
ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ТА ГЕОПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВИПАДКІВ ПОКИНУТИХ ДІЛЯНОК ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ, ПОРУШЕННЯ ТА ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ВНАСЛІДОК ВІЙНИ В СУМСЬКІЙ ОБЛАСТІ УКРАЇНИ: СИСТЕМАТИЧНИЙ ОГЛЯД

В. А. БОГДАНЕЦЬ,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

E-mail: v_bogdanets@nubip.edu.ua

ORCID:0000-0003-0051-1778

Є. М. БЕРЕЖНЯК,

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

E-mail: beregniakem@nubip.edu.ua

ORCID:0000-0001-5945-1285

Д. Ю. БРОВКО,

*аспірант * (керівник — доц. Є.М. Бережняк)*

E-mail: brovko.d@nubip.edu.ua

ORCID:0009-0007-0438-387X

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. Повномасштабне військове вторгнення в Україну спричинило багатомірні трансформації сільськогосподарських ландшафтів, ґрунтового покриву та екосистем. Сумська область, розташована вздовж північно-східного кордону з Російською Федерацією, являє собою критично важливий регіон, який постраждав від інтенсивних бойових дій, тривалих артилерійських обстрілів та постійних прикордонних зіткнень у досліджуваний період з 2022 по травень 2026 року. Дана стаття систематично оцінює застосування методів дистанційного зондування та геопросторового моделювання для виявлення, кількісної оцінки та моніторингу покинутості земельних ділянок, тобто виведення таких земель з активного землекористування, спричиненого війною, а також фізичних порушень ґрунтового покриву, хімічного забруднення та ширшої деградації навколишнього середовища. Поєднуючи останні наукові публікації щодо війни в Україні та порівняльні глобальні приклади (Сирія, Ірак та Судан), оцінюється ефективність інтегрування різносенсорних даних, що включають оптичні (Sentinel-2, Landsat), радіолокаційні системи із синтезованою апертурою (SAR; Sentinel-1), теплові

та дуже високороздільні (VHR; Maxar, WorldView) платформи, а також передові алгоритми машинного та глибокого навчання (Random Forest, Deep Learning) й аналізу часових рядів (FANTA, апроксимація кривої з двома періодами). Результати дослідження показують, що хоча геопросторове моделювання є незамінним інструментом для швидкої, масштабної та безконтактної оцінки збитків в умовах активного воєнного конфлікту, зберігаються значні критичні пробіли досліджень, а саме відокремлення короткострокового припинення сільськогосподарського використання від фактичного виведення таких земель з активного землекористування, спричиненого війною, перевірку таких фактів за умови серйозного дефіциту достовірних наземних даних та управління чутливою геопросторовою інформацією. Цей систематичний огляд висвітлює існуючі методологічні прогалини та окреслює майбутні перспективи, необхідні для побудови гармонізованої системи просторового моніторингу, здатної керувати постконфліктним відновленням та екологічною ремедіацією на основі фактичних даних ДЗЗ у масштабі регіону.

Ключові слова: дистанційне зондування; геопросторове моделювання; покинуті земельні ділянки; деградація ґрунтів; збройний конфлікт; машинне навчання; оцінювання збитків для земель.

Актуальність дослідження

Проведення такого систематичного огляду, заснованого на принципах відкритої науки, є актуальним завданням, так як масштабні пошкодження, збитки та подальша деградація ландшафтів Сумщини внаслідок воєнних дій зумовили стрімке зростання кількості як вітчизняних, так і міжнародних наукових досліджень. Вказані праці базуються на різних методологіях дистанційного зондування та різноманітних підходах до геопросторового моделювання, тому виникає гостра необхідність в єдиному аналітичному структуруванні досягнутих результатів. Систематичний огляд дозволить об'єднати розрізнені дані, виявити методологічні прогалини та сформувати цілісну наукову базу, необхідну для подальшого моніторингу, оцінювання збитків і розробки стратегій відновлення екосистем регіону.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Масштаби військових операцій після повномасштабного вторгнення росії в Україну у 2022 році призвели до безпрецедентних порушень сільськогосподарської інфраструктури та екологічної стабільності [21, 37]. Сумська область, що географічно розташована на передовій північно-східного напрямку військового конфлікту, пережила наслідки традиційної механізованої війни, обстрілів важкою артилерією та зміни динаміки контролю територій [11, 21]. Це призвело до масового занедбання земельних ділянок, глибоких змін фізичного покриття та значної деградації земель в одній з найпродуктивніших сільськогосподарських зон України [6, 21].

Моніторинг екологічних наслідків сучасних високоінтенсивних бойових дій створює серйозні логістичні та фізичні проблеми. Прямі польові

вимірювання та традиційні кампанії з картографування ґрунтів часто обмежені, є дуже небезпечними або повністю забороненими через тривалі бойові дії, активні вектори артилерійської загрози та повсюдну присутність нерозірваних боєприпасів та наземних мін [5, 21]. У таких умовах технології дистанційного зондування та геоінформаційні системи перейшли від ролі допоміжних потоків даних до основного, а часто й єдиного, інформаційного джерела для швидкої, масштабної та безперервної оцінки стану навколишнього середовища [19, 21].

Нещодавні методологічні досягнення призвели до розгортання різноманітних геопросторових архітектур, адаптованих до зон конфліктів. Дослідники використовували сузір'я супутників середньої роздільної здатності, (Landsat та Sentinel-2) у поєднанні з радаром із синтезованою апертурою (SAR) від Sentinel-1, для оцінки динаміки рослинності та структурних змін ландшафту [21, 23, 43]. Інноваційні алгоритми, починаючи від традиційних класифікаторів машинного навчання, таких як Random Forest, і закінчуючи складними моделями глибокого навчання (згорткові нейронні мережі та сіамські нейронні мережі), були навчені виявляти дрібномасштабні аномалії ландшафту [7, 27, 44].

Ці геопросторові інструменти спрямовані насамперед на кількісну оцінку таких параметрів як припинення використання високопродуктивних сільськогосподарських угідь [11, 21]; фізичні мікротопографічні порушення, такі як утворення кратерів, спричинені вибуховими боєприпасами, бомбтурбацією [7]; локальне та дифузне хімічне забруднення ґрун-

ту важкими металами та залишками вибухових речовин [37]; знищення природних об'єктів, таких як захисні лісові смуги та природні водойми [22, 39].

Головною метою цього систематичного огляду є оцінка того, як дистанційне зондування та геопросторове моделювання допомогли виявити та відобразити занедбання земель, порушення ґрунтів та їх деградацію, спричинену війною, з акцентом на операційні дії в межах Сумської області протягом періоду з 2022 по травень 2026 року. У цьому систематичному огляді аналізуються сучасні технічні тенденції, розглядаються досягнуті емпіричні результати, визначаються домінуючі методологічні та системні прогалини, а також пропонуються стратегічні напрямки для майбутніх досліджень та планування відновлення землекористування після конфлікту.

Матеріали і методи дослідження

Систематичний огляд – це структурований метод дослідження, який визначає, критично оцінює та синтезує доступні рецензовані факти, щоб відповісти на конкретне, чітко сформульоване дослідницьке питання. Щоб запобігти упередженості та маніпуляціям даними під час процесу, складено протокол, що викладає повну методологію, перш ніж розпочати пошук. Цей протокол публічно зареєстрований у базі даних OSF, що гарантує дотримання принципів «відкритої науки» [9]. Це гарантує, що автори не змінили свої критерії посеред процесу лише для того, щоб отримати бажані результати. Систематичні огляди пишуться та структуруються

відповідно до міжнародних стандартів, зокрема, до декларації PRISMA (Переважні елементи звітності для систематичних оглядів та метааналізів), такий контрольний список гарантує, що кожен етап огляду є повністю прозорим для рецензентів та читачів [33]. Цей систематичний огляд було проведено у відповідності до рекомендацій щодо переважних елементів звітності для систематичних оглядів та метааналізів (PRISMA) для забезпечення прозорого, об'єктивного та відтворюваного синтезу фактів. Для систематичного документування процесу відбору досліджень було використано блок-схему PRISMA [26], яка чітко описує ідентифікацію, скринінг, відповідність критеріям та включення всіх оцінюваних статей. Сервіси бібліографічного пошуку Google scholar та Consensus було використано для пошуку ключових публікацій за тематикою даного дослідження. Consensus оперує усіма доступними бібліографічними базами даних, серед яких Semantic Scholar, OpenAlex, PubMed, включає мільйони наукових праць, які також перетинаються з базами Scopus та Web of Science, та загалом налічує понад 200 млн. рецензованих матеріалів. Для створення графічних схем використано Google Notebook LM з опцією інфографіки.

Результати та їх обговорення

Технічні процеси, що використовуються для дистанційного моніторингу змін земної поверхні, спричинених війною, спираються на структуровану ієрархію збору даних за допомогою сенсорів, обробку сигналів, класифікацію машинного навчання та багатокритеріальний просторовий аналіз на основі ГІС. Ця

багаторівнева архітектура розроблена для подолання прогалин у даних, спричинених хмарним покривом, атмосферними перешкодами та відсутністю систематичних та актуальних наземних довідкових даних [19, 23]. Базова конфігурація для оцінки ландшафтного масштабу вимагає об'єднання кількох потоків дистанційного зондування для фіксації різних біофізичних характеристик поверхні землі [8, 23].

Схема об'єднання цих потоків (рис. 1) ілюструє комплексний алгоритм обробки даних дистанційного зондування для отримання геопросторової аналітики. Процес розпочинається зі збору інформації через різномірні сенсори, включаючи супутникові оптичні та радіолокаційні системи. Отримані дані проходять етапи очищення від атмосферних перешкод та обчислення спеціалізованих індексів, таких як стан рослинності чи наслідки пожеж. Надалі за допомогою алгоритмів машинного навчання та геопросторового аналізу система структурує інформацію для прийняття рішень. Завершальним кроком є статистична перевірка точності результатів, що підтверджує надійність побудованої моделі. Цей підхід демонструє поєднання інноваційних методів ГІС для детального моніторингу земної поверхні.

Оптичні супутники середньої роздільної здатності Sentinel-2 (Copernicus) та Landsat 8/9 (USGS) забезпечують основні багатоспектральні спостереження, необхідні для моніторингу фенології сільськогосподарських культур, стану земного покриття та загальної життєздатності рослинності [1, 8, 21]. Використовуючи специфічні спектральні діапазони, зокрема області

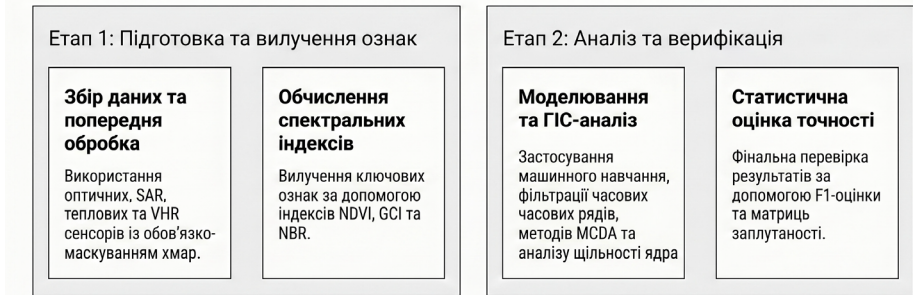


Рис. 1. Схема об'єднання кількох потоків дистанційного зондування

червоного краю та ближнього інфрачервоного (NIR) діапазонів, дослідники обчислюють важливі показники рослинності, такі як індекс нормалізованої різниці рослинності (NDVI), індекс зеленого хлорофілу (GCI) та нормалізований коефіцієнт вигорання (NBR), для виявлення занедбаності полів, скорочення рослинності та слідів вигорання [1, 8, 21].

Радар із синтезованою апертурою (SAR) Sentinel-1 у С-діапазоні інтегрований разом із оптичними даними для забезпечення можливостей спостереження за будь-якої погоди, вдень і вночі [13, 23]. Інтенсивність зворотного розсіювання SAR та метрики інтерферометричної когерентності є дуже чутливими до шорсткості поверхні, структурних пошкоджень забудованої інфраструктури та змін вологості ґрунту, що дозволяє безперервно виявляти зміни земного покриву навіть у періоди сильної сезонної хмарності на півночі України [13, 23].

Теплові інфрачервоні сенсори (TIRS) отримують теплові діапазони, отримані з Landsat, використовуються для отримання моделей температури поверхні землі (LST). Теплові аномалії допомагають оцінити дефіцит вологи в ґрунтах та змінений мікроклімат у зонах сильно деградованого ландшафту [23].

Комерційні субметрові зображення із сузір'їв супутників Махаг, WorldView та GeoEye вибірково використовуються для цільового аналізу гарячих точок [7, 17]. Ці ресурси є важливими для виявлення та картографування окремих, дрібномасштабних структурних модифікацій, таких як сліди військової техніки, системи оборонних траншей, зони ущільнення ґрунту та окремі вирви від бомб чи мін.

Перетворення необроблених спектральних даних та даних зворотного розсіювання радіолокаційного випромінювання на практичні карти землекористування включає ретельну реконструкцію часових рядів та алгоритми машинного навчання [21, 23]. Для цього застосовують техніки згладжування часових рядів та виявлення аномалій. Для фільтрації шуму від хмарного покриву та різноманітних атмосферних впливів багаточасові оптичні набори даних попередньо обробляються за допомогою вдосконалених фільтрів згладжування, таких як комбінований метод фільтра Гао та Савіцького-Голея (GF-SG method) [21]. Після згладжування такі алгоритми, як алгоритм виявлення перелогів на основі аномалій (FANTA), застосовуються для вилучення відхилень в очікуваних

профілях росту сільськогосподарських угідь порівняно з історичними базовими періодами (2018–2021), що дозволяє автоматизовано виявляти перелогові або повністю необроблені сільськогосподарські угіддя [21].

Двоперіодні підходи апроксимації кривої індексів NDVI та EVI відстежують часову динаміку сільськогосподарських ділянок протягом вегетаційних сезонів до та після конфлікту [8, 43]. Таке математичне моделювання сільськогосподарських угідь дозволяє виявити поля, які повністю не використовуються (що демонструють природні ознаки сукцесії бур'янів/чагарників), від полів, які просто залишаються без нагляду або обробляються із запізненням через логістичні обмеження конфлікту [8, 43].

Алгоритм Random Forest (RF) домінує у процесах класифікації земного покриву на основі машинного навчання завдяки своїй стійкості до високовимірних даних та мультиколінеарності [19, 21]. RF-моделі використовують ансамбль дерев рішень, навчених на комбінованих спектральних діапазонах, індексах рослинності та топографічних змінних, що регулярно забезпечує високу макроусереднену продуктивність класифікації в зонах, що постраждали від конфлікту [1, 21].

Розширені моделі семантичної сегментації, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN), все частіше використовуються для захоплення просторово-контекстуальних варіацій у зображеннях високої роздільної здатності [20, 27] для здійснення глибокого навчання та об'єднання даних для виявлення змін. Стратегії контекстно-залежного згладжування та інтеграції даних з урахуванням па-

раметрів земного покриву поєднують вхідні дані Sentinel-1 та Sentinel-2 для усунення фонових шумів сигналу та покращення розмежування як структурних пошкоджень, так і раптових змін рослинності [15, 23]. Фіналізовані вектори класифікації інтегруються в середовище геоінформаційної системи (ГІС) для створення практичних карт для підтримки рішень [21].

Точкові дані, що представляють локалізовані пошкодження (наприклад, кратери від снарядів, мін або ділянки вигорання рослинного покриву), перетворюються на моделі безперервної поверхні за допомогою оцінки щільності ядра (KDE) та гексагональних просторових сіток бінінгу [21]. Це висвітлює регіональні кластери деградації та відстежує просторову міграцію ліній фронту з часом.

Багатокритеріальний аналіз рішень (MCDA) представлений насамперед моделями просторової оптимізації, що включають процес аналітичної ієрархії (АНП), поєднують шари дистанційного зондування з допоміжними змінними, такими як тип ґрунту, близькість до військових оборонних ліній та топографію території. Це дозволяє створювати карти придатності земель та визначати «актори ризику», які попереджають про потенційне забруднення мінами або серйозну небезпеку деградації верхнього шару ґрунту.

Валідація моделі виконується за допомогою незалежних наборів тестування, розділених на доступні наземні дані, історичні довідкові реєстри та порівняння з архівами пошкоджень Супутникового центру Організації Об'єднаних Націй (UNOSAT) [1, 19]. Стандартизовані матриці запутаності створюються для повідомлення про загальну точність, ко-

ефіцієнти Каппа та F1, що забезпечує структурну прозорість та наукову обґрунтованість [19, 21].

Застосування дистанційного зондування та геопросторових архітектур у Сумській області та на ширших територіях України дало широке емпіричне розуміння екологічних наслідків війни, що тривала з 2022 по 2026 рік.

Узагальнені порівняльні дані джерел, використаних для систематичного огляду, наведено у таблиці 1.

Виявлення та картографування занедбання землекористування, спричиненого війною. Аналіз часових рядів супутникових даних задокументував суттєвий, різкий зсув у сільськогосподарських операціях з початку повномасштабного вторгнення у 2022 році [11, 21].

Просторова кластеризація та динаміка: Інтеграція алгоритмів FANTA та класифікаторів Random Forest виявила різке збільшення кількості покинутих, необроблених та незібраних сільськогосподарських угідь після 2022 року [11, 21]. Географічно такі поля розподілені не випадковим чином; натомість вони демонструють інтенсивну просторову кластеризацію в межах районів, що безпосередньо перетинають лінії фронту, сильно укріплені оборонні рубежі та безпосередні північні прикордонні зони Сумської області [19, 43].

Ефективність класифікації: Структури класифікації випадкових лісів досягли високих показників ефективності при картографуванні цих сільськогосподарських змін [1, 21].

1. Узагальнені порівняльні дані джерел, використаних для систематичного огляду

Категорія датчика / методології	Використана система/ алгоритм	Основний домен застосунку	Основний кількісний показник результату	Джерела
Оптичний з середньою роздільною здатністю	Sentinel-2 / Landsat 8–9	Картування індексів рослинності (NDVI, GCI, NBR)	Макроаграрні фенологічні траєкторії	[1] Shelestov et al., 2022 [21] Yue-Wei Ma et al., 2022;
Радар із синтезованою апертурою	Sentinel-1 C-діапазону	Структурні зміни та моніторинг за будь-якої погоди	Зміщення інтенсивності та когерентності зворотного розсіювання (σ^0)	[23] Mhanna S. et al., 2023; [15] Karwowska et al., 2026
Дуже висока роздільна здатність (VHR)	Maxar / WorldView / GeoEye	Мікротопографічна ідентифікація військових слідів	Кількість кратерів, ширина колії ущільнення	[6, 7] Bonchkovskiy et al., 2025; Bonchkovskiy et al., 2023
Фільтрація часових рядів	Фільтр GF-SG	Згладжування даних та реконструкція хмари	Реконструйовані безперервні профілі NDVI	[21] Yue-Wei Ma et al., 2022
Аномальні зміни використання земель	Фреймворк FANTA	Розмежування перелогових та некерованих зон	Оцінки часового відхилення	[21] Yue-Wei Ma et al., 2022
Машинне навчання з учителем	Алгоритм RF	Багатокласова класифікація земного покриву	Класифікаційні F1-бали (~0,83–0,87)	[1, 21] Shelestov et al., 2022 Yue-Wei Ma et al., 2022;
ГІС просторової агрегації	Щільність ядра / Шестикутні сітки	Регіональна кластеризація деградації	Карти щільності гарячих точок / Прапорці ризику	[21] Yue-Wei Ma et al., 2022

Використовуючи інтегровані оптичні спектральні діапазони та похідні індекси рослинності, ці робочі процеси показали високу ефективність класифікації, при цьому показники F1 постійно знаходилися в діапазоні від $\sim 0,83$ до $0,87$, а в кількох оптимізованих регіональних дослідженнях перевищували $0,90$ [1, 19, 21].

Типологічна диференціація: Методології апроксимації кривої NDVI з двома періодами успішно розділили виведені землі з активного землекористування на чіткі операційні підкатегорії [8, 43]. Система ефективно розрізняла «невикористані сільськогосподарські угіддя», що характеризуються повною відсутністю сільськогосподарських ознак та швидким початком природної сукцесії бур'янів або чагарників, та «недоглянуті сільськогосподарські угіддя», де поля були засіяні, але залишені незібраними або зібрані із затримкою через активні місцеві загрози безпеці [8, 43].

3.2. Кількісна оцінка фізичних порушень ґрунту

Фізичний вплив військових операцій на ґрунтовий покрив Сумської області був охарактеризований за допомогою просторового моделювання надвисокої роздільної здатності, яке виявило широко розповсюджену механічну деградацію [6, 7].

Визначення поняття: Бомбтурбація описує серйозне порушення профілів ґрунту, горизонтів та місцевих геоморфологічних структур, спричинене детонацією вибухових боєприпасів, що призводить до постійного перемішування ґрунтової матриці, локального ущільнення та утворення кратерів.

Картування кратерів та відстеження щільності: Субметрові наборо-

ри даних VHR (Maxar, WorldView) сприяли ідентифікації та каталогізації сотень тисяч бомбових та артилерійських кратерів на полях, постраждалих від конфлікту [6, 7]. Ця систематична ідентифікація виявила великі профілі «бомбтурбації» — структурного перекидання та руйнування природних ґрунтових профілів, спричинених механікою удару високовибухових речовин [7].

Вторинні геоморфологічні та гідрологічні ризики: Окрім безпосереднього утворення кратерів, геопросторовий моніторинг з 2022 року по 2026 рік фіксував поточні вторинні геоморфологічні зміни [7]. Було показано, що кратери, що залишилися необробленими, зазнають поступової мікроярової ерозії та деградації, що дестабілізує навколишні шари верхнього шару ґрунту, прискорює процеси ерозії та значно підвищує просторовий ризик зустрічі з нерозірваними боєприпасами (НВБ) під час будь-якого наступного повернення сільськогосподарських об'єктів на територію [7].

Профілі механізованого ущільнення: Завдяки цілеспрямованому вилученню спектральних індексів, чутливих до коливань щільності верхнього шару ґрунту та поверхневої вологості, дослідники успішно картографували розгалужені мережі ущільнення ґрунту [7]. Важкі військові транспортні лінії, що характеризуються гусеничною бронетехнікою та логістичними конвоями, спричинили серйозне структурне руйнування макроагрегатів ґрунту, що значно знизило майбутню здатність до інфільтрації вологи та аерацію ґрунту на великих коридорах орних земель [6, 7].

3.3. Оцінка хімічного забруднення та деградації ґрунту

Пов'язування карт пошкоджень, отриманих за допомогою дистанційного зондування, з цільовими польовими кампаніями дало чітке розуміння токсикологічного сліду, залишеного інтенсивними військовими діями [37, 38].

Локалізовані гарячі точки важких металів: Польові кампанії з відбору проб, спрямовані на конкретні координати цілей через зони ударів снарядів, виявлені дистанційним зондуванням, виявили тривожні концентрації токсичних важких металів у центрах кратерів та безпосередньо прилеглих ґрунтах [7, 38]. Зразки ґрунту підтвердили сплески кадмію (Cd), міді (Cu), свинцю (Pb) та цинку (Zn), які безпосередньо корелювали з характером фрагментації боєприпасів, причому локалізовані концентрації іноді перевищували національні нормативні норми безпеки до 62 разів [7].

Просторові характеристики забруднення: Порівняльне моделювання ландшафту показало чітке розмежування між просторовим впливом фізичної та хімічної деградації [6, 25]. Хоча механічні порушення, такі як ущільнення ґрунту та утворення кратерів, були поширені на великих сільськогосподарських ділянках, екстремальне хімічне забруднення залишалося високо локалізованим навколо певних точок детонації та військових оборонних укріплень, а не проявлялося як дифузне забруднення регіонального масштабу [7, 25].

Біологічний та функціональний спад: Лабораторні аналізи, пов'язані з геопросторовими показниками, підтвердили, що ці хімічні аномалії в поєднанні з високотемпературними вибухами призвели до серйозної біологічної деградації ґрунтової сис-

теми [36]. Зони удару демонстрували глибоке порушення ґрунтового мікробіому, повну стерилізацію корисної мікрофлори та негайне зниження загальних параметрів родючості ґрунту, яке зберігається протягом кількох сезонів після удару [36, 38].

3.4. Ширший вплив на навколишнє середовище та екосистему

Вплив деградації ландшафтів, спричиненої війною, виходить за межі окремих сільськогосподарських угідь, змінюючи регіональний екологічний баланс та захисну інфраструктуру по всій Сумській області [22, 36].

Знищення лісових захисних смуг: Дистанційні оцінки за різними сенсорами задокументували серйозні пошкодження захисних лісових захисних смуг (вітрозахисних смуг), оцінюючи, що приблизно 18% цих критично важливих лінійних лісових насаджень у буферних зонах активних конфліктів деградували або повністю знищені [22]. Це знищення позбавляє життєво важливих функцій захисту ландшафту, безпосередньо наражаючи величезні ділянки навколишніх сільськогосподарських угідь на прискорену вітрову ерозію, змінений мікроклімат та неблаганну втрату вологи верхнього шару ґрунту [22, 25].

Пірогенні тенденції: Багаточасові робочі процеси моніторингу пожеж з використанням теплових аномалій MODIS та Sentinel-2 виявили значне збільшення як частоти, так і просторового охоплення ландшафтних пожеж [40]. Ці пожежі, спричинені переважно кінетичними бойовими діями, артилерійськими ударами та навмисним тактичним підпалюванням, палили на сільськогосподарських полях та природних лісових насадженнях, спричиняючи швидку

втрату рослинності та масове вивільнення вуглецю [40].

Гідрологічні зміни: Просторовий моніторинг також зафіксував значні зміни в гідрології поверхневих вод та безпеці водних ресурсів. Фізичне руйнування критичної водогосподарської інфраструктури, дамб та сільських зрошувальних каналів призвело до локальних повеней, некерованого скупчення води на сільськогосподарських рівнинах та структурного забруднення місцевих природних заповідників та водно-болотних угідь [39].

Системне зниження рівня зеленості рослинності: Регіональні оцінки часових рядів протягом усього періоду конфлікту (2022–2026) показують узагальнене, стійке зниження інтегрованих індексів зеленості рослинності (NDVI/EVI) у зонах, що зазнали тривалої військової присутності, що відображає системну багаторічну деградацію ландшафту [37, 43].

Обговорення

Емпіричні дані, накопичені між 2022 і 2026 роками, вказують на те, що дистанційне зондування, інтегроване з геопросторовим моделюванням, забезпечує безцінну безконтактну основу для відстеження екологічної шкоди в зонах конфліктів, що не підлягають розширенню [21, 23]. Впровадження багатосенсорних моделей об'єднання даних (оптичних, радіолокаційних, теплових) успішно усуває традиційні вузькі місця моніторингу, такі як постійна хмарність або прогалини в даних, забезпечуючи безперервні спостереження за допомогою аналізу зворотного розсіювання радара [23, 41]. Класифікатори машинного навчання, зокрема архітектури

Random Forest, довели свою високу адаптивність для картографування складних змін землекористування за умови використання щільних багаторічних часових рядів [15, 19].

Однак ці технічні переваги врівноважуються серйозними експлуатаційними обмеженнями. Хоча платформи VHR (Maxar, WorldView) пропонують чудову просторову роздільну здатність, необхідну для ідентифікації окремих мікротопографічних ударів, таких як вирви від снарядів або сліди важкої техніки, їх системне розгортання по всіх регіональних адміністративних секторах (таких як вся Сумська область) залишається серйозно обмеженим через високі комерційні витрати на придбання та вузьку зону покриття датчиків [6]. Крім того, точність передових моделей машинного навчання знижується без адекватних, безперервних даних наземної перевірки. В умовах активних бойових дій або високого рівня мінного забруднення збір незалежних польових зразків для перевірки практично неможливий, що змушує дослідників покладатися на віддалені проксі-індикатори, які вносять просторові невідзначеності в кінцеві результати класифікації [11, 19].

Постійною методологічною проблемою в дистанційному зондуванні після конфлікту є точне розмежування між стандартним, плановим сільськогосподарським паруванням та справжнім, спричиненим війною структурним занедбанням земель [8, 23]. Короткострокові спектральні варіації можуть виглядати ідентичними при оцінці односезонного неврожаю або стандартного циклу ротаційного парування [8]. Щоб подолати цей ризик неправильної класифікації, нещодавні методики успішно змістилися в

бік багаторічного аналізу фенологічної траєкторії в поєднанні з методами апроксимації кривої за два періоди [8, 43].

Відстежуючи багаточасову вегетаційну криву протягом безперервного трьох-чотирьохрічного періоду, ці алгоритми можуть виділити автентичні, довгострокові ознаки занедбаності, що підтверджуються поступовим заростанням чагарниками та постійною втратою регулярних циклів вирощування, від тимчасового логістичного парування, спричиненого короткостроковою нестачею насіння або палива [8]. Тим не менш, досягнення абсолютної достовірності класифікації вимагає інтеграції допоміжних соціально-економічних наборів даних, таких як локалізовані показники міграції сільського населення, індекси порушень ланцюгів поставок та регіональні моделі доступності ринків, які залишаються складними для складання в умовах мінливих конфліктів.

Просторові дані високої роздільної здатності, що детально описують зміни місцевості, структурні пошкодження та конкретні сільськогосподарські транспортні коридори, мають характеристики подвійного використання; вони можуть ненавмисно надавати тактичну інформацію щодо переміщень військ, розташування укріплень або логістичних вразливостей [19, 34]. Отже, дослідники стикаються з проблемою балансування наукової прозорості та відповідності даним відкритого доступу до суворих протоколів військової оперативної безпеки, що часто вимагає навмисного погіршення просторової роздільної здатності або затримки термінів публікації конфіденційних геопросторових результатів.

Основні варіації платформ призводять до прогалин в інтеграції даних. Об'єднання потоків необроблених даних між різними системами обробки, такими як міграція робочих процесів між Google Earth Engine (GEE) та екосистемою простору даних Copernicus (CDSE), вимагає інтенсивного міжплатформного калібрування для гармонізації різних геометрій датчиків, моделей атмосферної корекції та процедур маскування хмар, що може призвести до артефактів обробки, якщо їх не виправити [19].

Екологічні трансформації, що спостерігаються в Сумській області, відображають закономірності, задокументовані в інших великих сучасних зонах конфліктів [8, 23].

Геопросторове моделювання, застосоване до сирійського збройного конфлікту (наприклад, басейн річки Оронт та провінція Тартус), продемонструвало, як тривалі військові дії спричиняють масову вирубку лісів, некероване занедбання сільськогосподарських угідь та серйозні моделі деградації ландшафту, що відображають втрати захисних смуг та полів по всій Україні [8, 23, 41]. Аналогічно, супутникове відстеження в Судані та Іраку встановило чіткий зв'язок між активною кінетичною війною, подальшими міграціями біженців або внутрішньо переміщених осіб (ВПО) та негайним скороченням регіональної біомаси, прискореною ерозією ґрунту та структурними змінами в довгостроковому земному покриві [2, 12, 28, 29]. Ці міжнародні паралелі підкреслюють, що хоча локальні характеристики ґрунтів різняться (наприклад, дуже вразливий родючий чорноземний верхній шар ґрунту України порівняно з посушливими

грунтовими профілями Близького Сходу), основні геопросторові методології, необхідні для відстеження деградації навколишнього середовища, спричиненої війною, залишаються застосовними в усьому світі [8, 23].

Майбутні перспективи та стратегічні рамки відновлення. Для переходу від реактивного картографування пошкоджень до проактивного, заснованого на доказах відновлення ландшафтів, спільнота дистанційного зондування повинна зосередитися на побудові інтегрованих, автоматизованих архітектур просторового моніторингу [14]. Майбутнє відновлення цінних сільськогосподарських активів Сумської області вимагає інституціоналізації гармонізованої національної просторової бази даних, здатної автоматично обробляти багатосенсорні спостереження для створення безперервних карт вразливості ландшафтів.

Перетворюючи вихідні дані, такі як шари щільності кратерів, вектори ущільнення ґрунту та індекси деградації захисних смуг, на просторові конвеєри багатокритеріального аналізу рішень (MCDA), національні планувальники можуть динамічно визначати пріоритети певних зон для гуманітарного розмінування, механічного відновлення підґрунтя та цілеспрямованого екологічного відновлення [19, 43]. Ця автоматизована інтеграція забезпечує наукову основу, необхідну для підтримки міжнародних претензій щодо екологічної шкоди та оптимізації розподілу ресурсів для постконфліктного відновлення ландшафтів [19, 37, 38].

Висновок

Технології дистанційного зонду-

вання в поєднанні з передовими геопросторовими моделями забезпечують важливу, науково обґрунтовану методологію для виявлення, категоризації та моніторингу занедбання земельних ділянок, спричинених війною, фізичних порушень верхнього шару ґрунту, хімічного забруднення та ширшої деградації екосистем у Сумській області України протягом періоду конфлікту 2022–2026 років. Поєднуючи багатоспектральні оптичні зображення, всепогодні спостереження SAR та вибірккові комерційні набори даних дуже високої роздільної здатності з надійними архітектурами машинного навчання (такими як Random Forest та фільтри фенологічних кривих часових рядів), дослідники можуть точно відобразити динаміку пошкодження ландшафту в умовах високої небезпеки, що перешкоджають проведенню стандартних польових кампаній.

Хоча ці геопросторові системи демонструють високу ефективність класифікації та адаптивність до багатьох датчиків, їхня операційна інтеграція продовжує стикатися зі значними труднощами, серед яких ми відмітимо наступні:

- Високі фінансові обмеження та обмеження охоплення даних, пов'язані із сенсорами надвисокої роздільної здатності (VHR) з роздільною здатністю менше 1 метра.
- Складна вимога надійно дешифрувати та розрізнити короткострокове переорювання сільськогосподарських угідь від структурного занедбання внаслідок війни.
- Серйозний дефіцит довідкових даних наземного рівня, спричинений активними загрозами безпеки та забрудненням мінами.
- Критичні етичні та національні

нально-безпекові обов'язки, пов'язані з обробкою конфіденційних просторових розвідувальних даних подвійного використання.

Питання для подальшого дослідження

Майбутні дослідницькі зусилля у галузі дистанційного зондування, орієнтованого на конфлікти, та безпосередньої підтримки післявоєнного екологічного відновлення, повинні розглянути кілька критичних проблем:

1. *Алгоритмічна оптимізація:* Як можна оптимізувати методи трансферного навчання та моделі генерації синтетичних даних для підтримки високої точності класифікації в зонах активних конфліктів, де можна безпечно збирати дані для перевірки нульової достовірності?

2. *Об'єднання соціально-економічних даних:* Які найефективніші протоколи об'єднання даних для систематичної інтеграції непросторових соціально-економічних змінних (наприклад, регіональної міграції робочої сили, перебоїв у постачанні сільськогосподарських ресурсів, індексів краху місцевого ринку) безпосередньо в багатоспектральні моделі дистанційного зондування для покращення розмежування тимчасового парування від постійного занедбання?

3. *Національні архітектури моніторингу:* Як Україна може створити високобезпечну, автоматизовану та юридично стандартизовану національну систему моніторингу просторових даних, яка успішно збалансує вимоги до відкритого доступу до наукової реставрації зі суворими межами військової оперативної безпеки?

4. *Довгострокове відстеження*

відновлення ґрунтів: Які конкретні спектральні проксі-індикатори можна розробити для моніторингу багаторічного хімічного та біологічного відновлення ґрунтів, постраждалих від «бомбардування» та забруднення важкими металами, після тактичних відновлювальних заходів?

Відповіді на ці питання вдосконалять методології дистанційного зондування та нададуть емпіричні дані, необхідні для керівництва масштабним екологічним відновленням та плануванням сталого управління земельними ресурсами в постконфліктній Україні.

Список використаної літератури

1. Advanced method of land cover classification based on high spatial resolution data and convolutional neural network / A. Shelestov et al. 2022. <http://dx.doi.org/10.25673/76943>
2. Ahmed A., et al. Assessment of the environmental impacts of conflict-driven Internally Displaced Persons: A Sentinel-2 satellite based analysis of land use/cover changes in the Kas locality, Darfur, Sudan. PLOS ONE. 2024. Vol. 19, no. 5. Art. e0304034. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304034>
3. Ahn E., Kang H. Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Anesthesiology*. 2018. Vol. 71, no. 2. P. 103–112. URL: <https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103>
4. Andualet T. G., Belay G., Guadie A. Land use change detection using remote sensing technology. *Journal of Earth Science & Climatic Change*. 2018. Vol. 9, no. 10. Art. 6. URL: <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000496>
5. Boali A., et al. Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sens-

- ing indices in northeastern Iran. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 9742. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94926-x>
6. Bonchkovskiy O. S. et al. 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*. 2023. Vol. 32, no. 3. P. 474-487. URL: <https://doi.org/10.15421/112342>
7. Bonchkovskiy O. et al. Spatiotemporal analysis of land cover changes in Ukraine due to war using remote sensing. *The Science of the Total Environment*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
8. Daiyoub A., et al. War and Deforestation: Using Remote Sensing and Geospatial Modeling to Assess the Impact of the Syrian Armed Conflict on Forest Cover. *Land*. 2023. Vol. 12, no. 3. Art. 682. URL: <https://doi.org/10.3390/land12081509>
9. Discrepancy review: a feasibility study of a novel peer review intervention to reduce undisclosed discrepancies between registrations and publications / TARG Meta-Research Group and Collaborators. *Royal Society Open Science*. 2022. Vol. 9, no. 7. Art. 220142. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.220142>
10. Drobitko A. et al. Land degradation in Ukraine: retrospective analysis 2017-2022. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80, no. 2. P. 355-362. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2160079>
11. Drozd S. et al. Remote Sensing and Machine Learning for War Impact Assessment on Agriculture in Ukraine. 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT) (Athens, Greece, 2024). 2024. P. 1-7. URL: <https://doi.org/10.1109/dessert65323.2024.11122118>
12. Guo Z., et al. Monitoring Indicators of Economic Activities in Sudan Amidst Ongoing Conflict Using Satellite Data. *Defence and Peace Economics*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1080/10242694.2023.2290474>
13. Huang Z., et al. An Ensemble Learning Approach for Urban Land Use Mapping Based on Remote Sensing Imagery and Social Sensing Data. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 19. Art. 3254. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12193254>
14. Kalyna T. et al. Application of geodetic methods and remote sensing for monitoring land use changes in Ukraine. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technological Sciences*. 2025. No. 4. P. 297-301. URL: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-59>
15. Karwowska K. et al. Integrating optical and radar satellite data for conflict-related change detection in Ukraine. *Sci Rep* 16, 12557 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41424-3>
16. Khan K. S. et al. Five Steps to Conducting a Systematic Review. *Journal of the Royal Society of Medicine*. 2003. Vol. 96, no. 3. P. 118-121. URL: <https://doi.org/10.1177/014107680309600304>
17. Kholoshyn I.V., et al. 2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1254 012132 DOI 10.1088/1755-1315/1254/1/012132
18. Kocher M., Riegelman A. Systematic reviews and evidence synthesis: Resources beyond the health sciences. *College & Research Libraries News*. 2018. Vol. 79, no. 5. Art. 248. URL: <https://doi.org/10.5860/crln.79.5.248>
19. Kussul N. et al. Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. Vol. 140. Art. 104551. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551>
20. Lv Z., et al. Spatial-Contextual Information Utilization Framework for Land Cover Change Detection With Hyperspectral

- Remote Sensed Images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/tgrs.2023.3336791>
21. Ma Y.-W., et al. Spatiotemporal analysis of land use/land cover changes in Ukraine due to war using remote sensing. *Land*. 2022. Vol. 11, no. 10. Art. 1810. URL: <https://doi.org/10.3390/land11101810>
22. Matsala M. et al. Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104012>
23. Mhanna S., et al. Using machine learning and remote sensing to track environmental impacts of armed conflicts in the Orontes River Basin. *The Science of the Total Environment*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164234>
24. Mohamed M. A. et al. Monitoring of Changes in Land Use/Land Cover in Syria Using Remote Sensing and GIS. *Land*. 2020. Vol. 9, no. 5. Art. 142. URL: <https://doi.org/10.3390/land9070226>
25. Nasibov A. et al. The impact of war on the fields of Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81, no. 1. P. 159–168. URL: <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314889>
26. Page M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021. Vol. 372. Art. n71. URL: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
27. Pushkarenko Y., et al. Research on the state of areas in Ukraine affected by military actions based on remote sensing data and deep learning architectures. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.01>
28. Rasha Abbas Ali, et al. Land Cover Change Detection in Iraq Using SVM Classification: A Remote Sensing Approach. *Iraqi Journal for Computers and Informatics*. 2025. URL: <https://doi.org/10.25195/ijci.v5i1.567>
29. Rash A., et al. Quantitative assessment of Land use/land cover changes in a developing region using machine learning algorithms: A case study in the Kurdistan Region, Iraq. *Heliyon*. 2023. Vol. 9. Art. e21253. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21253>
30. Remote Sensing Applied for Land Use Change Assessment and Governance in Riau-Indonesia / A. Agustiyara et al. HCI International 2023 Posters. *HCI 2023 (Communications in Computer and Information Science, vol. 1835)* / ed. by C. Stephanidis et al. Cham : Springer, 2023. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36001-5_56
31. Santos A. B. et al. A Remote Sensing Diagnosis of Water Use and Water Stress in a Region with Intense Irrigation Growth in Brazil. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, no. 22. Art. 3725. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12223725>
32. Sarwar A. et al. Mapping annual soil loss in the southeast of Peshawar basin, Pakistan, using RUSLE model with geospatial approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2025. Vol. 9, no. 3. P. 1102–1113. URL: <https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2373493>
33. Shaheen N. et al. Appraising systematic reviews: a comprehensive guide to ensuring validity and reliability. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*. 2023. Vol. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/frma.2023.1268045>
34. Shevchuk S. A. et al. The Use of Remote Sensing Data for Investigation of Environmental Consequences of Russia-Ukraine War. *Journal of Landscape Ecology*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2022-0017>
35. Siddaway A. P., Wood A. M., Hedges L. V. How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. *Annual Review of Psychology*. 2019. Vol. 70. P. 747–770. URL: <https://doi.org/10.1146/an>

- nurev-psych-010418-102803
36. Solokha M. et al. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, no. 10. Art. 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
 37. Solokha M. et al. The impact of the Russian-Ukrainian war on land use in Ukraine: A remote sensing perspective. *The Science of the Total Environment*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
 38. Solokha M. et al. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 995. Art. 180105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>
 39. Stakhiv I. et al. Spatial analysis of the flooded land area of the Kherson region nature reserve using remote sensing data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.14>
 40. Tomchenko O. V. et al. Assessment and monitoring of fires caused by the War in Ukraine on Landscape scale. *Journal of Landscape Ecology*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 76-97. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0011>
 41. Younes A., et al. Understanding Dynamics of Land Use & Land Cover Change Using GIS & Change Detection Techniques in Tartous, Syria. *European Journal of Geography*. 2023. URL: <https://doi.org/10.48088/ejg.a.you.14.3.020.041>
 42. Zenebe Reta Roba, et al. Assessing the impacts of forest cover change on carbon stock and soil moisture dynamics using geospatial techniques: A case study of Nensebo forest, Southern Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13611-0>
 43. Zhang Y. et al. Satellite Remote Sensing Time-Series Observation of Russia–Ukraine War: Ongoing Conflict Increased Crop Risk. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2025. Vol. 18. P. 10582-10594. doi: 10.1109/JSTARS.2025.3560935
 44. Zhu Z., et al. Remote Sensing of Land Change: A Multifaceted Perspective. *Remote Sensing of Environment*. 2022. doi: <https://doi.org/10.1002/essoar.10510470.1>

References

1. Abdalrahman Ahmed, et al. (2024). Assessment of the environmental impacts of conflict-driven Internally Displaced Persons: A Sentinel-2 satellite based analysis of land use/cover changes in the Kas locality, Darfur, Sudan. *PLOS ONE*. 19(5): e0304034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0304034>
2. Abdolhossein Boali, et al. (2025). Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sensing indices in northeastern Iran. *Scientific Reports*. 15, 9742. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94926-x>
3. Abdulqadeer Rash, et al. (2023). Quantitative assessment of Land use/land cover changes in a developing region using machine learning algorithms: A case study in the Kurdistan Region, Iraq. *Heliyon*. 9 (2023) e21253 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21253>
4. Agustiyara, A., Székely, B., Nurmandi, A., Musyimi, P.K. (2023). Remote Sensing Applied for Land Use Change Assessment and Governance in Riau-Indonesia. In: Stephanidis, C., Antona, M., Ntoa, S., Salvendy, G. (eds) HCI International 2023 Posters. HCII 2023. Communications in Computer and Information Science, vol 1835. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36001-5_56
5. Ahn, E., & Kang, H. (2018). Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Anesthesiology*, 71(2), 103–112. <https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103>

6. Andualem, T. G., Belay, G., & Guadie, A. (2018). Land use change detection using remote sensing technology. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 9(10), 6. <https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000496>
7. Angham Daiyoub, et al. (2023). War and Deforestation: Using Remote Sensing and Geospatial Modeling to Assess the Impact of the Syrian Armed Conflict on Forest Cover. *Land*, 12(3), 682. <https://doi.org/10.3390/land12081509>
8. Bonchkovskiy, O. et al. (2025). Spatiotemporal analysis of land cover changes in Ukraine due to war using remote sensing. *The Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
9. 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>
10. Drobitko, A., Markova, N., Tarabrina, A. M., & Tereshchenko, A. (2023). Land degradation in Ukraine: retrospective analysis 2017-2022. *International Journal of Environmental Studies*, 80(2), 355-362. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2160079>
11. Drozd, S. et al. (2024). Remote Sensing and Machine Learning for War Impact Assessment on Agriculture in Ukraine. 14th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Athens, Greece, 2024, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/dessert65323.2024.11122118>
12. Kalyna, T. et al. (2025). Application of geodetic methods and remote sensing for monitoring land use changes in Ukraine. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technological Sciences*. (4):297-301. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2025-4-59>
13. Karwowska, K., Slesinski, J., Sekrecka, A. et al. Integrating optical and radar satellite data for conflict-related change detection in Ukraine. *Sci Rep* 16, 12557 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41424-3>
14. Khan, K. S., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five Steps to Conducting a Systematic Review. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 96(3), 118-121. <https://doi.org/10.1177/014107680309600304>
15. Kholoshyn I.V., et al 2023 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1254 012132 DOI 10.1088/1755-1315/1254/1/012132
16. Kocher, M., & Riegelman, A. (2018). Systematic reviews and evidence synthesis: Resources beyond the health sciences. *College & Research Libraries News*, 79(5), 248. <https://doi.org/10.5860/crln.79.5.248>
17. Kussul, N. et al. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 140, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551>
18. Matsala, M. et al. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104012>
19. Mohamed, M. A. et al. (2020). Monitoring of Changes in Land Use/Land Cover in Syria Using Remote Sensing and GIS. *Land*, 9(5), 142. <https://doi.org/10.3390/land9070226>
20. Nasibov, A., Shebanina, O., Kormyshkin, I., Gamayunova, V., & Chernova, A. (2024). The impact of war on the fields of Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*, 81(1), 159-168. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2314889>
21. Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(n71). <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
22. Pushkarenko Yuliia, et al. (2024). Research on the state of areas in Ukraine affected by military actions based on remote sensing data and deep learning architectures. Radi-

- oelectronic and Computer Systems. <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.01>
23. Rasha Abbas Ali, et al. (2025). Land Cover Change Detection in Iraq Using SVM Classification: A Remote Sensing Approach. *Iraqi Journal for Computers and Informatics*. <https://doi.org/10.25195/ijci.v5i1i.567>
24. Saeed Mhanna, et al. (2023). Using machine learning and remote sensing to track environmental impacts of armed conflicts in the Orontes River Basin. *The Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164234>
25. Santos, A. B. et al. (2020). A Remote Sensing Diagnosis of Water Use and Water Stress in a Region with Intense Irrigation Growth in Brazil. *Remote Sensing*, 12(22), 3725. <https://doi.org/10.3390/rs12223725>
26. Sarwar, A., Ali, M., Israr, M., Gulzar, S., Khan, M. I., Ali, M. A. S., ... Rukh, S. (2025). Mapping annual soil loss in the southeast of Peshawar basin, Pakistan, using RUSLE model with geospatial approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 9(3), 1102–1113. <https://doi.org/10.1080/24749508.2024.2373493>
27. Shaheen, N., Shaheen, A., Ramadan, A., Hefnawy, M. T., Ramadan, A., Ibrahim, I. A., Hassanein, M. E., Ashour, M. E., & Flouty, O. (2023). Appraising systematic reviews: a comprehensive guide to ensuring validity and reliability. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 8. <https://doi.org/10.3389/frma.2023.1268045>
28. Shevchuk S. A. et al. (2022). The Use of Remote Sensing Data for Investigation of Environmental Consequences of Russia-Ukraine War. *Journal of Landscape Ecology*. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2022-0017>
29. Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. *Annual Review of Psychology*, 70, 747–770. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803>
30. Solokha, M. et al. (2023). The impact of the Russian-Ukrainian war on land use in Ukraine: A remote sensing perspective. *The Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122>
31. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
32. Solokha, M., Melnyk, O., Cannon, N., Horton, M., Datsko, O., & O'Connor, D. (2025). Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*, 995, 180105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>
33. Stakhiv, I. et al. (2025). Spatial analysis of the flooded land area of the Kherson region nature reserve using remote sensing data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.14>
34. TARG Meta-Research Group and Collaborators. (2022). Discrepancy review: a feasibility study of a novel peer review intervention to reduce undisclosed discrepancies between registrations and publications. *Royal Society Open Science*, 9(7), 220142. <https://doi.org/10.1098/rsos.220142>
35. Tomchenko, O. V., Khyzhniak, A. V., Sheviakina, N. A., Zahorodnia, S. A., Yelistratova, L. A., Yakovenko, M. I., & Stakhiv, I. R. (2023). Assessment and monitoring of fires caused by the War in Ukraine on Landscape scale. *Journal of Landscape Ecology*, 16(2), 76-97. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0011>
36. Shelestov, A., Yailymova, H., Lavreniuk, A., Kussul, N., Yailymov, B., Lavreniuk, M., ... & Shumilo, L. (2022). Advanced Method of Land Cover Classification Based on High Spatial Resolution Data and Convolutional Neural Networks. *Remote Sensing*, 14(12), 3000. <https://doi.org/10.3390/rs14123000>

- tional Neural Network. In Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT (pp. 125-132). <http://dx.doi.org/10.25673/76943>
37. Younes, et al. A. (2023). Understanding Dynamics of Land Use & Land Cover Change Using GIS & Change Detection Techniques in Tartous, Syria. *European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.48088/ejg.a.you.14.3.020.041>
38. Yue-Wei Ma, et al. (2022). Spatiotemporal analysis of land use/land cover changes in Ukraine due to war using remote sensing. *Land*, 11(10), 1810. <https://doi.org/10.3390/land11101810>
39. Z. Lv, et al. (2023). Spatial-Contextual Information Utilization Framework for Land Cover Change Detection With Hyperspectral Remote Sensed Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2023.3336791>
40. Zenebe Reta Roba, et al. (2025). Assessing the impacts of forest cover change on carbon stock and soil moisture dynamics using geospatial techniques: A case study of Nensebo forest, Southern Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13611-0>
41. Zhang, Y. Hu, Q., Wang, S., Zhao, P., and Ai, M. Satellite Remote Sensing Time-Series Observation of Russia–Ukraine War: Ongoing Conflict Increased Crop Risk. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 10582-10594, 2025, doi: 10.1109/JSTARS.2025.3560935
42. Zhe Guo, et al. (2023). Monitoring Indicators of Economic Activities in Sudan Amidst Ongoing Conflict Using Satellite Data. *Defence and Peace Economics*. <https://doi.org/10.1080/10242694.2023.2290474>
43. Zhe Zhu, et al. (2022). Remote Sensing of Land Change: A Multifaceted Perspective. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10510470.1>
44. Zhou Huang, et al. (2020). An Ensemble Learning Approach for Urban Land Use Mapping Based on Remote Sensing Imagery and Social Sensing Data. *Remote Sensing*, 12(19), 3254. <https://doi.org/10.3390/rs12193254>

Bogdanets V., Berezniak Ye., Brovko D.

REMOTE SENSING AND GEOSPATIAL MODELING FOR THE DETECTION OF WAR-INDUCED LAND USE ABANDONMENT, SOIL DISTURBANCE, AND DEGRADATION IN SUMY REGION OF UKRAINE: A SYSTEMATIC REVIEW

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 2'26: 209-228.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.15>

Abstract. The full-scale military invasion of Ukraine has caused multidimensional transformations of agricultural landscapes, land cover, and ecosystems. The Sumy region, located along the northeastern border with the Russian Federation, is a critical region that has suffered from intense fighting, prolonged artillery shelling, and ongoing border clashes during the study period from 2022 to May 2026. This paper systematically evaluates the application of remote sensing and geospatial modeling techniques to detect, quantify, and monitor war-induced land abandonment, as well as physical land cover disturbances, chemical contamination, and broader environmental degradation in this theater of war. Combining recent scientific publications on the war in Ukraine and comparative global examples (Syria, Iraq, and Sudan), the effectiveness of integrating multi-sensor data, including optical (Sentinel-2, Landsat), synthetic aperture radar (SAR; Sentinel-1), thermal, and very high resolution (VHR; Maxar, WorldView) platforms, as well as advanced

machine and deep learning algorithms (Random Forest, Deep Learning) and time series analysis (FANTA, two-period curve approximation), is assessed. The results of the study show that while geospatial modeling is an indispensable tool for rapid, large-scale, and non-contact damage assessment in active conflict settings, significant critical research gaps remain, namely separating short-term cessation of agricultural use from actual land abandonment caused by war, verifying such facts in the face of a severe shortage of reliable ground data, and managing sensitive geospatial information. This systematic review highlights existing methodological gaps and outlines future perspectives needed to build a harmonized spatial monitoring system capable of guiding post-conflict recovery and environmental remediation based on actual remote sensing data at the regional scale.

Keywords: *remote sensing; geospatial modeling; abandoned land; soil degradation; armed conflict; machine learning; land damage assessment.*
