3539),
Білокінь О.А. (orcid.org/0000-0003-2750-5925)
Інститут агроекології і природокористування Національної академії аграрних наук України
вул. Метрологічна 14, 03143, м. Київ
tarariko@ukr.net, tilienko@gmail.com, Freimaster.af@gmail.com, belokon.lena@ukr.net

В умовах змін клімату, поширення процесів опустелювання земель, інтенсифікації сільськогосподарської діяльності, урбанізації сільських територій та наслідків воєнних дій актуальним є удосконалення системи моніторингу земної поверхні з використанням супутникового інформаційного ресурсу. Обґрунтовано методичні засади формування інтегрованої системи супутникових індикаторів для геопросторового моніторингу опустелювання та деградації земель України. Вихідною передумовою є те, що окремий спектральний або кліматичний показник не може бути надійною ознакою деградації. Схожий спектральний відгук може формуватися внаслідок посухи, сезонної фенології, збирання врожаю, оголення ґрунту, зміни землекористування, пожежі, урбанізації та наслідків воєнних дій. Тому запропоновано відмовитися від спрощеного накопичення супутникових індексів і структурувати їх за специфікою розвитку деградаційних процесів земної поверхні. На основі аналізу міжнародних підходів UNCCD, SDG 15.3.1, LDN, DESIRE, DESERTLINKS та інформаційних можливостей відкритих даних Landsat, Sentinel, MODIS, NOAA AVHRR, SMAP, ERA5-Land і FLDAS сформовано шість функціональних блоків: кліматичний стрес, водний дефіцит, стан рослинного покриву протягом вегетації, деградація ґрунтів, антропогенна трансформація земного покривув результаті сільськогосподарської діяльності та урбанізації, кризова деградація. Запропоновану систему доповнено результатами апробації модифікованого індексу EVI-S та індексів NDBI і NDBIBlue за Sentinel-2. Показано, що EVI-S доцільно використовувати як уточнювальний індикатор стану та щільності рослинного покриву, але не як прямий індикатор опустелювання. NDBI та NDBIBlue рекомендовано включати до блоку антропогенної трансформації для ідентифікації забудованих поверхонь і зменшення ризику помилкового трактування урбанізаційних змін як кліматично зумовленої деградації. Сформульовано правило інтерпретації: діагностично значущою ознакою деградації є не разове порогове значення окремого індексу, а стійка просторово-часова комбінація трендів і аномалій кількох фізично незалежних показників відносно зонально та функціонально обґрунтованого референсного рівня. Запропонована система є відкритою до розширення, підтримує багаторівневий моніторинг від національного до локального рівня та передбачає обов'язкову верифікацію супутникових результатів польовими, ґрунтовими й статистичними даними. *Ключові слова:* дистанційне зондування Землі, деградація земель, опустелювання, спектральні індекси, EVI-S, NDBI, NDBIBlue, Sentinel-2, геопросторовий моніторинг.

Integrated system of satellite indicators of desertification and land degradation in the agricultural landscapes of Ukraine. Tarariko O., Ilienko T., Vasiliev D., Bilokin O.

Climate change, the spread of land desertification, the intensification of agricultural activity, the urbanisation of rural areas and the consequences of military operations make it necessary to improve land surface monitoring based on satellite data. This paper substantiates the methodological principles for building an integrated system of satellite indicators for geospatial monitoring of desertification and land degradation in Ukraine. The starting premise is that no single spectral or climatic parameter can serve as a reliable indicator of degradation. A similar spectral response may result from drought, seasonal phenology, harvesting, soil exposure, land-use change, fire, urbanisation or the impacts of warfare. We therefore propose to move away from the simple accumulation of satellite indices and to structure them according to the specific ways in which land surface degradation develops. Drawing on an analysis of international approaches (UNCCD, SDG 15.3.1, LDN, DESIRE, DESERTLINKS) and on the information capacity of open Landsat, Sentinel, MODIS, NOAA AVHRR, SMAP, ERA5-Land and FLDAS data, six functional blocks were defined: climatic stress; water deficit; vegetation condition during the growing season; soil degradation; anthropogenic transformation of land cover due to agricultural activity and urbanisation; and crisis-driven degradation. The proposed system is supplemented with the results of testing a modified EVI-S index and the NDBI and NDBIBlue indices derived from Sentinel-2 imagery. EVI-S is shown to be useful as a supplementary indicator of vegetation condition and density, but not as a direct indicator of desertification. NDBI and NDBIBlue are recommended for inclusion in the anthropogenic transformation block to identify built-up surfaces and to reduce the risk of misinterpreting urbanisation-related changes as climate-driven degradation. An interpretation rule is formulated: the diagnostically significant sign of degradation is not a one-off threshold value of a single index, but a persistent spatio-temporal combination of trends and anomalies in several physically independent indicators relative to a zonally and functionally justified reference level. The proposed system is open to extension, supports multi-level monitoring from the national to the local scale, and requires mandatory validation of satellite results with field, soil and statistical data. *Key words:* remote sensing, land degradation, desertification, spectral indices, EVI-S, NDBI, NDBIBlue, Sentinel-2, geospatial monitoring.

© Тараріко О.Г., Ільєнко Т.В., Васільєв Д.П., Білокінь О.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Опустелювання та деградація земель формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників. Кліматичні зміни проявляються на тлі різних типів землекористування, стану ґрунтового і рослинного покриву, особливостей водного режиму та інтенсивності антропогенного навантаження. Відповідно до Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням (UNCCD), опустелювання визначається як деградація земель у посушливих, напівпосушливих і сухих субгумідних районах унаслідок дії різних чинників, зокрема кліматичних коливань і діяльності людини [1]. З огляду на це окремі зміни рослинного покриву або збільшення площ відкритого ґрунту не можуть розглядатися як достатня ознака опустелювання без урахування їх причин, тривалості та просторового поширення.

Це особливо важливо під час використання супутникових даних. Значна кількість спектральних і біофізичних індексів розширює можливості моніторингу, проте їх значення не завжди мають однозначне трактування. Так, зниження NDVI може бути наслідком дефіциту вологи, природного завершення вегетації, збирання врожаю, зміни сільськогосподарської культури або погіршення стану рослинного покриву в результаті деградації та виснаження родючості ґрунтів. Підвищення температури земної поверхні (LST) може відображати як тривалі зміни температурно-вологісних умов, так і короткочасну погодну аномалію. Подібне обмеження стосується й індексу оголеного ґрунту (BSI): його високі значення на орних землях можуть спостерігатися після збирання врожаю, виконання обробітку ґрунту або до формування суцільного рослинного покриву. Тому окремі значення NDVI, LST чи BSI доцільно розглядати насамперед як ознаки певного стану земної поверхні, а висновок про розвиток деградаційного процесу робити за результатами їх комплексного та просторово-часового аналізу [2].

В основу дослідження покладено систему супутникових індикаторів, сформовану за їх зв'язком з основними механізмами деградації земель. На відміну від групування показників за типом сенсора або джерелом супутникових даних, такий підхід дає змогу розмежувати індикатори кліматичного стресу, водного дефіциту, стану рослинного і ґрунтового покриву та структурної трансформації земель сільськогосподарського призначення. У межах цього дослідження систему доповнено результатами апробації індексів EVI-S, NDBI та NDBIBlue, розрахованих за даними Sentinel-2 [3, 4].

Актуальність дослідження. Актуальність для України визначається одночасною дією кліматичної аридизації, високої інтенсивності сільськогосподарського використання земель, високого ризику прояву їх дегуміфікації та ерозійних процесів, трансформації земного покриву, а після 2022 р. – також масштабних кризових порушень ландшафтів. До останніх належать пожежі, механічне руйнування ґрунтового покриву, зміни водного режиму, пошкодження меліоративної інфраструктури та тривале виведення земель із використання. Супутникові дані мають особливе значення там, де наземні обстеження обмежені, наприклад наслідками воєнних дій або іншими обставинами.

Міжнародна система звітності за індикатором Цілі сталого розвитку (ЦСР) 15.3.1 передбачає оцінювання деградації земель за трьома основними субіндикаторами: зміни земного покриву, продуктивність земель і запаси органічного вуглецю ґрунту [5]. Такий підхід забезпечує стандартизоване оцінювання стану земель, однак не дає змоги повною мірою визначити причини та механізми розвитку деградаційних процесів. Для їх детальнішого аналізу необхідно додатково враховувати показники температурного та водного стресу, вологості ґрунту, оголення ґрунтової поверхні, пожеж і антропогенної трансформації територій. Відповідно, національна система моніторингу має узгоджуватися з принципами досягнення нейтрального рівня деградації земель (Land Degradation Neutrality, LDN) [6] та водночас передбачати ширший набір індикаторів для визначення характеру й можливих причин виявлених змін.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота є прямим виконанням заходів, визначених Концепцією боротьби з деградацією земель та опустелюванням [7] та Національним планом дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням [8], розробленими відповідно до вимог Конвенції ООН про боротьбу з опустелюванням [1]. Дослідження спрямоване на реалізацію, зокрема, заходу «Науково-методичне забезпечення застосування ГІС-технологій та технологій дистанційного зондування Землі для вирішення питань боротьби з деградацією земель та опустелюванням». Робота продовжує дослідження з подальшого удосконалення супутникового агроекологічного моніторингу та спрямована на формування відтворюваної системи індикаторів, придатної для оцінювання стану агроландшафтів і природних екосистем. Безпосередньо використано результати двох попередніх досліджень авторів: апробації модифікованого EVI-S для оцінювання рослинного покриву [3] та порівняльного аналізу індексів NDBI, NDBIBlue, NDWI й EVI-S для ідентифікації забудованих територій [4]. У цій статті ці результати не подаються як новий експеримент, а використовуються як емпірична основа для уточнення функціональної системи індикаторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У дистанційному моніторингу опустелювання та деградації земель простежується перехід від окремих спектральних індексів до поєднання супутникових показників, що характеризують різні складові деградаційного процесу. За оглядом Rivera-Marin et al. [2], основу таких досліджень становлять дані Landsat,

а найчастіше аналізують характеристики рослинності, земного покриву та опадів. Порогові значення, за якими визначають опустелювання, у різних роботах суттєво відрізняються, тому без регіонального калібрування переносити їх на інші природні території проблематично.

Поряд із вегетаційними індексами (NDVI, EVI, SAVI, MSAVI, FVC) використовують LST, альбедо, показники вологості й оголеності ґрунту. D'Acunto et al. [9] відзначають поширення моделей, у яких стан рослинності аналізують разом із характеристиками земної поверхні. Wang et al. [10] поділяють дистанційні індикатори ґрунту на прямі (мінеральний склад, органічна речовина, шорсткість, вологість) і непрямі (рослинність, земний покрив), однак констатують, що загальноприйнятої системи таких індикаторів досі немає.

У третьому виданні World Atlas of Desertification [11] класифікацію деградації за одним показником замінено концепцією «конвергенції доказів» (convergence of evidence): ризикові території виділяють за збігом кількох незалежних ознак з урахуванням локальних умов. Окремий дистанційний сигнал за такого підходу є лише однією зі складових сукупності доказів.

Xi et al. [12] поєднали FVC, TVDI, Albedo, LST, TGSI та MSAVI у Desertification Composite Index (DCI), що охоплює рослинну, температурно-водну та ґрунтову складові опустелювання. Перевірка за матеріалами БПЛА дала загальну точність 0,86. Водночас автори визнають, що вибір індикаторів у дослідженнях опустелювання залишається неоднорідним. Yue et al. [13] досягли точності 88,55 % за моделлю NDVI–Albedo в аридних умовах, але ця залежність потребує перевірки для інших природних зон.

Більша кількість індикаторів сама по собі не підвищує достовірності оцінки. Вегетаційні індекси частково дублюють один одного. LST реагує і на тривалий стрес, і на короткочасні погодні аномалії. Відкритий ґрунт на ріллі часто є наслідком обробітку. Тому показники слід відбирати з урахуванням їх фізичного змісту, інформаційної незалежності, сезонності, типу землекористування, просторового розрізнення та можливості верифікації.

Порівняльне оцінювання вегетаційних індексів NDVI, EVI, EVI2, SAVI та EVI-S засвідчило високий рівень їх кореляції, водночас EVI-S виявив відмінності за високої щільності рослинного покриву [3]. Для індексів NDBI, NDBIBlue, NDWI та EVI-S, використаних для розмежування типів поверхні за даними Sentinel-2, встановлено залежність результатів від сезону та характеру земного покриву [4]. Це вказує на обмеження однозначної інтерпретації окремих спектральних індексів і доцільність їх комплексного використання.

Отже, ключовим завданням для умов України стає відбір взаємодоповнювальних супутникових показників, пов'язаних із різними механізмами опустелювання та деградації земель. Невирішеними залишаються питання дублювання інформації, розмежування чинників деградації та реакції екосистем, визначення референсного стану, узгодження даних різного розрізнення та правил спільної інтерпретації індикаторів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішеною залишається проблема функціональної несумісності багатьох переліків індикаторів: в одному ряду часто змішуються фактори тиску, стан екосистеми, наслідки та ознаки землекористування. Через це виникає подвійний облік одного сигналу, корельовані індекси отримують надмірну вагу, а короткочасна аномалія може бути помилково класифікована як довгострокова деградація. Окремою проблемою є перенесення фіксованих порогів між природними зонами, сезонами та сенсорами без калібрування.

Для України додатковою невирішеною частиною є включення кризових порушень до системи моніторингу без методологічного змішування їх з опустелюванням. Пожежа, вирва від вибуху або підтоплення є порушенням земної поверхні, але не автоматично опустелюванням у термінах UNCCD. Тому кризові процеси доцільно фіксувати окремим блоком, а їх довгостроковий внесок у деградацію оцінювати за подальшою траєкторією відновлення або погіршення стану земель.

Новизна. Наукова новизна полягає у формуванні інтегрованої системи супутникових індикаторів, у якій показники структуровано за функціональним зв'язком із механізмами деградації: кліматичним стресом, водним дефіцитом, реакцією рослинності, змінами ґрунтової поверхні, антропогенною трансформацією та кризовими порушеннями. Систему уточнено включенням EVI-S як додаткового індикатора стану рослинності та NDBI/NDBIBlue як індикаторів антропогенної трансформації. Запропоновано діагностичний принцип, за яким деградаційний сигнал визначається не окремим порогом, а стійкою комбінацією просторово-часових змін кількох фізично незалежних показників відносно референсного стану.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення полягає у розмежуванні трьох рівнів інтерпретації: 1) фактор або тиск; 2) реакція компонента екосистеми; 3) стійка зміна стану. Таке розмежування знижує ризик причинної помилки, коли реакцію рослинності безпосередньо приписують деградації. Другий принцип – мінімізація інформаційної надлишковості: сильно корельовані індекси не повинні автоматично входити до інтегрального показника з однаковою вагою. Третій – обов'язкова прив'язка до масштабу, сезону, типу землекористування та референсного періоду.

Матеріали та методи. Дослідження має методично-синтетичний характер. Основою слугували матеріали авторської розробки системи супутни-

кових індикаторів опустелювання та деградації земель, міжнародні методичні документи UNCCD/LDN і публікації з дистанційного моніторингу. Для уточнення блоків рослинності та антропогенної трансформації використано опубліковані результати випробування EVI-S та індексів забудови на мультиспектральних даних Sentinel-2 L2A [3, 4].

Відбір індикаторів проводили за критеріями: фізична інтерпретованість; чутливість до цільового процесу; можливість побудови ретроспективного ряду; просторова узгодженість; відкритість і регулярність даних; можливість автоматизації; контроль конфундуючих факторів; наявність незалежного способу верифікації. Індикатори, що відображають подібний фізичний сигнал, розглядали як взаємозамінні або уточнювальні, а не як незалежні докази деградації.

Для багаторівневої системи визначено три часові режими: оперативний (дні–тижні) для виявлення аномалій; сезонний для оцінювання стійкості реакції; багаторічний для встановлення тренду. Просторово передбачено національний, регіональний і локальний рівні. Для кожного рівня має використовуватися власний референсний стан: багаторічна норма, стабільна еталонна територія або статистично визначений базовий період.

Виклад основного матеріалу. Аналіз міжнародних підходів до моніторингу опустелювання та деградації земель засвідчив, що використання супутникових даних поступово переходить від оцінювання окремих характеристик земної поверхні до комплексного аналізу змін природних екосистем і агроландшафтів. Водночас значна частина методичних підходів орієнтована на певні складові деградаційних процесів – стан рослинного покриву, ґрунтів, водозабезпеченість або зміни землекористування. Поєднання таких показників не завжди дає змогу встановити характер виявлених змін та розмежувати вплив кліматичних і антропогенних чинників.

Для України ця проблема має особливе значення з огляду на посилення температурного та водного стресу, інтенсивне сільськогосподарське використання земель, поширення ерозійних процесів і порушення природних комплексів унаслідок воєнних дій. За таких умов однакові зміни спектральних характеристик земної поверхні можуть мати різне походження. Зокрема, зниження вегетаційних індексів може бути пов'язане як із посухою та погіршенням стану рослинності, так і зі зміною структури посівних площ, збиранням урожаю або припиненням господарського використання земель. Це обмежує можливості оцінювання деградації за окремими показниками та потребує їх узгодженої інтерпретації.

З огляду на це сформовано інтегровану систему супутникових індикаторів опустелювання та деградації земель, в основу якої покладено функціональний зв'язок показників із чинниками, проявами та наслідками деградаційних процесів. На відміну від групування за типами супутникових даних або спектральних індексів, запропонована система групує індикатори не за джерелами даних або тематичними напрямами, а відповідно до механізмів розвитку деградаційних процесів (табл.1). Запропонований підхід передбачає розмежування показників, що характеризують чинники впливу, реакцію компонентів екосистеми та стійкі зміни стану земель. У структурі системи виділено шість взаємопов'язаних функціональних блоків: кліматичний стрес, водний дефіцит, стан рослинного покриву, зміни ґрунтової поверхні, трансформація земного покриву та кризова деградація (рис. 1). Перші чотири блоки відображають взаємозв'язки між кліматичними чинниками, водозабезпеченістю, станом рослинного і ґрунтового покриву. Антропогенну трансформацію виділено як самостійний чинник змін земного покриву, вплив якого може посилювати або послаблювати наслідки кліматичного навантаження. Окремий блок кризової деградації охоплює раптові зміни земної поверхні, зокрема внаслідок воєнних дій і техногенних впливів.

Таке розмежування дає змогу враховувати різне походження змін, не ототожнюючи кліматичні, господарські та кризові чинники деградації земель.



Рис. 1. Концептуальна структура інтегрованої системи супутникових індикаторів опустелювання та деградації земель

Функціональну структуру системи, базові й уточнювальні індикатори, їх діагностичне значення наведено в таблиці 1.

Кліматичний стрес розглядається як один з основних чинників формування передумов опустелювання. Для його характеристики доцільно використовувати стандартизований індекс опадів SPI, індекс опадів та евапотранспірації SPEI, індекс аридності AI, потенційну евапотранспірацію PET, температуру земної поверхні LST і температурний індекс стану рослинності TCI [14-17]. Ці показники характеризують різні складові кліматичних умов, що впливають на розвиток посушливих явищ, тому їх вибір залежить від мети та часового масштабу дослідження. Особливе значення для оцінювання кліма-

Таблиця 1

Функціональна структура системи та правила інтерпретації індикаторів

Функціональний блок	Основні індикатори	Додаткові дані	Діагностичне значення
Кліматичний стрес	SPI, SPEI, AI, LST, TCI	Опади, температура, PET	Кліматичні передумови посух та аридизації
Водний дефіцит	NDMI, NDWI, SMI	SMAP, FLDAS, ERA5-Land, Sentinel-1	Зміни вологості ґрунту та водного стану рослинності
Стан рослинного покриву	NDVI, VCI, VHI, EVI	EVI-S, LAI, FAPAR, CVI	Продуктивність, щільність, сезонна та стресова реакція рослинності
Ґрунтова поверхня	BSI, альбедо, індекси засолення	SOC, ґрунтові обстеження, ерозійні характеристики	Оголення ґрунту, зміни поверхні, ознаки деградації
Антропогенна трансформація	NDBI, NDBIBlue, LULC	Dynamic World, фрагментація, дані землекористування	Забудова, запечатування, зміни структури земного покриву
Кризова деградація	NBR, dNBR, MNDWI	VIIRS/MODIS Fire, SAR, офіційні дані про пошкодження	Пожежі, механічні порушення, затоплення та осушення

Примітка. SPI, SPEI та AI є розрахунковими кліматичними індексами, які можуть визначатися за супутниковими, наземними або реаналізними даними. SMAP, FLDAS, ERA5-Land і Dynamic World є інформаційними продуктами, а не спектральними індексами. SOC характеризує вміст або запаси органічного вуглецю ґрунту і потребує незалежних ґрунтових даних або валідованих моделей оцінювання. Віднесення показників до функціональних блоків визначає їх основне діагностичне призначення та не виключає використання в інших блоках.

тичних змін в Україні має спільне використання SPI та SPEI. За результатами дослідження Semenova [18], протягом 1946-2020 рр. на більшій частині території України спостерігалися додатні тренди SPI, тоді як SPEI характеризувався переважно від'ємними тенденціями. Така відмінність свідчить про необхідність врахування не лише змін кількості опадів, а й зростання атмосферної потреби у волозі в умовах потепління. Водночас кліматичні індекси характеризують передумови виникнення посушливих явищ, але самі по собі не підтверджують розвиток деградації земель.

Водний дефіцит є безпосереднім зв'язком між кліматичними умовами і станом рослинного та ґрунтового покриву. Його пропонується оцінювати за поєднанням показників вологості ґрунту з оптичними індексами, чутливими до вмісту води в рослинності. Зміни водного стану рослинного покриву добре простежуються за NDMI та NDWI [19], а відомості про вологість ґрунту дають продукти SMAP, FLDAS і ERA5-Land [20-22]. Використовувати ці джерела слід з урахуванням відмінностей у способах отримання даних та їх просторовому розрізненні. SMAP ґрунтується на супутникових мікрохвильових спостереженнях, а FLDAS і ERA5-Land є результатом моделювання процесів у системі «ґрунт – рослинність – атмосфера». Порівняно з оптичними знімками Sentinel-2, зазначені продукти мають значно нижче просторове розрізнення. Орієнтовно SMAP має розрізнення 9-36 км залежно від продукту, ERA5-Land і FLDAS близько 9-11 км. Тому, оцінюючи водозабезпеченість окремого поля, треба перевіряти, наскільки репрезентативні для нього дані, і зводити їх до спільного просторового рівня.

Стан рослинного покриву характеризує біофізичну реакцію екосистем на зміни кліматичних умов, водозабезпеченості та господарського навантаження. Основу цього блоку становлять NDVI, VCI та VHI, за якими можна оцінювати динаміку рослинності, її відхилення від багаторічної норми та прояви температурно-водного стресу [17]. Так, аналіз часових рядів NDVI для півдня України виявив зростання частоти й тривалості посух [23]. Для більш детальної характеристики можуть застосовуватися EVI, EVI-S, LAI, FAPAR та інші показники, вибір яких визначається типом рослинного покриву й особливостями території. Використання NDVI як базового індикатора обґрунтовується наявністю тривалих часових рядів супутникових спостережень, які дозволяють аналізувати зміни рослинності ретроспективно. Водночас порівняння NDVI, EVI, EVI2, SAVI та модифікованого EVI-S показало, що ці індекси тісно корелюють між собою [3]. Якщо включити їх до інтегральної оцінки одночасно, не зважаючи на цю залежність, вегетаційний сигнал буде враховано двічі. Апробація EVI-S за даними Sentinel-2 засвідчила, що він допомагає уточнити характеристики рослинності, особливо за високої щільності покриву [3]. Тому EVI-S доцільно використовувати як додатковий індикатор у рослинному блоці, але не як самостійний показник опустелювання чи універсальну заміну NDVI.

На сільськогосподарських землях значення вегетаційних індексів істотно залежать від фенологічної фази, структури посівів і сівозміни, а також родючості ґрунту. Тому оцінювання довгострокових змін необхідно проводити за зіставними періодами вегетації, з урахуванням типу рослинності та землекористування. Підставою для подальшої діагностики деградації може бути лише стійке погіршення вегетаційних характеристик, підтверджене іншими незалежними ознаками.

Блок ґрунтової поверхні спрямований для виявлення змін її спектральних і фізичних характеристик, спричинених оголенням ґрунту, ерозією, засоленням та іншими проявами деградації. Основними дистанційними показниками є індекс оголеного ґрунту BSI та альбедо, які можна доповнити даними про органічний вуглець ґрунту, ознаки засолення й чинники ерозії [24].

Найскладніше інтерпретувати ці показники для орних земель. BSI може зростати, а альбедо змінюватися через сезонне оголення поверхні після збирання врожаю, обробітку ґрунту, зміну його вологості і навіть шорсткості. Тож такі зміни ще не свідчать про деградацію. Надійнішою ознакою є стійке збільшення частки оголеної поверхні впродовж кількох років, яке не пояснюється технологічними особливостями сільськогосподарського використання та підтверджується незалежними ґрунтовими показниками.

Антропогенну трансформацію земного покриву виділено в окремий блок, щоб відстежувати зміни, спричинені господарською діяльністю. Його основу становить аналіз земного покриву та землекористування (LULC), доповнений спектральними індексами забудови NDBI і NDBIBlue. Продукти класифікації, зокрема Dynamic World, дозволяють детально простежити просторові зміни земного покриву за даними Sentinel-2 [25]. Доцільність включення NDBI та NDBIBlue підтверджується результатами їх порівняльного оцінювання для виявлення забудованих територій [4]. Проте ефективність цих індексів залежить від сезону та спектральних властивостей поверхні: відкриті ґрунти й забудова можуть мати подібні спектральні характеристики, що спричиняє помилки класифікації. Тому індекси забудови доцільно застосовувати разом із картами земного покриву, сезонними супутниковими композитами та додатковими вегетаційними й водними показниками.

Окремий блок потрібен і для того, щоб розмежувати причини змін рослинності. Якщо NDVI знижується через забудову чи зміну землекористування, це не слід трактувати як прояв кліматично зумовленого опустелювання.

Окремий блок у системі відведено *кризовій деградації*, потреба в якому зумовлена нинішніми умовами в Україні. Воєнні дії та пов'язані з ними техногенні порушення спричиняють пошкодження ґрунтового й рослинного покриву, пожежі, механічну трансформацію поверхні, порушення водного режиму та зміни землекористування. Ці процеси можуть істотно впливати на стан земель, але за походженням і динамікою відрізняються від поступових змін, пов'язаних з аридизацією клімату.

Кризову деградацію пропонується виявляти за індексами NBR і dNBR, продуктами активних пожеж MODIS і VIIRS, радіолокаційними даними SAR та методами аналізу змін поверхні [26]. Вони дають змогу визначати просторове поширення й окремі характеристики порушень, однак не завжди дозволяють встановити причину. Зокрема, мінування території за супутниковими даними достовірно визначити неможливо. Для цього потрібні офіційні геопросторові дані, а дистанційні ознаки покинутих полів, фортифікаційних споруд або деградації земного покриву можуть бути лише допоміжними.

Важливо відрізняти сам факт кризової деградації від його довгострокових екологічних наслідків. Пожежа, затоплення або механічне пошкодження ґрунту не завжди призводять до стійкої деградації. Її розвиток необхідно оцінювати за подальшою динамікою рослинного й ґрунтового покриву, характером відновлення екосистем та змінами функціонального стану земель.

Отже, запропоновані функціональні блоки відображають різні аспекти деградаційних процесів і мають неоднакове діагностичне призначення. Кліматичні та водні показники характеризують переважно умови формування стресу, вегетаційні й ґрунтові – реакцію та стан компонентів екосистем, а показники антропогенної трансформації та кризових порушень допомагають встановлювати альтернативні причини виявлених змін. Їх спільне використання створює основу для більш обґрунтованої інтерпретації супутникових спостережень.

Принципи інтеграції та інтерпретації індикаторів. Для інтегральної оцінки треба узгодити показники, які мають різний фізичний зміст, одиниці вимірювання, напрям змін і просторово-часові характеристики. Безпосереднє усереднення вихідних значень індексів є методично некоректним, оскільки однакові числові зміни різних показників можуть мати протилежне екологічне значення.

Тому в системі геопросторового моніторингу застосовано ієрархічний принцип інтеграції. Спочатку показники нормалізують і визначають напрям їх змін відносно референсного стану. Далі формуються оцінки в межах окремих функціональних блоків з урахуванням взаємозалежності індикаторів. На завершальному етапі їх можна об'єднати в інтегральну оцінку, вагові коефіцієнти якої визначають залежно від природних умов, типу екосистеми та завдань моніторингу.

Особливо слід контролювати інформаційну надлишковість. Наприклад, якщо NDVI, EVI та EVI-S увійдуть до оцінки з однаковими вагами, близькі за змістом характеристики рослинності буде враховано кілька разів. Тому перевагу слід надавати індикаторам, що доповнюють один одного й відображають різні складові деградації.

Для підвищення достовірності інтерпретації пропонуємо враховувати узгоджені несприятливі зміни щонайменше двох функціонально незалежних які зберігаються тривалий час або повторюються за зіставних сезонних умов. Це методичний принцип попереднього підтвердження деградаційного сигналу, а не універсальний кількісний критерій. Його ефективність потребує подальшої перевірки на інших територіях і за даними наземних досліджень.

Важливим елементом інтегрованої оцінки є збереження інформації про внесок окремих функціональних блоків. Поряд із підсумковою картою доцільно формувати тематичні карти складових. Вони допоможуть визначити ймовірні чинники погіршення стану земель та уникнути неоднозначного трактування інтегрального показника.

Багаторівнева організація геопросторового моніторингу та зональна адаптація. Практичне застосування системи передбачає її використання на національному, регіональному та локальному рівнях із відповідною диференціацією супутникових джерел, часових рядів і способів верифікації (табл. 2).

Зональна адаптація системи індикаторів. На національному рівні основне завдання плягає у виявленні територій зі стійкими негативними змінами стану земель та визначення загальних просторово-часових закономірностей. Для цього придатні тривалі ряди NOAA AVHRR, MODIS, Landsat, а також продукти ERA5-Land і SMAP. Результати такого аналізу можуть слугувати основою для виділення територій, що потребують детальнішого дослідження.

На регіональному рівні характер виявлених змін уточнюють з урахуванням природно-кліматичних особливостей, структури землекористування та локальних чинників деградації. Основними джерелами інформації є дані Landsat, Sentinel-1/2, тематичні карти земного покриву та показники водозабезпеченості. На локальному рівні насамперед перевіряють результати супутникового знімання за матеріалами польових обстежень, агрохімічних досліджень, даними врожайності та іншими незалежними спостереженнями. Водночас використання єдиного набору індикаторів і фіксованих порогових значень для всієї території України не дає змоги повною мірою врахувати регіональні особливості природних умов Полісся, Лісостепу та Степу.

Для Полісся найбільше значення має оцінювання змін водного режиму, стану лісових і водно-болотних екосистем, зокрема процесів підтоплення та осушення. Для їх моніторингу доцільно використовувати індекси NDWI і MNDWI, біофізичні параметри LAI та FAPAR, а також радіолокаційні дані Sentinel-1.

Для Лісостепу основну увагу слід приділяти оцінюванню продуктивності рослинності, температурно-водного стресу та стану ґрунтового покриву. Для детальнішої характеристики рослинності можуть застосовуватися індекси EVI-S, NDRE, MTVI2 і MCARI. Однак їх включення до інтегральної оцінки потребує попереднього аналізу взаємної кореляції та додаткової інформативності кожного показника.

Для Степу основними є показники аридності, температурного стресу, вологості ґрунту, багаторічної динаміки продуктивності рослинності та водозабезпеченості та площі зрошуваних земель. Відповідно, до базового набору індикаторів доцільно включати AI, TCI, VHI, SMI та показники водного режиму.

Отже, зональна адаптація передбачає збереження загальної структури системи з визначенням пріоритетних індикаторів, референсних умов та особливостей їх використання для кожної природної зони. Це дає змогу застосовувати єдині методичні принципи моніторингу з урахуванням регіональних відмінностей у розвитку деградаційних процесів.

Обговорення можливостей та обмежень запропонованої системи. Сформована система доповнює міжнародні підходи до оцінювання деградації земель, зокрема методологію Land Degradation Neutrality (LDN) та індикатор ЦСР 15.3.1, що передбачає аналіз змін земного покриву, продуктивності земель і запасів органічного вуглецю ґрунту [5, 6]. Запропонована система, крім оцінювання стану земель, передбачає використання індикаторів для виявлення чинників і можливих причин розвитку деградаційних процесів.

Водночас застосування системи потребує врахування низки методичних обмежень, пов'язаних із кореляцією між окремими спектральними індексами, відмінностями просторового й часового розрізнення супутникових даних та необхідністю узгодження багаторічних рядів спостережень, отриманих різними сенсорами. Важливим методичним питанням є також визначення базового стану території, з яким порівнюють подальші зміни рослинного покриву, вологості ґрунту та інших характеристик земної поверхні.

Важливим для інтерпретації супутникових даних є врахування особливостей землекористування. Зміни структури посівів, технологій обробітку і посівів, режимів зрошення або осушення, втрата родючості

Таблиця 2.

Багаторівнева організація моніторингу

Рівень	Основне завдання	Рекомендовані дані	Часовий горизонт	Верифікація
Національний	Скринінг зон стійких негативних змін	NOAA AVHRR/MODIS, ERA5-Land, SMAP, Landsat	10–40+ років	Національна статистика, ґрунтові та кліматичні мережі
Регіональний	Зональна деталізація причин і ризиків	Landsat, Sentinel-1/2, FLDAS/SMAP, LULC	5–20 років + сезонні ряди	Регіональні обстеження, землекористування
Локальний	Підтвердження процесу на полі/полігоні	Sentinel-2, Sentinel-1, БПЛА за наявності	Подієвий і сезонний	Польові трансекти, агрохімія, урожайність, фотофіксація

ґрунтів, їх ерозійна деградація можуть спричиняти зміни спектральних характеристик агроландшафтів, подібні до тих, що виникають під впливом кліматичних чинників. Тому для з'ясування можливих причин деградаційних процесів за можливості доцільно зіставляти супутникові показники з інформацією про землекористування, ґрунтові характеристики за результатами наземних обстежень.

Додаткового дослідження потребують можливості застосування модифікованих індексів EVI-S і NDBIBlue для оцінювання деградації земель. Результати досліджень [3, 4] свідчать про перспективність їх використання для детальнішої характеристики рослинного покриву та забудованих територій. Водночас ці індекси не можна розглядати як універсальні показники деградації земель без перевірки їхньої діагностичної інформативності за різних природних умов, сезонів і типів земного покриву.

Основним результатом дослідження є систематизація супутникових індикаторів за їхнім діагностичним призначенням та визначення принципів їх спільного використання для оцінювання деградації земель. Запропонована структура передбачає окреме оцінювання чинників впливу, реакції компонентів екосистем і стійких змін стану земель з урахуванням антропогенних та кризових порушень. Подальша апробація системи дасть змогу оцінити її придатність для комплексного геопросторового моніторингу процесів опустелювання та деградації земель в Україні.

Головні висновки

1. Обґрунтовано функціональну структуру інтегрованої системи супутникових індикаторів опустелювання та деградації земель, яка охоплює шість взаємопов'язаних блоків: кліматичний стрес, водний дефіцит, стан рослинного покриву, зміни ґрунтової поверхні, антропогенна трансформація земного покриву та кризову деградацію. Запропоноване групування дає змогу систематизувати індикатори за їхнім діагностичним призначенням, розмежовуючи чинники впливу, реакцію компонентів екосистем і стійкі зміни стану земель в результаті зміни клімату, нераціонального використання та урбонізації.

2. Встановлено методичні обмеження використання окремих спектральних індексів для діагностики деградаційних процесів. Оцінювання деградації земель має ґрунтуватися на спільному аналізі багаторічних тенденцій, сезонних аномалій, просторових особливостей території та змін відносно вихідного стану.

3. Уточнено діагностичне призначення модифікованих індексів EVI-S і NDBIBlue у складі інтегрованої системи. EVI-S доцільно використовувати як додатковий показник стану рослинного покриву, зокрема за високої його щільності, а NDBI та NDBIBlue – для характеристики забудованих територій і змін земного покриву, пов'язаних з господарською діяльністю. Їх застосування потребує врахування сезонності, типу поверхні та можливої кореляції з іншими індексами.

4. Визначено методичні принципи інтеграції супутникових індикаторів, що передбачають їх послідовне узагальнення в межах функціональних блоків із подальшим формуванням комплексної оцінки та адаптації до природних умов. Запропонована структура є основою для розроблення методики комплексного оцінювання опустелювання, деградації земель, зокрема спричинених воєнними діями, ефективність якої потребує подальшої кількісної перевірки.

Перспективи використання результатів дослідження. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію запропонованої системи в різних природних зонах України. Основними завданнями є визначення оптимального набору індикаторів для Полісся, Лісостепу та Степу, обґрунтування базових значень і критеріїв оцінювання змін, перевірка інформативності окремих показників та їх поєднань. Особливої уваги потребують узгодження супутникових даних різного просторового й часового розрізнення, оцінювання невизначеності результатів і їх перевірка за незалежними наземними спостереженнями.

Практичне використання розробленої системи передбачається для виявлення територій із несприятливими змінами стану земель, оцінювання їх просторово-часової динаміки та визначення ділянок, що потребують детальнішого обстеження. Перспективним є впровадження системи в геоінформаційні платформи моніторингу агроресурсів та екосистем із використанням QGIS, Google Earth Engine і відкритих супутникових інформаційних ресурсів. Після відповідної апробації результати можуть бути використані для інформаційного забезпечення заходів із запобігання деградації земель, адаптації аграрного виробництва до змін клімату та планування відновлення порушених агроландшафтів.

Література

1. United Nations Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa: adopted in Paris on 17 June 1994.
2. Rivera-Marin D., Dash J., Ogutu B. The use of remote sensing for desertification studies: A review. Journal of Arid Environments. 2022. Vol. 206. Art. 104829. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2022.104829.
3. Васільєв Д.П., Ільєнко Т.В. Оцінка ефективності модифікованого індексу EVI-S у системі моніторингу рослинного покриву. Агроекологічний журнал. 2025. № 2. С. 55–67. DOI: 10.33730/2077-4893.2.2025.333822.
4. Ільєнко Т.В., Васільєв Д.П. Порівняльний аналіз спектральних індексів для виявлення забудови на основі супутникових знімків Sentinel-2. Збалансоване природокористування. 2025. № 2. С. 64–78. DOI: 10.33730/2310-4678.2.2025.337148.
5. Good Practice Guidance Addendum. SDG Indicator 15.3.1: Proportion of Land That Is Degraded over Total Land Area / I. Teich, A. Zvoleff, S. Minelli et al. Bonn: UNCCD; Bern: WOCAT, CDE University of Bern, 2025. DOI: 10.48620/92560. URL: https://

reliefweb.int/report/world/good-practice-guidance-addendum-sdg-1531-proportion-land-degraded-over-total-land-area (дата звернення: 09.08.2026)
6. Synergizing global tools to monitor progress towards land degradation neutrality: Trends.Earth and the World Overview of Conservation Approaches and Technologies sustainable land management database / M. Gonzalez-Roglich, A. Zvoleff, M. Noon et al. Environmental Science & Policy. 2019. Vol. 93. P. 34–42. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.12.019.
7. Концепція боротьби з деградацією земель та опустелюванням: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 22 жовтня 2014 р. № 1024-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1024-2014-р (дата звернення: 09.08.2026).
8. Національний план дій щодо боротьби з деградацією земель та опустелюванням: затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 березня 2016 р. № 271-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/271-2016-р (дата звернення: 09.08.2026).
9. D'Acunto F., Marinello F., Pezzuolo A. Rural Land Degradation Assessment through Remote Sensing: Current Technologies, Models, and Applications. Remote Sensing. 2024. Vol. 16, № 16. Art. 3059. DOI: 10.3390/rs16163059.
10. Remote sensing of soil degradation: Progress and perspective / J. Wang, J. Zhen, W. Hu et al. International Soil and Water Conservation Research. 2023. Vol. 11, № 3. P. 429–454. DOI: 10.1016/j.iswcr.2023.03.002.
11. World Atlas of Desertification: Rethinking Land Degradation and Sustainable Land Management / ed. by M. Cherlet, C. Hutchinson, J. Reynolds et al. 3rd ed. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018. 248 p. DOI: 10.2760/06292..
12. Construction of a Desertification Composite Index and Its Application in the Spatiotemporal Analysis of Land Desertification in the Ring-Tarim Basin over 30 Years / L. Xi, Z. Qi, Y. Feng et al. Remote Sensing. 2025. Vol. 17, № 4. Art. 644. DOI: 10.3390/rs17040644.
13. Yue Y., Zhao W., Liu R. Relationships between vegetation indices and surface reflectance: Implications for detecting and monitoring sandification in arid regions. Ecological Indicators. 2025. Vol. 176. Art. 113640. DOI: 10.1016/j.ecolind.2025.113640.
14. Svoboda M., Fuchs B.A. Handbook of Drought Indicators and Indices / World Meteorological Organization, Global Water Partnership. Geneva, 2016. (Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series; 2). URL: https://www.drought.gov/sites/default/files/2020-06/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf (дата звернення: 09.08.2026).
15. Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate. 2010. Vol. 23, № 7. P. 1696–1718. DOI: 10.1175/2009JCLI2909.1.
16. Zomer R.J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database. Scientific Data. 2022. Vol. 9. Art. 409. DOI: 10.1038/s41597-022-01493-1.
17. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in Space Research. 1995. Vol. 15, № 11. P. 91–100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
18. Semenova I., Vicente-Serrano S.M. Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. International Journal of Climatology. 2024. Vol. 44, № 6. P. 1849–1866. DOI: 10.1002/joc.8416.
19. Gao B.-C. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 58, № 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
20. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission / D. Entekhabi, E.G. Njoku, P.E. O'Neill et al. Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98, № 5. P. 704–716. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918.
21. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications / A. McNally, K. Arsenault, S. Kumar et al. Scientific Data. 2017. Vol. 4. Art. 170012. DOI: 10.1038/sdata.2017.12.
22. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications / J. Muñoz-Sabater, E. Dutra, A. Agustí-Panareda et al. Earth System Science Data. 2021. Vol. 13, № 9. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
23. Karamushka V., Boychenko S., Kuchma T., Zabarna O. Trends in the environmental conditions, climate change and human health in the southern region of Ukraine. Sustainability. 2022. Vol. 14, № 9. Art. 5664. DOI: 10.3390/su14095664.
24. Nguyen C.T., Chidthaisong A., Kieu Diem P., 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, № 3. Art. 231. DOI: 10.3390/land10030231.
25. Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping / C.F. Brown, S.P. Brumby, B. Guzder-Williams et al. Scientific Data. 2022. Vol. 9. Art. 251. DOI: 10.1038/s41597-022-01307-4.
26. Yang S., Huang Q., Yu M. Advancements in remote sensing for active fire detection: A review of datasets and methods. Science of the Total Environment. 2024. Vol. 943. Art. 173273. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173273.

Дата першого надходження статті до видання: 13.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026