

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-447-456](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-447-456)

УДК 528.8:631.4:502.3:355.48

**Олександр Васильович Цвик<sup>1</sup>, Тетяна Миколаївна Малік<sup>2</sup>**<sup>1</sup>аспірант ННІ «Інститут геології»

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: [tsvik1603@gmail.com](mailto:tsvik1603@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5464-2078><sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геоінформатики ННІ «Інститут геології»

Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Київ, Україна)

E-mail: [malik.tat@gmail.com](mailto:malik.tat@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1362-8433> ResearcherID: [V-5877-2018](https://orcid.org/0000-0002-1362-8433)

## РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВПЛИВУ БОЙОВИХ ДІЙ НА ПРИДАТНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ

*Анотація.* У статті розроблено методику дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність земель для сільськогосподарського використання, що ґрунтується на інтеграції мультиспектральних та радарних супутникових даних, польових спостережень і методів машинного навчання. Обґрунтовано механізми деградації ґрунтів унаслідок воєнних дій, зокрема ерозію, контамінацію токсичними речовинами, втрату органічної речовини та ущільнення. Запропоновано використання спектральних індексів (NDVI, EVI, NBR), SAR-показників і часових трендів для побудови системи діагностичних індикаторів.

**Ключові слова:** дистанційне зондування, деградація ґрунтів, бойові дії, придатність земель, машинне навчання, агросистеми.

Табл.: 2. Рис.: 1. Бібл.: 10.

**Актуальність теми дослідження.** Повномасштабна агресія російської федерації проти України стала унікальним у світовій практиці кейсом воєнного впливу на агроландшафти, де масштаби екологічних і агроекономічних втрат набули системного та довготривалого характеру. Сільськогосподарські угіддя, що становлять основу продовольчої безпеки держави, одночасно стали просторовим континуумом бойових дій, що призвело до безпрецедентної деградації земельного фонду. Зафіксовані процеси включають руйнування ґрунтового профілю вибуховими навантаженнями, техногенне забруднення важкими металами, нафтопродуктами та вибуховими речовинами, вторинну ерозію, ущільнення ґрунтів важкою технікою, а також руйнування гідромеліоративної інфраструктури. Такі трансформації суттєво редукують агроекологічний потенціал і унеможливають сталий обіг земельних ресурсів без попереднього відновлення.

Традиційні інструменти оцінки стану земельних угідь, що передбачають польові дослідження та лабораторний аналіз, у контексті воєнних дій виявляються методологічно та практично обмеженими через ризики безпеки, часову тривалість та високі витрати. Це формує запит на дистанційні, безконтактні та високотехнологічні методи ідентифікації ступеня впливу бойових дій на землі сільськогосподарського призначення. Використання супутникових даних (мультиспектральних, гіперспектральних та радарних) у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту та геоінформаційними системами створює передумови для комплексного моніторингу агроландшафтів у реальному часі, виявлення прихованих форм деградації та картографування рівня придатності земель до сільськогосподарського використання.

В умовах війни в Україні така методика набуває не лише наукового, а і стратегічного значення: вона здатна забезпечити прийняття рішень на рівні державної політики відновлення територій, оптимізацію агровиробництва у постконфліктний період, а також інтеграцію результатів у міжнародні системи оцінки ризиків для глобальних ланцюгів постачання продовольства. Отже, створення систематизованої та структурованої методики дистанційного визначення впливу бойових дій на земельні ресурси України є одним із провідних науково-практичних завдань, яке формує сучасний підхід до питань поствоєнного відновлення та забезпечення продовольчої безпеки [1].

**Постановка проблеми.** Воєнні дії призводять до масштабних і різноманітних порушень земель, однак наявні підходи до їхнього виявлення та оцінювання залишаються фрагментованими й недостатньо адаптованими до умов України. Відсутня систематизована методика, яка б поєднувала розуміння механізмів деградації ґрунтів із комплексним використанням дистанційних, польових і метеорологічних даних. Невизначеність щодо критеріїв попередньої обробки цих даних, вибору діагностичних індикаторів та алгоритмів виявлення змін ускладнює створення надійних моделей оцінки стану земель. Додатковою проблемою є відсутність уніфікованих класифікаційних підходів до оцінювання придатності пошкоджених територій, що зумовлює труднощі в ухваленні рішень щодо відновлення та подальшого використання аграрних ресурсів. Усе це формує потребу у розробленні комплексної, валідаційно підтвердженої системи моніторингу, яка забезпечить практичну підтримку управлінських рішень у сфері відновлення та сталого розвитку аграрних територій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних дослідженнях проблема дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на сільськогосподарські землі аналізується через інтеграцію супутникових даних і алгоритмів машинного навчання. У [2] автори демонструють ефективність використання мультиспектральних та радарних знімків Sentinel для виявлення пошкоджень ґрунтового покриву, тоді як у роботі [3] розроблено інтегрований підхід із використанням статистичних індикаторів і моделей штучного інтелекту. Подібні результати демонструють автори роботи [4], які акцентують на ідентифікації земель, забруднених унаслідок бойових дій. Водночас автори підкреслюють відсутність уніфікованих критеріїв придатності земель та обмеженість польових даних для валідації результатів. Автори роботи [5] підкреслюють необхідність поєднання дистанційного зондування з лабораторними аналізами для оцінки вмісту важких металів. Водночас автори в роботі [6] демонструють значний потенціал супутникових ресурсів для розробки екологічно орієнтованих стратегій управління агросферою.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Попри значну кількість робіт, присвячених впливу воєнних дій на довкілля, низка ключових аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Передусім досі не сформована комплексна методика дистанційної ідентифікації деградації ґрунтів, яка б враховувала специфіку українських ландшафтів і типів воєнних пошкоджень. Недостатньо досліджено, які саме механізми деградації ґрунтів є домінуючими у різних зонах бойових дій та як вони відображаються в спектральних, польових та метеорологічних даних.

Невирішеним залишається питання оптимальних процедур попередньої обробки різноманітних даних, вибору діагностичних індикаторів і створення універсальних алгоритмів для надійного виявлення змін стану земель. Окремою прогалиною є відсутність уніфікованої класифікаційної системи оцінки придатності пошкоджених територій, що ускладнює адаптацію результатів досліджень до потреб управління та планування відновлення.

Загалом, наукова спільнота поки не запропонувала цілісного, валідованого інструментарію, який би дозволяв системно та відтворювано оцінювати наслідки бойових дій для земельних ресурсів та інтегрувати результати у практику відновлення аграрних територій. Саме ці невирішені аспекти становлять ядро недосліджених частин загальної проблеми.

**Метою статті** є розробка комплексної методики дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських земель шляхом інтеграції мультиспектральних даних дистанційного зондування, польових вимірювань та алгоритмів машинного навчання.

**Викладення основного матеріалу.** Інтенсивні бойові дії детермінують багатовекторний комплекс деградаційних процесів у ґрунтовому покриві, що мають як прямий, так і латентний характер. До першої групи належать механічні руйнування структури ґрунтів

під дією вибухових навантажень, які спричиняють втрату агрегатної стабільності, порушення порового простору та зменшення водопроникності. Другим блоком впливів виступають ерозійні процеси – як прискорена лінійна та площинна ерозія, так і вітрові дефляційні явища, які посилюються зняттям захисного рослинного покриву та деструкцією мікрорельєфу. Третім і найбільш критичним фактором є хімічна контамінація: акумуляція важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn), залишків вибухових речовин, паливно-мастильних матеріалів та персистентних хімічних забруднювачів (ПХЗ), які здатні мігрувати у харчові ланцюги. Четвертий аспект – техногенне ущільнення ґрунтів важкою військовою технікою, що призводить до зниження повітро- і водопроникності та блокування природних біогеохімічних циклів. Сукупність цих механізмів визначає зменшення агроєкологічного потенціалу та загрожує довгостроковою втратою продуктивності земель [3].

У контексті воєнного простору традиційні польові методи діагностики виявляються небезпечними та недостатньо репрезентативними, що актуалізує роль технологій *дистанційного зондування* Землі. Серед найінформативніших індикаторів стану агроландшафтів виділяються:

- 1) індекси рослинності (NDVI, EVI, SAVI), які дозволяють ідентифікувати редукцію фотосинтетично активної біомаси та латентні прояви стресу рослинності, зумовлені як фізичним ушкодженням ґрунту, так і токсичною дією контамінантів;
- 2) індекси ґрунтової вологи (NDMI, LSWI), чутливі до змін гідрологічного режиму ґрунтів та здатні відображати наслідки ущільнення чи руйнування капілярної структури;
- 3) радарні індикатори (SAR backscatter, coherence, polarimetric features), які забезпечують високу інформативність щодо мікрорельєфу, текстурних характеристик поверхні та вологості ґрунтів, навіть за умов суцільної хмарності;
- 4) теплові сигнали (LST, emissivity), що можуть відображати порушення водного балансу, локальні зони підвищеної температури внаслідок вибухів та згоряння органічної речовини;
- 5) мульти- та гіперспектральний аналіз, який забезпечує детекцію специфічних спектральних підписів забруднювачів та стресових станів рослинності.

Синергія цих показників створює можливості для комплексної діагностики як явних, так і прихованих форм деградації земельних ресурсів [7, с. 278].

Ключовим аналітичним завданням у дистанційній ідентифікації впливу бойових дій є виявлення просторово-часових змін (change detection). Серед традиційних методів застосовуються:

- 1) порогові підходи (image differencing, vegetation index differencing), які дозволяють фіксувати різницю у спектральних характеристиках між довоєнними та післявоєнними періодами;
- 2) посткласові порівняння (post-classification comparison), що передбачають незалежну класифікацію даних за часовими зрізами з подальшим аналізом розбіжностей;
- 3) методи часових рядів (BFAST, CUSUM, LandTrendr), які здатні виявляти переломні точки (breakpoints) у довготривалій динаміці вегетаційних та ґрунтових індикаторів;
- 4) сучасний етап розвитку дисципліни характеризується інтеграцією методів машинного навчання, що відкривають нові горизонти для автоматизованої класифікації стану земель;
- 5) алгоритми ансамблевої класифікації (Random Forest, Gradient Boosting), які демонструють високу стійкість до шумових даних;
- 6) методи опорних векторів (SVM) та нейронні мережі (CNN, LSTM, Transformer), що забезпечують просторово-часову інтерпретацію змін та виявлення комплексних нелінійних закономірностей.

Таким чином, поєднання мультиспектральних і радарних даних із передовими алгоритмічними підходами формує підґрунтя для побудови інтегрованих моделей оцінки придатності земель у постконфліктному середовищі. Це дозволяє не лише картографувати ступінь деградації, але й прогнозувати траєкторії відновлення агроландшафтів на територіях України, що зазнали руйнівного впливу війни [8].

У контексті зазначених теоретико-методологічних засад фундаментальним етапом постає визначення *вхідних джерел даних*, які забезпечують багаторівневу репрезентацію впливу бойових дій на агроландшафти та формують емпіричне підґрунтя для розробки інтегрованих моделей оцінки придатності земель.

Системоутворювальним елементом інформаційної бази виступають космічні дані дистанційного зондування Землі, зокрема мультиспектральні знімки Sentinel-2 та Landsat-8/9, які дозволяють детектувати спектральні відгуки рослинності та ґрунтового покриву з високою точністю у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. Доповненням є дані SAR-спостережень Sentinel-1, що забезпечують незалежність від погодних умов і денного освітлення та відкривають можливості аналізу мікрорельєфу й структурних характеристик поверхні. Для задач, що потребують детальної просторової розрізненості, релевантними є комерційні супутникові платформи (PlanetScore, SkySat), які здатні забезпечувати субметрову розрізненість та оперативне оновлення знімків у динаміці бойових дій [9, с. 326].

Другим критично важливим блоком є *довідкові та векторні шари* – кадастрові межі полів, транспортна інфраструктура, гідромережа, топографічні карти, які забезпечують просторову структурування даних та дозволяють інтегрувати супутникову інформацію у контекст правових і господарських реалій.

Для калібрування й валідації дистанційних спостережень необхідним є залучення польових даних: проби ґрунтів для хімічного аналізу (вміст важких металів, залишків вибухових речовин, нафтопродуктів), визначення агрофізичних параметрів (щільність, вологість, гранулометричний склад), а також фотодокументація й опитування локальних аграрних суб'єктів. Такі дані формують референсну основу для побудови моделей машинного навчання та оцінки їхньої точності.

Нарешті, важливим модулем інформаційної системи виступають метеорологічні та гідрометеорологічні дані (температура, кількість опадів, ґрунтова вологість, рівні ґрунтових вод), які визначають динаміку агроландшафтів та дозволяють відокремлювати воєнно зумовлені пошкодження від природних кліматичних флуктуацій.

Таким чином, інтеграція мультиджерельних супутникових, кадастрових, польових та метеорологічних даних забезпечує багатовимірний інформаційний каркас, без якого неможливо здійснити комплексну ідентифікацію впливу бойових дій на сільськогосподарські землі України [6, с. 60–61].

Отримані дані слугують основою для розробки методики їх обробки та аналізу з метою дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на землі.

На першому етапі формування інформаційної бази здійснюється попередня обробка даних, яка є критичною умовою коректності подальших аналітичних процедур. Вона включає:

- атмосферну корекцію (методи Sen2Cor, LEDAPS, LaSRC), що дозволяють мінімізувати вплив атмосферних аерозолів і водяної пари на спектральні характеристики;
- маскуванню хмарності та тіней (Fmask, QA bands, Sen2Cloudless), без чого аналіз у видимому та ближньому ІЧ-діапазоні може бути викривленим;

- фільтрацію радарного шуму (speckle filtering) у SAR-даних (Lee, Frost, Refined Lee), яка підвищує інтерпретаційність радіолокаційних ознак;
- геометричну корекцію та геоприв'язку для забезпечення просторової сумісності мультиджерельних даних;
- ресемплінг до єдиного просторового розділення (наприклад, 10 м для Sentinel- 2 і Sentinel-1), що дозволяє об'єднувати різні датасети в одному аналітичному полі.

Практична реалізація цього етапу можлива в середовищах Google Earth Engine, SNAP (ESA), QGIS або через бібліотеки Python (rasterio, GDAL, sentinelsat) [10, с. 449].

Наступним кроком є формування системи *діагностичних ознак*, які відображають реакцію ґрунтово-рослинного комплексу на бойові впливи:

- Спектральні індекси: NDVI, EVI (стан рослинності), NDMI (вологість), NBR (пожежні впливи, вибухові навантаження), SAVI (ґрунтовий фон).
- Текстурні показники (GLCM – Grey Level Co-occurrence Matrix) з оптичних та SAR-знімків: ентропія, контраст, гомогенність, що відображають мікроструктуру поверхні.
- Поляриметричні ознаки SAR: коефіцієнти розсіювання (VV, VH, HH), крос-поляризаційні співвідношення, коваріаційні матриці, що чутливі до змін рельєфу та вологості.
- Часові тренди: динаміка індексів у багаторічному ряді (наприклад, спад NDVI протягом кількох сезонів як наслідок втрати продуктивності).

Таким чином формується багатовимірний простір ознак, який далі використовується для виявлення змін і класифікації земель.

Для ідентифікації впливу бойових дій застосовуються різномірневі методи виявлення змін (табл. 1).

Таблиця 1 – Алгоритми виявлення змін

Група методів	Сутність	Практичне застосування	Переваги / Обмеження
<b>Порогові методи</b>	Порівняння значень індексів (NDVI, backscatter) між періодами та визначення змін за фіксованим порогом	Виявлення зниження біомаси після вибухів чи пожеж	Простота, швидкість / низька чутливість, залежність від масштабу
<b>Image differencing</b>	Обчислення різниці пікселів у спектральних / радарних каналах між довоєнним та післявоєнним періодами	Ідентифікація нових кратерів, вирубки, ушкоджених полів	Висока деталізація / чутливість до атмосферних і сезонних факторів
<b>Посткласові методи</b>	Незалежна класифікація знімків у різні моменти часу з подальшим порівнянням результатів	Карта «збережені / змінені» землі	Добра інтерпретація / залежність від точності класифікації
<b>Time-series break detection (BFAST, CUSUM, LandTrendr)</b>	Аналіз часових рядів індексів для виявлення «точок зламу»	Виявлення моментів деградації чи різкого падіння NDVI	Висока чутливість до довгострокових змін / потреба у стабільних часових рядах

Джерело: розроблено авторами.

На практиці оптимальним є *гібридний підхід*, коли порогові методи застосовуються для швидкого виявлення аномалій, а часовий аналіз та алгоритми машинного навчання уточнюють і класифікують тип змін [3].

Важливо зазначити, що застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити точність і автоматизованість процесів дистанційної ідентифікації деградації земель. Вибір методів залежить від типу даних – просторових, спектральних або часових рядів (табл. 2).

Таблиця 2 – Алгоритми машинного навчання

Алгоритм	Тип даних / завдання	Сильні сторони	Обмеження
<b>Random Forest (RF)</b>	Класифікація багатовимірних спектральних ознак	Інтерпретованість, стійкість до шуму	Менш ефективний на великих часових рядах
<b>XGBoost</b>	Класифікація / регресія, мультиспектральні індекси	Висока точність, оптимізація пам'яті	Складніша модифікація параметрів
<b>SVM</b>	Класифікація деградованих ділянок	Добре працює на великих наборах даних	Висока обчислювальна вартість при великих вибірках
<b>CNN (Convolutional Neural Networks)</b>	Обробка зображень (мульти-/гіперспектральні, SAR)	Виявлення просторових патернів, текстур	Вимагає великих датасетів
<b>LSTM / Temporal CNN</b>	Аналіз часових рядів індексів (NDVI, backscatter)	Виявлення довготривалих змін, сезонності	Схильність до перенавчання
<b>Transformer-моделі</b>	Часові ряди великих обсягів даних	Висока здатність до виявлення складних залежностей	Високі обчислювальні витрати

Джерело: розроблено авторами.

Інтеграція класичних алгоритмів (RF, XGBoost, SVM) із сучасними глибинними архітектурами (CNN, LSTM, Transformer) формує багаторівневу систему аналізу, здатну поєднати просторові та часові закономірності. Це відкриває можливість створення комплексної моделі оцінки придатності земель після бойових дій [8].

Побудова моделей класифікації земель за допомогою алгоритмів машинного навчання є лише проміжним етапом; остаточна інтерпретація результатів повинна відбуватися у формі придатності земель до агровикористання, що досягається через систему «прапорів ризику». Такий підхід ґрунтується на багатокритеріальному аналізі, де кожна ділянка отримує статус «придатна», «частково придатна» або «непридатна» відповідно до сукупності діагностичних індикаторів.

Критерії формування прапорів включають:

- ерозійні процеси – визначаються за морфометричними параметрами рельєфу, спектральними та радарними індикаторами зміни поверхні;
- контамінація токсичними речовинами (важкі метали, паливно-мастильні матеріали, продукти вибухів), підтверджена лабораторними аналізами ґрунтів і спектросигнатурами у VNIR / SWIR діапазонах;
- втрата органічної речовини та дегуміфікація – оцінюється за космічними показниками біомаси (NDVI, EVI, NBR) у поєднанні з польовими даними;
- ущільнення ґрунту – виявляється на основі SAR-ознак та даних in-situ (щільність, водопроникність).

Таким чином, алгоритми машинного навчання формують *базову карту стану земель*, після чого застосовується багатокритеріальна логіка, що переводить числові показники у зрозумілу систему категорій ризику [4, с. 112].

На рис. 1 подано концептуальну схему формування прапорів ризику придатності земель. На першому етапі акумулюються вхідні дані різної природи: супутникові мультиспектральні та радарні знімки, результати польових досліджень і метеорологічні показники. Далі ці дані трансформуються в аналітичні індикатори, що характеризують ключові механізми деградації ґрунтів: ерозійні процеси, рівень контамінації, втрату органічної речовини та ступінь ущільнення. На основі нормативних (санітарно-екологічних) та емпіричних порогів формується класифікаційна логіка, яка дозволяє віднести кожен ділянку до одного з трьох класів ризику: придатні (зелений), частково придатні (жовтий) та непридатні (червоний).



Рис. 1. Логіка системи «прапорів ризику»

Джерело: розроблено авторами.

Для забезпечення високої репрезентативності та статистичної надійності даних застосовується *просторово-стратифікований відбір проб*, який дозволяє врахувати гетерогенність агроландшафтів і ступінь деградації в межах бойових зон. Стратифікація території проводиться за ключовими ознаками, такими як тип ґрунту, рельєф, інтенсивність бойових дій та стан рослинного покриву. У межах кожної страти відбір точок здійснюється випадково або за систематичною схемою, що мінімізує вибіркочну похибку та забезпечує статистичну представницькість. Розмір вибірки визначається з урахуванням дисперсії основних індикаторів, таких як NDVI, вологість ґрунту та концентрація важких металів, а також з огляду на бажаний рівень довіри та допустиму похибку.

Просторово-стратифікований дизайн вибірок дозволяє зменшити дисперсію оцінок та підвищити чутливість моделей до локальних деградаційних процесів. Отримані польові дані формують референсну основу для калібрування супутникових індикаторів та алгоритмів машинного навчання. Валідація включає кореляційний аналіз між дистанційними показниками, такими як NDVI, SAR backscatter та текстурні ознаки, та польовими вимірюваннями, що характеризують вміст органічної речовини, щільність ґрунту та концентрацію контамінантів. Крім того, проводиться оцінка точності класифікації за допомогою метрик, таких як confusion matrix, Карра та F1-score, що дозволяє перевірити відповідність прогнозних карт фактичним польовим даним. Для підвищення надійності системи здійснюється чутливісний аналіз порогів системи прапорів ризику, який дозволяє оцінити стабільність класифікаційних рішень при зміні критичних значень індикаторів.

Тож, інтеграція польових вибірок із дистанційними даними забезпечує кількісну перевірку достовірності моделей та формує об'єктивну основу для картування придатності земель і визначення пріоритетів відновлення територій, що зазнали впливу бойових дій [5].

У рамках валідації моделей дистанційної класифікації земель застосовується комплекс кількісних метрик точності, що включає показники загальної точності (accuracy), прецизійності (precision), повноти (recall), F1-score, коефіцієнт узгодженості Каппа (Cohen's Kappa) та площу під ROC-кривою (ROC-AUC). Для регресійних моделей оцінка здійснюється через стандартні статистичні індикатори похибки: середньоквадратичну (RMSE) та середню абсолютну помилку (MAE), а також коефіцієнт детермінації  $R^2$ , що відображає частку пояснюваної дисперсії.

Поряд із цим, критичною є оцінка просторової невизначеності результатів за допомогою карт невизначеності (uncertainty maps), які візуалізують локальні області підвищеної похибки або слабкої надійності прогнозу [9, с. 329].

Після оцінки придатності земель та валідації моделей дистанційного зондування природним продовженням є практична інтерпретація результатів, яка дозволяє трансформувати аналітичні висновки у конкретні управлінські та агротехнічні рішення. Карти придатності та прапори ризику можуть слугувати основою для реставрації деградованих ґрунтів, планування сівозмін та агротехнічних заходів, спрямованих на відновлення продуктивності земель, а також для страхових розрахунків і механізмів компенсації втрат, викликаних бойовими діями. Інтеграція цих даних у геоінформаційні системи (GIS) та системи підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems, DSS) надає органам управління можливість оперативного планування, просторового аналізу та пріоритезації зон рекультивзації чи обмеженого використання.

Поряд із практичною реалізацією, критичною є оцінка етичних, юридичних та безпекових аспектів роботи з даними. Врахування конфіденційності та ризику публікації точних координат позицій або критичної інфраструктури є обов'язковим, оскільки публікація геопросторових даних у зоні бойових дій може становити безпосередню загрозу безпеці. Доступ до польових та дистанційних даних повинен контролюватися, а будь-які роботи на територіях, уражених бойовими діями, мають бути узгоджені із заходами безпеки, що включають мінімізацію перебування персоналу в небезпечних зонах та використання віддалених методів збору даних, таких як безпілотні літальні апарати або супутниковий моніторинг [2, с. 482].

Таким чином, поєднання наукової оцінки стану земель, практичної реалізації результатів у відновленні та агротехнічному плануванні, а також суворе дотримання етичних і безпекових стандартів забезпечує комплексний підхід до управління територіями, постраждалими від бойових дій.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження сформовано методологічний каркас дистанційної ідентифікації впливу бойових дій на придатність сільськогосподарських земель, який поєднує супутникові мультиспектральні й радарні дані, алгоритми машинного навчання та систему багатокритеріальних індикаторів. Запропонований підхід дозволяє діагностувати механічні, хімічні та структурні форми деградації ґрунтів, формувати карти придатності з урахуванням ризиків та забезпечувати обґрунтовану основу для управлінських і агротехнічних рішень у повоєнному відновленні. Інтеграція отриманих результатів у геоінформаційні системи та DSS підвищує ефективність планування заходів з реставрації ґрунтів, страхування аграрних ризиків і стратегічного управління територіями.

Подальший розвиток тематики передбачає вдосконалення алгоритмів інтеграції мультиджерельних даних, зокрема гіперспектральних і безпілотних спостережень, а також розробку адаптивних моделей прогнозування довгострокових наслідків воєнної деградації агроландшафтів. Особливої уваги потребує міждисциплінарний аналіз, що поєднає екологічні, агрономічні та соціально-економічні аспекти відновлення земельних ресурсів України.

### **Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.**

Під час написання цього матеріалу автори використовували ChatGPT для перевірки англійської граматики в розширеній анотації. Після використання цього інструменту/сервісу автори переглянули та відредагували зміст за потреби і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

**Список використаних джерел**

1. Солоха, М. О., Коньшин, Р. В., & Дегтярьов, В. В. (2024). Ідентифікатори впливу воєнних дій на ґрунтовий покрив за супутниковими даними. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*, (137), 235–244. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.29>.
2. Bonchkovskiy, O. S., Ostapenko, P. O., Shvaiko, V. M., & Bonchkovskiy, A. S. (2023). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyivska territorial hromada). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 474–487. <https://doi.org/10.15421/112342>.
3. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562>.
4. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnyi, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, 27(7), 107–117. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107>.
5. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., Ilchenko, V., & Solokha, M. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. <https://doi.org/10.12911/22998993/192669>.
6. Tarariko, O., Demyanyuk, O., Ilenko, T., Solokha, M., & Lykhovyd, P. (2025). Satellite information resource – modern potential for solving ecological problems of Ukraine’s agrosphere. *Balanced Nature Using*, (1), 55–71. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.328357>.
7. Кибальна, І. В., & Гапеев, С. М. (2023). Визначення підходів до збитків родючості сільськогосподарських угідь внаслідок бойових дій методами дистанційного зондування. *Тиждень студентської науки – 2023: матеріали 78-ої студентської науково-технічної конференції (Дніпро, 24–28 квітня 2023 року)*, 277–279. НТУ «ДП».
8. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., & Vega-Garcia, C. (2023). War and deforestation: Using remote sensing and machine learning to identify the war-induced deforestation in Syria 2010–2019. *Land*, 12(8), 1509. <https://doi.org/10.3390/land12081509>.
9. Jorgenson, A. K., Clark, B., & Givens, J. E. (2012). The environmental impacts of militarization in comparative perspective: An overlooked relationship. *Nature and Culture*, 7(3), 314–337. <https://doi.org/10.3167/nc.2012.070304>.
10. Saxena, A. (2023). Deteriorating environmental quality with special reference to war and its impact on climate change. *National Academy Science Letters*. <https://doi.org/10.1007/s40009-023-01279-y>.

**References**

1. Solokha, M. O., Konshyn, R. V., & Dehtiarov, V. V. (2024). Ідентифікатори впливу воєнних дій на ґрунтовий покрив за супутниковими даними [Identifiers of the impact of military actions on soil cover using satellite data]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya: Silsko-hospodarski nauky – Tavriya Scientific Bulletin. Series: Agricultural Sciences*, 137, 235–244. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.137.29>.
2. Bonchkovskiy, O. S., Ostapenko, P. O., Shvaiko, V. M., & Bonchkovskiy, A. S. (2023). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyivska territorial hromada). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32, 474–487. <https://doi.org/10.15421/112342>.
3. Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103562. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103562>.
4. Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnyi, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, 27(7), 107–117. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107>.
5. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., & et al. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. <https://doi.org/10.12911/22998993/192669>.

6. Tarariko, O., Demyanyuk, O., Iliencko, T., Solokha, M., & Lykhovyd, P. (2025). Suputnykovyi informatsiinyi resurs – suchasnyi potentsial dlia vyrishennia ekolohichnykh problem ahrosfery Ukrainy. [Satellite information resources – modern potential for solving environmental problems in Ukraine's agricultural sector.] *Zbalansovane pryrodokorystuvannia - Balanced use of natural resources*, 2025, 1, 55–71. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.328357>.

7. Kybalna, I. V., & Hapieiev, S. M. (2023). Vyznachennia pidkhodiv do zbytkiv rodjuchosti silskohospodarskykh uhid' vnaslidok boiovykh dii metodamy dystantsiinoho zonduvannia [Determination of approaches to the loss of fertility of agricultural lands due to military actions using remote sensing methods]. *Tyzden' students'koi nauky – 2023: Materialy 78-oi students'koi naukovo-tekhnichnoi konferentsii (Dnipro, 24–28 kvitnia 2023 roku) – Student Science Week – 2023: Proceedings of the 78th Student Scientific and Technical Conference (Dnipro, April 24–28, 2023)*, 277–279. Dnipro: NTU «DP».

8. Daiyoub, A., Gelabert, P., Saura-Mas, S., Vega-Garcia, C. War and Deforestation: Using Remote Sensing and Machine Learning to Identify the War-Induced Deforestation in Syria 2010–2019. *Land*, 2023, 12 (8), 1509. <https://doi.org/10.3390/land12081509>.

9. Jorgenson, A. K., Clark, B., Givens, J. E. The Environmental Impacts of Militarization in Comparative Perspective: An Overlooked Relationship. *Nat. Cult.*, 2012, 7, 314–337. DOI: 10.3167/nc.2012.070304.

10. Saxena, A. Deteriorating Environmental Quality with Special Reference to War and Its Impact on Climate Change. *Natl. Acad. Sci. Lett.*, 2024, 47, 447–450. <https://doi.org/10.1007/s40009-023-01279-y>.

Дата першого надходження статті до видання: 20.12.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 05.01.2026

UDC 528.8:631.4:502.3:355.48

**Oleksandr Tsvyk<sup>1</sup>, Tetiana Malik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>PhD Student

Institute of Geology Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [tsvik1603@gmail.com](mailto:tsvik1603@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0006-5464-2078>

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Geoinformatics Institute of Geology

Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

**E-mail:** [malik.tat@gmail.com](mailto:malik.tat@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1362-8433>. **ResearcherID:** [V-5877-2018](https://orcid.org/0000-0002-1362-8433)

## DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR REMOTE IDENTIFICATION OF THE IMPACT OF MILITARY ACTIONS ON AGRICULTURAL LAND SUITABILITY

*The article presents a comprehensive methodology for remote identification of the impact of military actions on the suitability of land for agricultural use, based on the integration of multispectral and radar satellite data, field observations, and machine learning tools. The key mechanisms of soil degradation induced by military factors are substantiated, including erosion processes, contamination by toxic substances, loss of organic matter, mechanical destruction, and compaction. It is shown that effective monitoring requires the use of spectral indices (NDVI, EVI, NBR), SAR indicators, texture variability characteristics, and multi-year temporal trends, which form the basis of a system of diagnostic indicators. An algorithmic approach for detecting changes in land condition is proposed, combining threshold methods, time series analysis, and machine learning-based classification and regression methods (Random Forest, CNN, LSTM, Transformer). Special attention is paid to modeling nonlinear relationships between degradation indicators and land suitability levels.*

*Within the study, a "risk flag" classification system was developed to differentiate territories according to suitability categories – suitable, partially suitable, and unsuitable for agricultural production. Approaches for model validation are presented, including performance assessment using metrics such as accuracy, F1-score, Kappa, and ROC-AUC, as well as spatial uncertainty analysis, allowing the identification of areas with the highest methodological vulnerability. The importance of comprehensive mapping of results in a GIS environment and subsequent integration into decision support systems (DSS) is emphasized.*

*The practical significance of the developed methodology lies in its applicability for planning land restoration after military actions, assessing risks for agricultural production, improving agrotechnical measures, insurance analysis, and forming state policy on the return of damaged territories to productive use. Particular emphasis is placed on ethical, legal, and security aspects of working with data in conflict zones, which defines the framework for the responsible use of research results in post-conflict recovery contexts.*

**Keywords:** remote sensing; soil degradation; military actions; land suitability; machine learning; agrosystems.

**Fig.:** 1 Table; 2. **References:** 10.