

<https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15>

УДК (UDC): 528.8:004.9:631.15

А. Г. КОТ¹,

аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: anna.kot@karazin.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

О. М. НЕМОШКАЛОВ¹,

аспірант кафедри екології та менеджменту довкілля

e-mail: alnemo7024@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0005-8275-7553>

¹*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, 61022, Харків, Україна*

ЗАСТОСУВАННЯ СЕРВІСУ GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ АГРОЛАНДШАФТІВ

Безпрецедентна деградація ґрунтового покриву України внаслідок збройної агресії РФ ускладнюється тривалими процесами водної та вітрової ерозії. Традиційні методи обстеження територій наразі обмежені через мінну небезпеку, що робить дистанційне зондування Землі ключовим інструментом екологічної оцінки.

Мета. Практичне використання Google Earth Engine для оцінки впливу еродованості ґрунтів та їх забруднення важкими металами на стан рослинності.

Методи. Дослідження ґрунтується на фітоіндикаційному підході з використанням мультиспектральних даних супутника Sentinel-2.

Результати. Експериментальні дослідження здійснювалися протягом 2024-2025 рр. на базі двох репрезентативних тестових полігонів, розташованих у межах Роганської територіальної громади (Харківський район, Харківська область). Для оцінки стану рослинності (на прикладі сояниці) застосовано вегетаційні індекси NDVI та NDRE. Обробка великих масивів даних здійснювалася автоматизовано в середовищі GEE на базі двох тестових полігонів у Харківській області. На полігоні №1 проведено порівняльний ретроспективний аналіз зон потенційного забруднення важкими металами (внаслідок бомботурбації) та фонових ділянок. Встановлено, що фітоіндикаційні аномалії можуть мати природне походження, що підкреслює важливість порівняння з довоєнними показниками для коректної оцінки воєнних збитків. На полігоні №2 виявлено чітку кореляцію між ступенем еродованості чорноземів та значеннями індексу NDRE: втрата кожних 10 см генетичного профілю ґрунту корелює зі зниженням індексу на 0,01 одиниці. Розраховано сумарний недобір врожаю через ерозію, який для дослідної ділянки склав понад 650 ц.

Висновки. Доведено високу ефективність індексу NDRE як індикатора вмісту хлорофілу на пізніх етапах вегетації. Результати підтверджують, що інтеграція ГІС-технологій та супутникового моніторингу є безальтернативною основою для розробки стратегій повоєнної ремедіації земель та впровадження систем точного землеробства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: земельні ресурси, дистанційне зондування землі, Google Earth Engine, Sentinel-2, вегетаційний індекс, NDRE, ерозія ґрунту, мілітарна деградація

Як цитувати: Кот А. Г., Немошкалов О. М. Застосування сервісу Google Earth Engine для дослідження стану агроландшафтів. *Проблеми неоекології*. 2026. Вип. 45. С. 199–212. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15>

In cites: Kot, A. G., & Nemoshkalov, O.M. (2026), Application of the Google Earth Engine platform for the study of agricultural landscape conditions. *Man and Environment. Issues of Neoeology*, (45), 199–212. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2026-45-15> (in Ukrainian)

Вступ

Земельні ресурси становлять стратегічне національне багатство України, яке потребує системного підходу до бережливого використання, охорони та відновлення.

Проте стан земельного фонду країни ще до початку активних бойових дій характеризувався розвитком інтенсивних процесів деградації, насамперед водною та вітровою

ерозією, що призводило до втрати родючості та погіршення структури ґрунтового покриву [1].

Ерозія ґрунтів є одним із наймасштабніших факторів фізичної деградації земель, що становить пряму загрозу глобальній продовольчій безпеці. За світовими оцінками, близько 80% земель, придатних для землеробства, вже тією чи іншою мірою зазнали помірного або сильного впливу ерозійних процесів. В Україні масштаби деградації набувають критичного характеру: площа ерозійно небезпечних земель сягає майже 18 млн га, з яких 13 млн га загрожує водна ерозія, а 5 млн га - вітрова. Економічні та екологічні наслідки цього явища колосальні. Зокрема, на виробництво 1 т продукції рослинництва (в умовному зерні) втрачається близько 7 т ґрунту, що призводить до мільярдних економічних збитків [2, 3].

Ерозія ґрунтів наразі виступає домінуючим чинником фізичної деградації земельних ресурсів, що безпосередньо загрожує стійкості глобальних продовольчих систем. Згідно з актуальними оцінками FAO, понад 80% світового рілля піддається помірному або сильному впливу деструктивних процесів. В Україні цей виклик набуває ознак національної екологічної кризи: загальна площа ерозійно небезпечних угідь перевищила поріг у 18 млн га. Зокрема, динаміка водної ерозії охоплює 13 млн га, тоді як вітрова (дефляція) активно загрожує ще 5 млн га [2, 4].

Економічний вимір деградації ґрунтового покриву є критичним: встановлено кореляцію, за якої виробництво 1 т сільськогосподарської продукції (у зерновому еквіваленті) супроводжується незворотною втратою близько 7 т родючого шару. Такі темпи призводять не лише до мільярдних прямих економічних збитків, а й до виснаження природного капіталу країни.

В умовах воєнного стану ситуація ускладнюється антропогенно-мілітарним впливом. Утворення вирв від обстрілів, порушення цілісності дернового шару важкою технікою та знищення лісосмуг стають тригерами нових ерозійних осередків, що потребує інтеграції методів ГІС-моніторингу та дистанційного зондування для оперативного оцінювання стану земель [5, 6].

Збройна агресія російської федерації проти України спричинила безпрецедентну в сучасній історії мілітарну деградацію ґрунтового покриву, перетворивши територію

держави на одну з найбільш забруднених боєприпасами у світі [7, 8]. Оскільки понад 15-21 мільйон гектарів українських земель, переважно чорноземів, опинилися під впливом активних бойових дій, масштабна деградація ґрунтових ресурсів становить пряму загрозу екологічній стабільності та глобальній продовольчій безпеці [9-11]. Особливу небезпеку становить хімічне забруднення потенційно токсичними елементами, насамперед важкими металами (Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Ni, Sb), що вивільняються внаслідок детонації снарядів, мін і ракет, а також піролізу знищеної військової техніки [12-14]. Ці забруднювачі є персистентними, не піддаються біологічному розкладанню, пригнічують мікробіоту ґрунту та мають здатність до біоаккумуляції в трофічних ланцюгах «рослина – тварина – людина», при цьому період їхнього природного самоочищення може тривати від сотень до кількох тисяч років [15, 16].

В умовах триваючого конфлікту, мінної небезпеки та обмеженого доступу до територій, дослідження еколого-геохімічного стану мілітарних агроландшафтів із впровадженням інноваційних методів дистанційного зондування та ГІС-технологій є критично важливим для оперативної оцінки шкоди, прогнозування міграції токсикантів і наукового обґрунтування стратегій повоєнної ремедіації земель.

У таких складних умовах традиційні методи моніторингу, засновані на точковому польовому відборі зразків, виявляються надто вартісними, тривалими у часі та часто небезпечними або неможливими для реалізації на великих площах.

Використання технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) відкриває нові можливості для оперативного та неруйнівного контролю стану земель. Особливе місце серед сучасних інструментів посідає хмарна платформа Google Earth Engine (GEE). Її ключовими перевагами є вільний доступ до багаторічних архівів супутникових даних (Sentinel, Landsat), висока швидкість опрацювання колосальних масивів інформації без використання локальних обчислювальних потужностей та можливість проведення точного ретроспективного аналізу стану рослинності та ґрунтів [17].

Мета – практичне використання GEE для оцінки впливу еродованості ґрунтів та їх забруднення важкими металами на стан рослинності.

Методи дослідження

Експериментальні дослідження здійснювалися протягом 2024-2025 рр. на базі двох репрезентативних тестових полігонів, розташованих у межах Роганської територіальної громади (Харківський район, Харківська область).

Наукова концепція роботи ґрунтується на фітоіндикаційному підході, де рослинний покрив розглядається як природний інтегральний індикатор екологічного стану агроландшафту. Для верифікації стану агроценозів застосовано методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що забезпечують високу ефективність та оперативність моніторингу.

Дослідження проводились за двома основними напрямками:

1) Оцінка впливу мілітарного забруднення ґрунтів важкими металами на сільськогосподарську рослинність шляхом дистанційного моніторингу (поле №1, рис.1).

2) Оцінка впливу еродованості ґрунтів на сільськогосподарську рослинність шляхом дистанційного моніторингу (поле №2, рис.1).

У межах наукової співпраці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна з програмою USAID АГРО використано базу геоданих агровиробничих груп ґрунтів Харківської області.

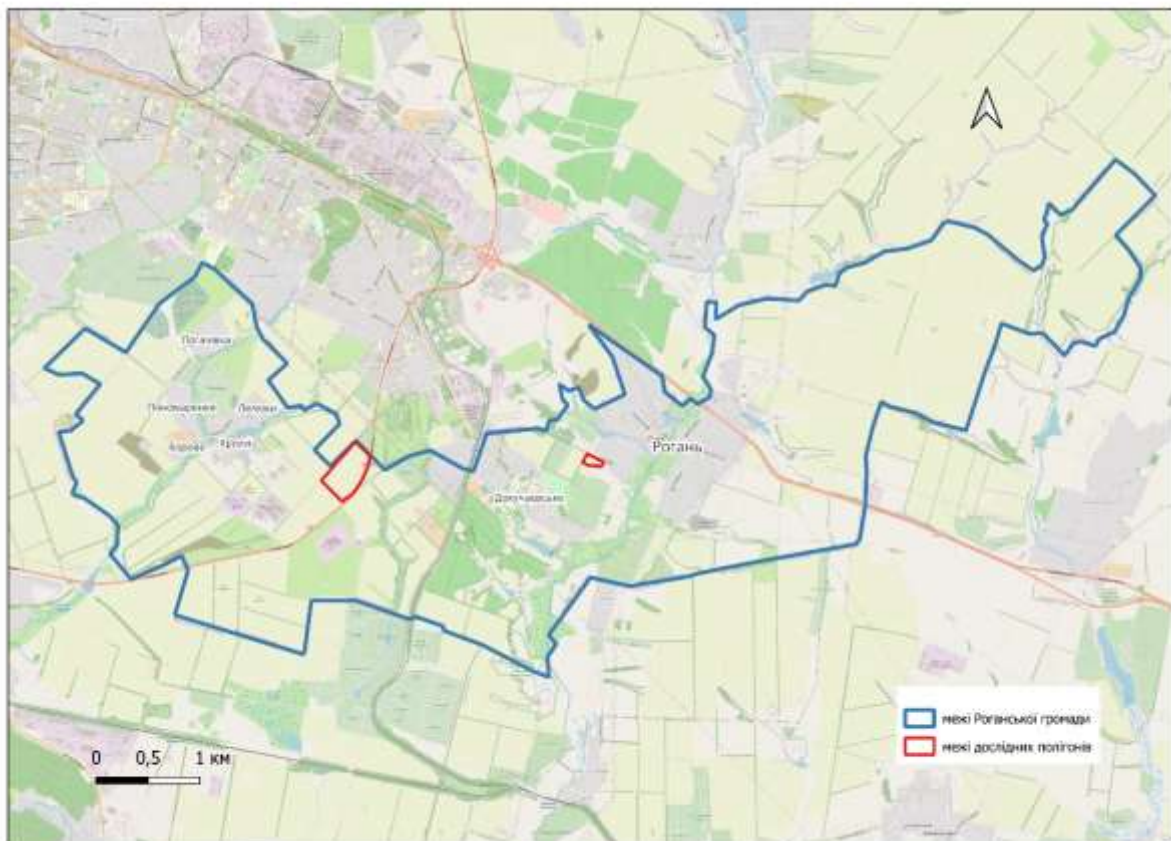


Рис. 1 – Розміщення полігонів дослідження на території Роганської територіальної громади

Fig. 1 – Location of the studied landfills on the territory of the Rohansk territorial community

Згідно з нею загальна площа ґрунтового покриття земель сільськогосподарського призначення в межах Роганської територіальної громади становить 6767,7 га (рис. 2). Шифри агровиробничих груп ґрунтів (рис.2) відпо-

відють «Порядку ведення Державного земельного кадастру» (додатки 2-75 до Порядку) [18].

Аналіз отриманої вибірки свідчить про високе різноманіття ґрунтів території, де

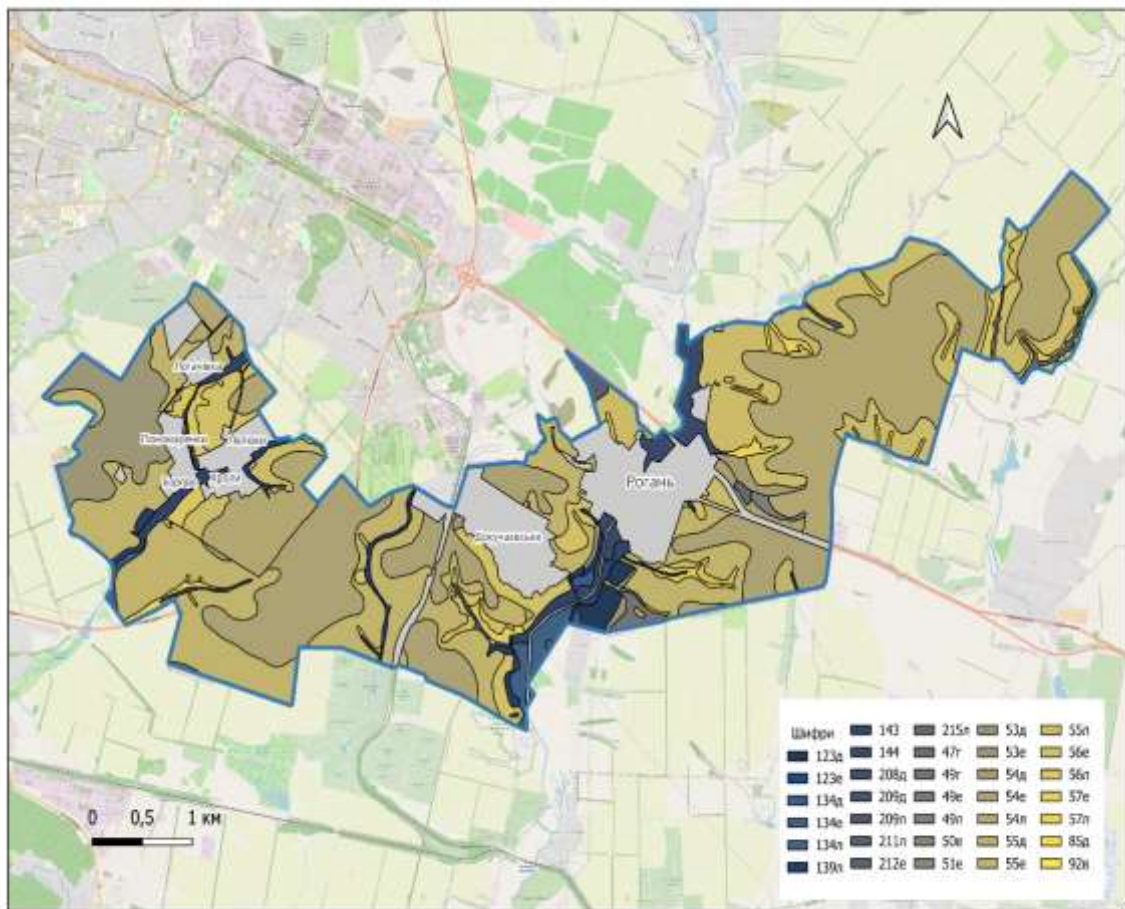


Рис. 2 – Ґрунтовий покрив Роганської територіальної громади

Fig. 2 – Soil cover of the Rohansk territorial community

ідентифіковано 36 різновидів ґрунтів з домінуванням чорноземів типових середньо гумусних важко суглинкових та легко глинистих. Встановлено, що 46% (3109,6 га) загального ґрунтового покриву громади класифікуються як особливо цінні ґрунти [19].

Водночас виявлено значне поширення деградаційних процесів: еродовані ґрунти займають 3090,9 га, що становить 45,7% від загального ґрунтового фонду. Слід зауважити, що використана база геоданих містить інформацію виключно щодо аграрних угідь, тоді як відомості про стан ґрунтового покриву в межах міст, населених пунктів та земель лісового фонду наразі відсутні.

У дослідженнях застосовувались космічні знімки місії Sentinel-2 (програма «Copernicus»), зокрема дані супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B. Кожен апарат оснащений мультиспектральним сенсором, що здійснює знімання у 13 діапазонах електромагнітного спектра (Copernicus Data

Space Ecosystem, станом на 8 січня 2026 р.). Доступ до матеріалів отримано за посиланням: <https://dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2>.

Наявність мультиспектральної зйомки дозволяє створювати синтезовані зображення, що відбивають різноманітні вегетаційні індекси зокрема нормалізований відносний індекс вегетації (NDVI) та нормалізований різницевий індекс «червоного краю» (NDRE).

Нормалізований відносний вегетаційний індекс (NDVI) є одним із найбільш вживаних показників для оцінки стану рослинного покриву. Фізичний принцип розрахунку NDVI базується на контрасті між інтенсивним поглинанням сонячної радіації пігментами хлорофілу в червоній зоні спектра (Red) та високим коефіцієнтом розсіювання енергії мезофілом листка в ближній інфрачервоній області (NIR).

Розрахунок індексу здійснюється за формулою:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (1)$$

де:

- NIR - значення відбивної здатності в ближній інфрачервоній області спектра;
- Red - значення відбивної здатності в червоній області спектра.

NDVI змогу кількісно оцінити фотосинтетичну активність та густоту біомаси. Високі значення індексу свідчать про розвинену вегетативну масу та сприятливий фітосанітарний стан, тоді як низькі показники вказують на дефіцит вологи, пошкодження шкідниками або стадію деградації хлоропластів [20]. Проте NDVI має обмеження у вигляді ефекту «насичення»: при досягненні максимальної щільності листового апарату він втрачає чутливість до подальших змін у стані посівів [21].

Результати та обговорення

Активні бойові дії тривали на території громади у березні 2022 року. Дистанційний моніторинг проявів бомботурбації виявив 916 вирв, що створює передумови для забруднення ґрунтів громади важкими металами [22].

Дослідження по оцінці забруднення ґрунтів важкими металами проводились на полігоні №1 загальною площею 53 га (рис. 1). Обстежуване поле постраждало у ході бойо-

Для нівелювання цього недоліку та отримання більш точних даних на пізніх етапах онтогенезу рослин використовується NDRE. Його принципова відмінність полягає у заміні червоного каналу на вузький перехідний діапазон спектра між червоним та ближнім інфрачервоним випромінюванням - Red Edge.

Формула розрахунку набуває вигляду:

$$NDRE = (NIR - RedEdge) / (NIR + RedEdge) \quad (2)$$

Оскільки випромінювання у спектрі Red Edge здатне проникати крізь верхній ярус листя значно глибше, ніж звичайне червоне світло, NDRE забезпечує об'єктивну оцінку вмісту хлорофілу та азоту в усій товщі рослинного покриву [21].

Пошук, розрахунок вегетаційних індексів обробка та їх аналіз проводились автоматично за допомогою сервісу Google Earth Engine.

вих дій, на рис. 3 а наведені вирви, які були зафіксовані в ході дешифрування космічних знімків [22]. Аналіз розташування вирв показує, що від обстрілів переважно постраждала лише центральна частина поля площею 11,3 га. На ній було зафіксовано 92 вирви, отже щільність вирв на ній становить 8,14 шт/га. Ця частина була виділена як потенційно забруднена важкими металами (рис.3б).



а)



б)

Рис. 3 – Виділення потенційно забрудненої та незабрудненої зон на полігоні №1
Fig. 3 – Identification of potentially contaminated and uncontaminated areas at landfill No. 1

Робочою гіпотезою визначено припущення, що на потенційно забрудненій території (рис. 3б, зона 2) розвиток с.-г. рослин буде гіршим ніж у незабрудненій (рис. 3б, зона 1).

За допомогою сервісу «Карта посівів в Україні» визначені агрофони для полігону №1 за останні роки. Встановлено, що у 2019, 2021, 2023 та 2025 роках на цій ділянці вирощувався соняшник, що дозволило порівняти стан ідентичної культури у фоновий період (до початку активних бойових дій) та в умовах наявного мілітарного забруднення.

Оцінювання стану рослин проводилось за вегетаційним індексом NDRE, який є особливо чутливим до вмісту хлорофілу в листі рослин. Розрахунок NDRE проводився на основі даних космічної зйомки супутника Sentinel-2 за допомогою онлайн-сервісу Google Earth Engine. Для автоматизації процесу було розроблено алгоритм, який відбирав усі безхмарні знімки протягом вегетаційного циклу та розраховував індекс окремо

для зон потенційно забруднених і незабруднених ґрунтів, а також формував синтезований усереднений растр за рік. Результати аналізу представлені у таблиці 1.

Згідно з робочою гіпотезою, середньорічні значення NDRE на забрудненій території (NDRE_{з.т.}) мають бути нижчими за відповідні показники на незабрудненій ділянці (NDRE_{н.т.}), а різниця між ними (Delta NDRE*100) повинна бути від'ємною, що свідчатиме про токсичний вплив на рослини

Другий етап наукової роботи присвячений вивченню впливу еродованості ґрунтів на стан сільськогосподарських культур у межах полігону №2. Основним діагностичним показником виступав нормалізований відносний вегетаційний індекс (NDVI). Обчислення індексу здійснювалося на основі мультиспектральних даних супутника Sentinel-2 із використанням інструментарію хмарної платформи Google Earth Engine.

Таблиця 1

Результати розрахунку індексу NDRE для полігону №1

Table 1

Results of the NDRE index calculation for polygon No. 1

Рік /Year	С.-г. культура / Agricultural culture	NDRE _{з.т.} / contaminated area	NDRE _{н.т.} / uncontaminated area	Delta NDRE*100
2019	Соняшник / Sunflower	0,328	0,337	-0,922
2021	Соняшник / Sunflower	0,341	0,345	-0,378
2023	Соняшник / Sunflower	0,378	0,383	-0,515
2025	Соняшник / Sunflower	0,346	0,352	-0,624

У ході верифікації наявних картографічних матеріалів було встановлено необхідність актуалізації архівної ґрунтової карти дослідної ділянки. Порівняльний аналіз із серією актуальних космічних знімків виявив суттєві невідповідності меж еродованих угідь (рис. 4а). Результати дешифрування даних сервісу Google Earth свідчать про значну трансформацію контурів деградованих ділянок та інтенсифікацію процесів ерозії порівняно з ретроспективними даними. На основі отриманих результатів було розроблено оновлену карту агропромислових груп ґрунтів полігону (рис. 4б).

Для подальшої аналітичної обробки даних у середовищі хмарної платформи Google Earth Engine було розроблено спеці-

алізований алгоритм, призначений для розрахунку середньозважених значень вегетаційного індексу NDRE. Обчислення проводилися диференційовано для кожного ґрунтового виділу відповідно до актуалізованої картосхеми агропромислових груп ґрунтів (рис. 4б) протягом вегетаційного періоду 2025 року. Отримані кількісні характеристики систематизовано та наведено у табл. 2.

Результати дистанційного моніторингу стану сільськогосподарської рослинності на тестовому полігоні №1 свідчать про стаке зниження значень вегетаційного індексу NDRE на ділянках потенційного мілітарного забруднення порівняно з контрольними (фоновими) зонами (табл. 1). Високий ступінь достовірності отриманих даних зу-



а) архівна карта



б) оновлена карта

Шифр агрогруп: 54е Черноземи типові середньогумусні важкосуглинкові;
55е Черноземи типові і черноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові; 56е Черно-
ноземи типові і черноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкові

Рис. 4 – Оновлення карти агровиробничих груп ґрунтів полігона №2

Agrogroup code: 54e Typical chernozems, medium humus heavy loam;

55e Typical chernozems and strongly degraded chernozems, slightly washed out heavy loam;

56e Typical chernozems and strongly degraded chernozems, medium washed out heavy loam)

Fig. 4 – Updating the map of agricultural production groups of soils of polygon No. 2

Таблиця 2

Результати розрахунку індексу NDRE для полігону №2

Table 2

Calculation results of NDRE index for polygon #2

Знімок /Snapshot	Дата / Date	Середнє / Average NDRE 54e	Середнє / Average NDRE 55e	Середнє / Average NDRE 56e
20250420T083559_20250420T083901_T36UYA	20,04,2025	0,27	0,26	0,26
20250420T083559_20250420T083901_T37UCR	20,04,2025	0,27	0,26	0,26
20250425T083621_20250425T083621_T36UYA	25,04,2025	0,29	0,25	0,25
20250425T083621_20250425T083621_T37UCR	25,04,2025	0,29	0,25	0,24
20250606T084501_20250606T084457_T36UYA	06,06,2025	0,36	0,23	0,26
20250606T084501_20250606T084457_T37UCR	06,06,2025	0,36	0,23	0,26
20250609T083559_20250609T084325_T36UYA	09,06,2025	0,35	0,23	0,25
20250609T083559_20250609T084325_T37UCR	09,06,2025	0,35	0,23	0,25
20250624T083621_20250624T084314_T36UYA	24,06,2025	0,32	0,29	0,3
20250706T083741_20250706T083740_T36UYA	06,07,2025	0,53	0,51	0,47
20250706T083741_20250706T083740_T37UCR	06,07,2025	0,52	0,51	0,47
20250709T083559_20250709T084337_T36UYA	09,07,2025	0,51	0,52	0,47
20250709T083559_20250709T084337_T37UCR	09,07,2025	0,5	0,52	0,47
20250714T083621_20250714T084118_T36UYA	14,07,2025	0,5	0,53	0,48
20250729T083559_20250729T084008_T36UYA	29,07,2025	0,44	0,51	0,46
20250729T083559_20250729T084008_T37UCR	29,07,2025	0,44	0,51	0,46
20250805T084501_20250805T084457_T36UYA	05,08,2025	0,53	0,55	0,51
20250808T083559_20250808T083936_T36UYA	08,08,2025	0,49	0,54	0,51
20250808T083559_20250808T083936_T37UCR	08,08,2025	0,48	0,54	0,51
20250828T083559_20250828T083926_T36UYA	28,08,2025	0,44	0,45	0,42
20250828T083559_20250828T083926_T37UCR	28,08,2025	0,43	0,45	0,41
20250912T083611_20250912T084011_T36UYA	12,09,2025	0,32	0,27	0,26
20250912T083611_20250912T084011_T37UCR	12,09,2025	0,32	0,26	0,26
20250914T084451_20250914T084454_T36UYA	14,09,2025	0,35	0,27	0,26
20250914T084451_20250914T084454_T37UCR	14,09,2025	0,34	0,27	0,26
20250922T083651_20250922T083737_T36UYA	22,09,2025	0,35	0,25	0,24
20250922T083651_20250922T083737_T37UCR	22,09,2025	0,35	0,25	0,23
20251004T084501_20251004T084456_T36UYA	04,10,2025	0,29	0,24	0,22
20251004T084501_20251004T084456_T37UCR	04,10,2025	0,29	0,23	0,22
Середнє за рік		0,39	0,36	0,34

мовлений застосуванням релевантної методологічної схеми: аналіз проводився на посівах ідентичної культури (соняшник) протягом чотирьох часових зрізів, що охоплюють два довоєнні роки (ретроспективний фон) та два роки імпаکتного впливу (період активних бойових дій). За структурою побудови дана модель відповідає параметрам однофакторного польового дослідження з двократною повторністю, що дозволяє мінімізувати вплив випадкових чинників та верифікувати виявлені закономірності.

Численні дослідження підтверджують можливість непрямого моніторингу ВМ у ґрунті, заснованого на аналізі фізіологічних змін у рослинах під впливом токсичного

стресу [23-25]. Рослини акумулюють ВМ, що мігрують із ґрунтового розчину через кореневу систему до вегетативних органів - стебел та листя [23, 26-28]. Накопичення таких елементів, як кадмій (Cd), арсен (As), ртуть (Hg), мідь (Cu), хром (Cr), свинець (Pb), цинк (Zn) та нікель (Ni), ініціює каскад фізіологічних змін. Ці внутрішні трансформації включають пригнічення синтезу хлорофілу, руйнування ультраструктури клітин, інактивацію ферментів та порушення процесів фотосинтезу і транспірації [29]. Оскільки фізіологічний стан рослин безпосередньо корелює з їхніми оптичними властивостями, сенсори ДЗЗ здатні реєструвати ці зміни у

видимому та інфрачервоному діапазонах електромагнітного спектра [30].

Попри теоретичну можливість дистанційної діагностики забруднення ґрунтів за станом фітоценозів, підтверджену аналізом наукової літератури, у межах даного дослідження встановити пряму детермінацію не вдалося. Результати свідчать, що знижені значення індексу NDRE в межах потенційно імпактної зони спостерігалися релевантно як під час воєнних дій, так і в довоєнний період. Це дає підстави стверджувати про наявність сталого фактора впливу на стан рослинності, що має немілітарне походження.

Зважаючи на те, що ґрунтовий покрив полігону №1 є гомогенним і представлений чорноземами типовими середньогумусними важкосуглинковими (агрогрупа 54е), зафіксована просторова неоднорідність не може бути пояснена відмінностями в генезисі ґрунтів. Ідентифікація цих прихованих чинників (мікрорельєф, особливості гідрологічного режиму тощо) є необхідною умовою для методичного обґрунтування алгоритмів точного землеробства та диференційованого управління продуктивністю даного агроландшафту.

Результати досліджень на полігоні №2 підтверджують детермінований зв'язок між ступенем еродованості ґрунтів та рівнем продуктивності агрофітоценозів. Згідно з даними глобального мета-аналізу [31], кумулятивний негативний вплив на врожайність посилюється експоненціально зі збільшенням глибини ерозійного зрізу. Якщо втрата верхнього шару до 5 см може нівелюватися буферністю ґрунту, то подальша деградація призводить до нелінійного падіння врожайності: при втраті 5-10 см показник зниження становить -0,34, а при критичній ерозії (20-30 см) сягає -0,99, що робить повне відновлення продуктивності неможливим навіть за інтенсивної хімізації та меліорації [31].

Аналіз середньорічних значень індексу NDRE за 2025 рік (на основі репрезентативної вибірки з 29 супутникових знімків) виявив чітку диференціацію стану посівів залежно від агропромислової групи ґрунтів (табл. 2). Для модальних (незмитих) чорноземів (агрогрупа 54е) середнє значення NDRE становило 0,39,

для слабозмитих (55е) - 0,36, а для середньозмитих (56е) - 0,34. Враховуючи морфологічні особливості, де слабозмиті ґрунти характеризуються зменшенням профілю на 20 см, а середньозмиті - на 40 см, встановлено індикативну залежність: зниження індексу NDRE на кожні 0,01 одиниці корелює з втратою приблизно 10 см глибини генетичного профілю ґрунту.

Аналіз просторової структури ґрунтового покриву полігону №2 свідчить про значну домінацію деградованих ділянок: площа модальних (незмитих) ґрунтів становить лише 0,12 га, тоді як слабозмиті та середньозмиті відміни займають 3 га та 2,21 га відповідно. Для кількісної оцінки впливу ерозії на продуктивність було застосовано методіку на основі метрики Тарарико (1983), згідно з якою втрата кожного сантиметра потужності генетичного профілю ґрунту призводить до зниження врожайності на 0,5-2 ц/га.

Враховуючи, що середня врожайність соняшнику в Україні у 2025 році становила 1,83 т/га, та узявши середнє значення метрики Тарарико - 1 ц на 1 см - було проведено розрахунок гіпотетичного валового збору для різних ґрунтових виділів. Зокрема, для незмитих ґрунтів (агрогрупа 54е) цей показник визначено на рівні 21,96 ц, тоді як для слабозмитих (55е) та середньозмитих (56е) ділянок розрахункові значення становлять 489 ц та 316 ц відповідно. Таким чином, сумарний недобор врожаю внаслідок ерозійних процесів на досліджуваному полігоні сягає 659,39 ц (виходячи з різниці між потенційно можливим та фактичним збором).

Отримані дані підкреслюють, що інтенсивність водної ерозії є критичним лімітуючим чинником, який зумовлює нелінійне падіння продуктивності агрофітоценозів. Виявлена кореляція між ступенем змитості ґрунту та значеннями індексу NDRE дозволяє використовувати методи дистанційного зондування як надійний інструмент для прецизійної оцінки економічних збитків та районування територій за ступенем деградації. Це створює методичне підґрунтя для впровадження систем диференційованого внесення добрив і меліорантів з метою часткової компенсації втрат родючості на еродованих землях.

Висновки

Підтверджено ефективність використання хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) та мультиспектральних даних Sentinel-2 для моніторингу агроландшафтів в

умовах мілітарного й ерозійного навантаження. Встановлено закономірності просторової неоднорідності рослинного покриву, виявлено зв'язок спектральних індикаторів із

деградацією ґрунтів та обґрунтовано можливість практичного застосування отриманих результатів у системах точного землеробства.

Комплексне дослідження стану агроландшафтів Роганської територіальної громади в умовах мілітарного та ерозійного впливу дозволяє сформулювати низку концептуальних висновків, що мають як теоретичне, так і прикладне значення для сучасної екології та агрономії:

– Підтверджено стратегічну роль хмарної платформи Google Earth Engine (GEE) як безальтернативного інструменту для проведення екологічного моніторингу в умовах збройного конфлікту. Можливість опрацювання колосальних масивів мультиспектральних даних Sentinel-2 без використання локальних обчислювальних потужностей дозволяє нівелювати ризики, пов'язані з мінною небезпекою та обмеженим доступом до територій, а автоматизація розрахунку вегетаційних індексів (NDVI, NDRE) забезпечує високу оперативність отримання результатів, що критично важливо для прийняття управлінських рішень у агросекторі.

– Методологічно доведено необхідність впровадження ретроспективного аналізу при оцінці мілітарної деградації земель: кейс полігону №1 продемонстрував, що фітоіндикаційні аномалії, які можуть трактуватися як наслідок бойового впливу, часто мають фонове походження, зумовлене природною неоднорідністю ґрунтового покриву, що має фундаментальне значення для коректної оцінки воєнних збитків, репарацій і планів рекультивативації.

– Встановлено чітку кількісну залежність між рівнем деградації ґрунту та його спектральною відповіддю: використання ін-

дексу NDRE виявилось більш інформативним порівняно з NDVI на пізніх етапах вегетації соня

шнику, а отримані результати свідчать, що ерозійні процеси є домінуючим чинником зниження родючості, причому втрата кожних 10 см ґрунтового профілю корелює зі зниженням індексу вегетації на 0,01 одиниці, а сумарний недобір урожаю понад 650 ц демонструє масштаб економічних втрат.

– Результати дослідження вказують на необхідність переходу від загальних методів землеробства до прецизійних стратегій відновлення, оскільки дані дистанційного зондування вже можуть слугувати основою для створення карт диференційованого внесення меліорантів і добрив, що забезпечує як економію ресурсів, так і цільове відновлення найбільш деградованих ділянок.

– Результати виходять за межі суто аграрного моніторингу та порушують питання соціальної ціни деградації ландшафтів, адже мінування та фізичне руйнування ґрунтового покриву є складовою ширшої гуманітарної кризи, формуючи потребу в розвитку суміжних напрямів, зокрема біомедичної інженерії та 3D-друку протезів, що дозволяє розглядати повоєнне відновлення у новій парадигмі еко-соціальної реабілітації.

Можна стверджувати, що синергія сучасних ГІС-технологій та класичного ґрунтознавства відкриває шлях до науково обґрунтованого повоєнного відродження України. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання типів мілітарних пошкоджень та розробку цифрових двійників агроландшафтів, що дозволить прогнозувати міграцію важких металів у трофічних ланцюгах і гарантувати безпеку харчової продукції.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Внесок авторів: автори зробили рівний внесок у цю роботу.

Декларація про використання ШІ

В роботі використовувався штучний інтелект Gemini 3.0 для розробки алгоритму для сервісу Google Earth Engine.

Список використаної літератури

1. Балюк С. А., Кучер А. В., Максименко Н. В. Ґрунтові ресурси України: стан, проблеми та стратегія сталого управління. *Український географічний журнал*. 2021. № 2. С. 3–11. <https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003>

2. Dudiak N., Pichura V., Potravka L., Strachuk N. Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, 2021. (50), 10–26 <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
3. Bulygin S., Antonyuk D. Soil erosion in Ukraine. *Рослинництво та ґрунтознавство*. 2016. No. 235. 145 – 151. URL: <https://agriculturalscience.com.ua/uk/journals/235-2016>
4. Sartori M., Ferrari E., M'Barek R., et al. Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Erosion on Global Food Security. *Ecological Economics*, 2024. 219, Article 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108103>
5. Kopittke P. M., Menzies N. W., Wang P., et al. Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 2019. Vol. 132, Article 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
6. Panagos P., Standardi G., Borrelli P., et al. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union. *Land Degradation & Development*, 2018. Vol. 29. No 3. P. 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
7. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О. та ін. Вплив збройної агресії та воєнних дій на сучасний стан ґрунтового покриву, оцінка шкоди та збитків, заходи з відновлення: наукова доповідь. 2022. Харків: Бровін. URL: https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna
8. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Київ: ГО «Екодія». 2023. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii2.pdf>
9. Sytar O., Taran N. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. Vol. 23, No. 4. P. 881–887. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.4.3603>
10. Яценко Л., Андрощук О., Василенко Л., Черноіван Ю. Екологічні ризики забруднення важкими металами ґрунтів, постраждалих від війни, в Україні. *Європейський журнал екологічних наук*. 2025. Т.15. № 1. С. 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
11. Novakovska I., Belousova N., Hunko L. Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 2025. 24(1), 129–145. <https://doi.org/10.31648/aspal.9788>
12. Petrushka K., Petrushka I., Holdrych A. Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, no. 2. P. 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>
13. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., 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>
14. Trokhymenko G., Magas N., Shumilova O., Klochko V. Analysis of surface water quality indicators in the Dniprobug estuary region after the destruction of the Kakhovka dam. *Environmental Problems*, 2023. Vol. 8. No 4. P. 231–240 <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.231>
15. Lovynska V. et al. Monitoring Heavy Metals and Metalloids in Soils and Vegetation by Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, no. 17. Art. 3221. <https://doi.org/10.3390/rs16173221>
16. Безсонний В. Л., Некос А. Н., Гололобова О. О. Оцінка екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*, 2024. № 31. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02>
17. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., et al. Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 2023. Vol. 15. No 14. P.3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
18. Про затвердження Порядку ведення Державного земельного кадастру. Постанова Кабінету Міністрів України від 17 жовт. 2011 р. № 1051. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п> (дата звернення 15.03.2026)
19. Про затвердження переліку особливо цінних груп ґрунтів. Наказ Державного комітету України по земельних ресурсах від 06.10.2003 № 245. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0979-03> (дата звернення 15.03.2026)
20. Gao Q., Zribi M., Escorihuela M. J., Baghdadi N. Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 9. P. 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
21. Ali A., Imran M., Khan M. A. Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. 2022. URL: <https://www.researchgate.net/publication/359199985>
22. Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Diadin D. V., Siedov A. O. Remote monitoring of the consequences of hostilities on the territory of the Kharkiv region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, 2023. No 28. P. 71-82. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-06>
23. Zhong L., Yang S., Rong Y., et al. Indirect Estimation of Heavy Metal Contamination in Rice Soil Using Spectral Techniques. *Plants*. 2024. Vol. 13, no. 6. P. 831. <https://doi.org/10.3390/plants13060831>
24. Zhong L., Chu X., Qian J., et al. Multi-Scale Stereoscopic Hyperspectral Remote Sensing Estimation of Heavy Metal Contamination in Wheat Soil. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, no. 9. P. 2396. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092396>

25. Lin W., Tu Y., Liu F., et al. Spectral characteristics of the correlation between elemental arsenic and vegetation stress in the Yueliangbao gold mining. *Environmental Geochemistry and Health*. 2023. Vol. 45. P. 8203–8219. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01693-7>
26. Rashid A., Schutte B., Ulery A., et al. Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1521. : <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
27. Chen S. et al. Identifying soil heavy metal sources in typical industrial cities: A comprehensive approach using receptor models and machine learning. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 945. P. 174068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174068>
28. Chen Y., Shi W., Aihemaitijiang G., et al. Hyperspectral inversion of heavy metal content in farmland soil under conservation tillage of black soils. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 124 , <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83479-0>
29. Wang Y., Zuo X., Zou B., et al. A remote sensing analysis method for soil heavy metal pollution sources at site scale considering source-sink relationships. *The Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 942. P. 174021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174021>
30. Lassalle G., Fabre S., Credoza A., et al. Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 447. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z>
31. Zhang L., Wang Y., Zou B., et al. Global analysis of the relationship between soil erosion and crop yield. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 795. P. 148856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148856>

Отримано: 22.03.2026 / Переглянуто: 23.04.2026 / Прийнято: 30.04.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

A. G. KOT¹,

PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: anna.kot@karazin.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4700-2620>

O. M. NEMOSHKALOV¹

PhD Student of the Department of Ecology and Environmental Management
e-mail: alnemo7024@gmail.com ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0005-8275-7553>

¹*V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Square Kharkiv, 61022, Ukraine*

APPLICATION OF THE GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM FOR THE STUDY OF AGRICULTURAL LANDSCAPE CONDITIONS

The unprecedented degradation of Ukraine's soil cover as a result of the armed aggression of the Russian Federation is complicated by long-term processes of water and wind erosion. Traditional methods of surveying territories are currently limited due to mine danger, which makes remote sensing of the Earth a key tool for environmental assessment.

Purpose. Practical use of Google Earth Engine to assess the impact of soil erodibility and heavy metal contamination on the state of vegetation.

Methods. The study is based on a phytoindication approach using multispectral data from the Sentinel-2 satellite.

Results. Experimental studies were carried out during 2024-2025 on the basis of two representative test sites located within the Rohansk territorial community (Kharkiv district, Kharkiv region). To assess the state of vegetation (using the example of sunflower), the vegetation indices NDVI and NDRE were used. Processing of large data sets was carried out automatically in the GEE environment on the basis of two test sites in the Kharkiv region. At site No. 1, a comparative retrospective analysis of zones of potential heavy metal contamination (due to bomb disturbance) and background areas was conducted. It was established that phytoindication anomalies may have a natural origin, which emphasizes the importance of comparison with pre-war indicators for a correct assessment of war damage. At site No. 2, a clear correlation was found between the degree of erosion of black soils and the values of the NDRE index: the loss of every 10 cm of the soil genetic profile correlates with a decrease in the index by 0.01 units. The total crop loss due to erosion was calculated, which for the experimental site amounted to over 650 c.

Conclusions. The high efficiency of the NDRE index as an indicator of chlorophyll content in the late stages of vegetation has been proven. The results confirm that the integration of GIS technologies and satellite monitoring is an alternative basis for developing post-war land remediation strategies and implementing precision agriculture systems.

KEYWORDS: *land resources, remote sensing, Google Earth Engine, Sentinel-2, vegetation index, NDRE, soil erosion, military degradation*

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the authors have fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and duplicate publication.

Authors Contribution: all authors have contributed equally to this work.

AI Statement

The work used Gemini 3.0 artificial intelligence to develop an algorithm for the Google Earth Engine service.

References

- Baliuk S. A., Kucher A. V., & Maksymenko N. V. (2021). Soil resources of Ukraine: state, problems and strategy for sustainable management. *Ukrainian Geographical Journal*, (2), 3–11 DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.003> (in Ukrainian).
- Dudiak N., Pichura V., Potravka L., & Straticuk N. (2021). Environmental and economic effects of water and deflation destruction of steppe soil in Ukraine. *Journal of Water and Land Development*, (50), 10–26. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.138156>
- Bulygin S., & Antonyuk D. (2016). Soil erosion in Ukraine. *Scientific Journal «Plant Growing and Soil Science»*, (235). Retrieved from <https://agriculturalscience.com.ua/uk/journals/235-2016>
- Sartori M., Ferrari E., M'Barek R., et al. (2024). Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Erosion on Global Food Security. *Ecological Economics*, 219, Article 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108103>
- Kopittke P. M., Menzies N. W., Wang P., et al. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. *Environment International*, 132, Article 105078. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>
- Panagos P., Standardi G., Borrelli P., et al. (2018). Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union. *Land Degradation & Development*, 29(3), 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
- Baliuk S. A., Kucher A. V., Solokha M. O., et al. (2022). Impact of armed aggression and hostilities on the current state of the soil cover, assessment of damage and losses, restoration measures: scientific report. Kharkiv: Brovin Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna (in Ukrainian).
- Splodytel A., Holubtsov O., Chumachenko S., & Sorokina L. (2023). The impact of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Kyiv: Ecoaction. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/367046551_Vpliv_zbrojnoi_agresii_ta_voen-nih_dij_na_sucasnij_stan_gruntovogo_pokrivu_ocinka_skodi_ta_zbitkiv_zahodi_z_vidnovlenna (in Ukrainian).
- Sytar O., & Taran N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review. *Journal of Central European Agriculture*, 23(4), 881–887. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/23.4.3603>
- Yashchenko L., Androshchuk O., Vasylenko L., & Chornoivan Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*, 15(1), 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
- Novakovska I., Belousova N., & Hunko L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 24(1), 129–145. <https://doi.org/10.31648/aspal.9788>
- Petrushka K., Petrushka I., & Holdrych A. (2024). Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems*, 9(2), 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>
- Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., et al. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), Article 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
- Trokhymenko G., Magas N., Shumilova O., & Klochko V. (2023). Analysis of surface water quality indicators in the Dnipro-Bug estuary region after the destruction of the Kakhovka dam. *Environmental Problems*, 8(4), 231–240. <https://doi.org/10.23939/ep2023.04.231>
- Lovynska V., et al. (2024). Monitoring Heavy Metals and Metalloids in Soils and Vegetation by Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*, 16(17), Article 3221. <https://doi.org/10.3390/rs16173221>
- Bezsonnyi V. L., Nekos A. N., & Hololobova O. O. (2024). Assessment of environmental risk of soil pollution by heavy metals. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Ecology»*, (31) <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02> (in Ukrainian).

17. Velastegui-Montoya A., Montalván-Burbano N., et al. (2023). Google Earth Engine: A Global Analysis and Future Trends. *Remote Sensing*, 15(14), 3675. <https://doi.org/10.3390/rs15143675>
18. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2011). On approval of the Procedure for maintaining the State Land Cadastre: Decree of October 17, 2011, No. 1051. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1051-2012-п> (in Ukrainian).
19. State Committee of Ukraine for Land Resources. (2003). On approval of the list of especially valuable groups of soils: Order of 06.10.2003 No. 245. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0979-03> (in Ukrainian).
20. Gao Q., Zribi M., Escorihuela M. J., & Baghdadi N. (2017). Synergetic Use of Sentinel-1 and Sentinel-2 Data for Soil Moisture Mapping at 100 m Resolution. *Sensors*, 17(9), 1966. <https://doi.org/10.3390/s17091966>
21. Ali A., Imran M., & Khan M. A. (2022). Evaluating Sentinel-2 red edge through hyperspectral profiles for monitoring LAI & chlorophyll content of Kinnow Mandarin orchards. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/359199985>
22. Achasov A. B., Seliverstov O. Y., Diadin D. V., & Siedov A. O. (2023). Remote monitoring of the consequences of hostilities on the territory of the Kharkiv region. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (28), 71–82. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-06>
23. Zhong L., Yang S., Rong Y., et al. (2024). Indirect Estimation of Heavy Metal Contamination in Rice Soil Using Spectral Techniques. *Plants*, 13(6), 831. <https://doi.org/10.3390/plants13060831>
24. Zhong L., Chu X., Qian J., et al. (2023). Multi-Scale Stereoscopic Hyperspectral Remote Sensing Estimation of Heavy Metal Contamination in Wheat Soil. *Agronomy*, 13(9), 2396. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092396>
25. Lin W., Tu Y., Liu F., et al. (2023). Spectral characteristics of the correlation between elemental arsenic and vegetation stress in the Yueliangbao gold mining. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 8203–8219. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01693-7>
26. Rashid A., Schutte B., Ulery A., et al. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
27. Chen S., et al. (2024). Identifying soil heavy metal sources in typical industrial cities: A comprehensive approach using receptor models and machine learning. *Science of The Total Environment*, 945, 174068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174068>
28. Chen Y., Shi W., Aihemaitijiang G., et al. (2025). Hyperspectral inversion of heavy metal content in farmland soil under conservation tillage of black soils. *Scientific Reports*, 15, 124. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83479-0>
29. Wang Y., Zuo X., Zou B., et al. (2024). A remote sensing analysis method for soil heavy metal pollution sources at site scale considering source-sink relationships. *The Science of the Total Environment*, 942, 174021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174021>
30. Lassalle G., Fabre S., Credoz A., et al. (2021). Mapping leaf metal content over industrial brownfields using airborne hyperspectral imaging and optimized vegetation indices. *Scientific Reports*, 11, 447. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79439-z>
31. Zhang L., Wang Y., Zou B., et al. (2021). Global analysis of the relationship between soil erosion and crop yield. *Science of The Total Environment*, 795, 148856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148856>

Submission received: 22.03.2026 / Revised: 23.04.2026 / Accepted: 30.04.2026 / Published: 30.05.2026