

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04>

Оксана ТОНХА¹, д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: oksana16095@gmail.com

Олександр МЕНЬШОВ², д-р геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Дмитро ЛІТВИНОВ¹, д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-6589-3805
e-mail: litvinovdv@nubip.edu.ua

Ксенія БОНДАР^{2,3}, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Олена ГЛАЗУНОВА¹, д-р пед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0136-4936
e-mail: o-glazunova@nubip.edu.ua

Олена ЛІТВИНОВА¹, канд. с.-г. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-0962-8406
e-mail: litvinova@nubip.edu.ua

Олена ПІКОВСЬКА¹, канд. с.-г. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-5052-9223
e-mail: pikovska@nubip.edu.ua

Віктор ЗАБАЛУЄВ¹, д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-9299-0651
e-mail: viaza@ukr.net

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
³Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

ОЦІНКА РІВНІВ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ПІВДНЯ УКРАЇНИ, ПОШКОДЖЕНИХ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Вступ. Російська агресія та бойові дії в Україні спричиняють значні пошкодження та забруднення ґрунтів. Близько 139 тис. кв. км українських територій зазнали воєнного забруднення, що призводить до щорічних економічних втрат у 11,2 млрд доларів через заміновані поля. Деградаційні процеси впливають на понад 15 млн га земель, зокрема на понад 5 млн га чорноземів, які зазнали різних видів мілітарної деградації: фізичної, механічної, хімічної, фізико-хімічної та біологічної.

Методи. Для належного використання та дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних речовин під час аналізу та оцінки якості ґрунтів, вибору методів їх визначення й контролю, а також встановлення загальних вимог і процедур для проведення відповідних робіт використовуються нормативно-правові акти та стандарти.

Результати. Під час дослідження проаналізовано ґрунтові ресурси сіл Благодатне, Киселівка, Васильки та Максимівка, розташованих у Миколаївському районі на схід від Миколаєва. Оцінка коефіцієнта концентрації (Кс) виявила надзвичайно високі показники для міді (від 8,2 до 81,19) і кадмію, що вимагає запровадження комплексного моніторингу та вдосконалених технологій очищення для стабілізації екосистеми. Диференціація забруднення залежно від типу домішок показала, що зразки ґрунту, насичені нафтою, мають найвищий екологічний ризик для кадмію ($E_r=415$) і свинцю ($E_r=130$). У зразках без слідів вуглеводнів найбільш загрозливими є мідь ($E_r=220$) і кадмій ($E_r=665$). Зразки зі сріблястими металевими фрагментами демонструють критично високий ризик для кадмію ($E_r=1228$) і міді ($E_r=404$), а сумарний ризик (R) досягає 1805, що свідчить про катастрофічний рівень забруднення.

Висновки. Рівень забруднення важкими металами високий, отже використання досліджуваних територій без технічної та біологічної рекультивациі становить небезпеку. У багатьох зонах рекомендується видалення верхнього шару ґрунту через його токсичність.

Ключові слова: ґрунт, важкі метали, війна в Україні, забруднення.

Вступ

Російська агресія в Україні та військові дії призводять до серйозного пошкодження й забруднення ґрунтів. За словами прем'єр-міністра Д. Шмигала, близько 139 тис. кв. км української території зазнали воєнного забруднення, що завдає щорічних економічних втрат у розмірі 11,2 млрд доларів через заміновані поля (<https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa>). Більше ніж 15 млн га земель перебувають під впливом процесів деградації ґрунтів. Особливо постраждали чорноземи – понад 5 млн га, які зазнали різних типів мілітарної деградації: фізичної, механічної, хімічної, фізико-хімічної та біологічної (Балюк, 2024).

Наукові дослідження фіксують занепокоєння щодо наслідків для ґрунтів. Збитки від екологічного забруднення, спричиненого війною, оцінюються в десятки мільярдів євро. Війна також поставила під загрозу 30 % природоохоронних територій, що загрожує біорізноманіттю, знижує здатність до поглинання парникових газів і прискорює опустелювання (Гопцій, & Анопрієнко, 2023; Кузьменко et al., 2024; Horoshkova et al., 2024).

Бойові дії спричиняють механічну руйнацію ґрунтів через бомбардування, траншеї та тунелі, що погіршує структуру ґрунтового покриву (Руденко et al., 2024). Експерти наголошують на необхідності детального обстеження пошкоджених територій із використанням

© Тонха Оксана, Меньшов Олександр, Літвінов Дмитро, Бондар Ксенія, Глазунова Олена, Літвінова Олена, Піковська Олена, Забалуєв Віктор, 2025

геоінформаційних систем для оцінки та моніторингу стану земель (Pham Tung Gia et al., 2018, Tonkha et al., 2018, Ачкасов et al., 2024).

Воєнні дії значно підвищили рівні забруднення важкими металами і нафтою. У Харківській області забруднення кадмієм зросло на 200 %, а в Херсонській і Запорізькій – випадки розливу нафти збільшилися на 139 і 156 % відповідно. Як зазначено в дослідженнях Солюха та ін. (2024), уламки знищеної військової техніки, боєприпасів і залишків пального призводять до багатофакторної шкоди ґрунтовій системі, спричиняючи локальне та глобальне забруднення та втрати ґрунтових ресурсів. У всіх досліджених випадках спостерігалась механічна, хімічна та фізична деградація ґрунту. Це проявилось у змінах гранулометричних фракцій на місцях вибухів, горіннях та місцях забруднення важкими металами. Спалювання обладнання призвело до збільшення фракції піску (2,0–0,05 мм) у 1,2–1,8 раза та зменшення фракції глини (<0,002 мм) у 1,1–1,2 раза. Рівні забруднення ґрунту важкими металами значно перевищували санітарні норми, при цьому найвищі рівні забруднення спостерігаються для Pb, Zn і Cd. На всіх ділянках ураження відбулися зміни у структурі мікробіому і пригніченні активності мікробіологічних процесів (в 1,2 раза), зменшення мікробної біомаси (в 2,1 раза). Також спостерігалась висока токсичність ґрунту (99,8 %) (Solokha et al., 2024).

Аналіз забруднення ґрунту важкими металами дає змогу ухвалити науково обґрунтовані рішення щодо пріоритетності природоохоронних заходів. Використання запропонованих методичних підходів забезпечить отримання порівнянних даних про рівень забруднення та допоможе визначити ділянки, придатні для рекреаційного використання або ведення сільського господарства.

У зонах військових дій виявлено значні концентрації токсичних елементів, зокрема свинцю (Pb), ртуті (Hg), арсену (As), кадмію (Cd) та міді (Cu). Ці речовини можуть переміщуватися ґрунтом, а їхня міграція найчастіше відбувається через підземні води, які здатні адсорбувати важкі метали. Фактори, що впливають на рухливість забруднювачів, включають тип ґрунту, вологість, вміст органічних речовин і мікробіологічну активність (Harari & Annesi-Maesano, 2023).

Дослідження Дмитренко та ін., (2023) підтверджують пошкодження ґрунтів сільськогосподарського та лісового призначення внаслідок артилерійських обстрілів. Через рік після атак у верхньому шарі ґрунту (0–20 см) зафіксовано значне зростання концентрацій Cu, Zn, Ni, Cr, Cd і Pb. На відстані 2,5 м від краю вивр рівні цинку, нікелю та хрому перевищили фонові значення в 1,1–1,2 раза, свинцю – в 1,1–1,6 раза, а міді – в 1,5–1,8 раза. На відстані 30 м вміст цинку досягав 155 мг/кг, свинцю – 44 мг/кг, хрому – 41 мг/кг, а кадмію – 3 мг/кг. У кратерах вивр і до 30 м від них зафіксовано підвищення рухомих форм важких металів у 3–9 разів.

Коефіцієнт концентрації цинку становив 6–14 кларків від фону, хрому – 7–9, а свинцю – 4–8. Перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) виявлено для хрому на 7–26%, нікелю – на 15–21%, а свинцю – на 3–6%. Через рік після обстрілів перевищення ГДК для міді, цинку, кадмію і свинцю не спостерігалось (Дмитренко та ін. 2023).

Оскільки території, де знищено бронетехніку, часто розташовані на сільськогосподарських землях, вони потребують обов'язкового моніторингу та наукового контролю для подальшої рекультивції. За даними М. Solokha та співавторів, основними забруднювачами ґрунту в цих зонах є свинець (Pb), цинк (Zn) і кадмій (Cd). Вибухи та піроліз бронетехніки мають значний

негативний вплив на мезобіоту ґрунту: рівень смертності дощових черв'яків становить 94,9 % протягом п'яти днів, а фітотоксичність сягає 99,8 %. Це свідчить про складну взаємодію різних факторів ґрунтового середовища після вибухів, що призводить до непередбачуваних змін у структурі та функціонуванні мікробних спільнот і мезофауни (Solokha et al., 2024).

Війна також завдала значних збитків економічній екосистемі сільського господарства України, порушивши виробничо-збутові ланцюги. Серед найнегативніших наслідків – скорочення площ оброблюваних земель через бойові дії, мінування полів, дестабілізація внутрішнього ринку та руйнування інфраструктури (Tukhenko et al., 2024; Ostapenko et al., 2022).

Родючість пошкоджених ґрунтів вимагає відновлення, що може тривати 10–20 років залежно від рівня деградації й зволоження. У Херсонській і Миколаївській областях, де функціонували зрошувальні системи, післявоєнна реабілітація потребуватиме ґрунтового очищення й меліоративних заходів для зниження вмісту солей і важких металів (Parakhnenko et al., 2023).

Воєнні дії спричиняють серйозні зміни у ґрунтовому покриві. Механічний вплив, зокрема рух важкої техніки, ущільнює та перемішує шари ґрунту, що порушує його водний режим, знижує родючість і прискорює ерозійні процеси, як водні, так і вітрові. Хімічний вплив бойових дій змінює природні властивості ґрунту через накопичення забруднювальних речовин, що утворюються внаслідок застосування зброї та військової техніки. Вибухи й обстріли призводять до забруднення важкими металами. Фізичні зміни в ґрунті відбуваються через вплив вібрацій і високих температур, що змінює його фізичні властивості. Проведення якісного комплексного моніторингу земель потребує значних ресурсів, але є нагальним завданням (Pereira et al., 2022; Petrushka et al., 2023).

Оцінка забруднення ґрунту нині більше орієнтована на сільськогосподарські потреби, ніж на екологічні наслідки. ґрунт є "життєво важливою живою системою", яка підтримує більшість наземних форм життя, забезпечуючи їх фізичні, хімічні та біологічні потреби. Для оцінки "здоров'я" ґрунту створено індекси якості ґрунту (SQI), що дають змогу комплексно аналізувати його стан (Doran, & Zeiss, 2000).

Нещодавно опубліковані матеріали (Bonchkovskiy et al., 2025) підтвердили збагачення важкими металами забруднених воєнними діями ґрунтів, особливо кадмієм, міддю, свинцем і цинком. Проте їх концентрація переважно лише в 1,1–1,5 раза перевищує фонову та майже не перевищує гранично порогових значень в Україні. Водночас високу інформативність демонструють і магнітні методи виявлення важких металів у ґрунтах територій бойових зіткнень (Menshov et al., 2024). В основі застосування магнітних методів лежить методологія, розроблена та протестована у публікаціях (Menshov, & Sukhorada, 2012; Menhsov et al., 2021). Для вірної побудови моделі необхідно враховувати дані про геологічну будову території впливу військових дій, алгоритми застосування геофізичних методів та статистичний аналіз даних (Pigulevskiy, & Svistun, 2024; Pihulevskiy et al., 2021; Shevchuk et al., 2020; Vyzhva et al., 2010).

Воєнний стан загострив економічні, екологічні та соціальні виклики, пов'язані з продовольчою безпекою. Збройна агресія посилила проблему деградації ґрунтів, що потребує інтеграції ефективного управління земельними ресурсами в екологічну й економічну політику. Надмірна розораність, скорочення унікальних степових

екосистем і бойові дії ставлять під сумнів безпечність використання земель, що зазнали прямого впливу війни.

Методи

У ході дослідження вивчено ґрунтові ресурси сіл Благодатне, Киселівка, Василівка та Максимівка, розташованих у Миколаївському районі на схід від Миколаєва. Координати точки "Опорний пункт". <https://goo.gl/maps/vzCh5x28payWcY9a6> (рис. 1).

Ґрунтовий покрив досліджуваної території представлений переважно південними малогумусними чорноземами. Вони вирізняються високою родючістю, хоча вміст гумусу в них нижчий, ніж у класичних чорноземах. Ці ґрунти мають низьку схильність до вимивання, добре утримуючи вологу та мінеральні речовини (рис. 2).

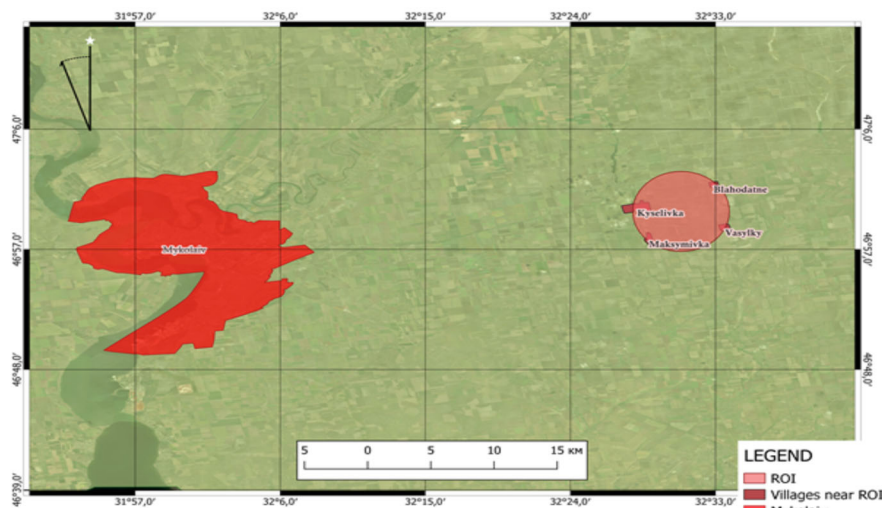


Рис. 1. Територія дослідження

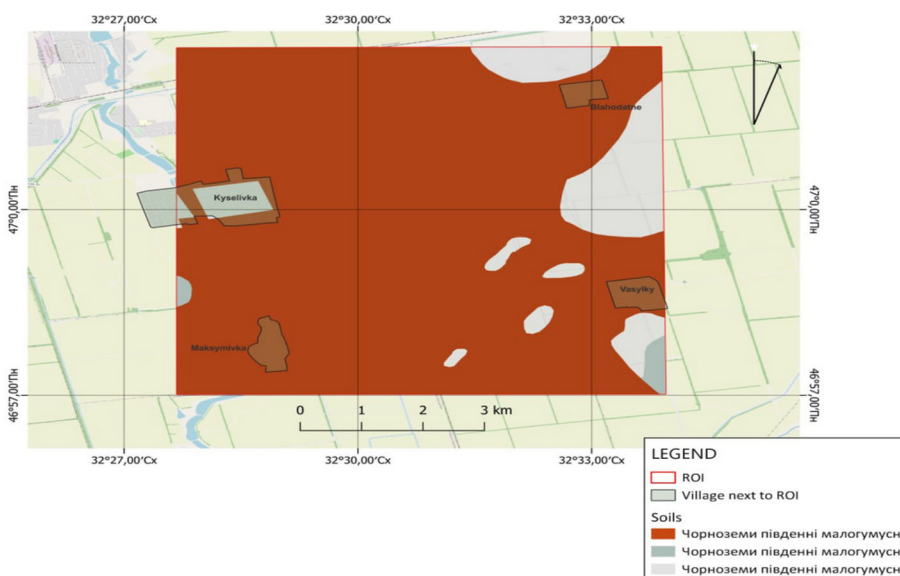


Рис. 2. Ґрунти території дослідження

Для забезпечення правильного використання та дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних речовин під час аналізу й оцінки якості ґрунтів, вибору методів їх визначення та контролю, а також встановлення загальних вимог і процедур для проведення відповідних робіт застосовуються нормативно-правові акти та стандарти (див. табл. 1), зокрема: ДСТУ 4770.1:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.2:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук цинку в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.3:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-

ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.5:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кобальту в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.6:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук міді в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.7:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук нікелю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.8:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук хрому в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії; ДСТУ 4770.9:2007 Якість

ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук свинцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 7867:2015 Ґрунти та продукція рослинництва.

Ступінь забруднення ґрунту визначали згідно з ГОСТ 17.4.3.06–86 "Охорона природи. Ґрунти. Загальні вимоги та класифікація за впливом хімічних забруднювачів". Відповідно до цього стандарту ґрунти поділяються на: сильнозабруднені; середньозабруднені; слабкозабруднені. Ґрунт вважається сильнозабрудненим, якщо

концентрація шкідливих речовин значно перевищує ГДК, спостерігаються низька біологічна продуктивність та суттєві зміни фізико-механічних, хімічних і біологічних характеристик, що призводить до накопичення токсинів у врожаєх понад встановлені норми. Середньозабруднені ґрунти характеризуються перевищенням ГДК без суттєвого впливу на їх властивості. Якщо концентрація речовин перевищує природний фон, але не досягає ГДК, ґрунт вважається слабкозабрудненим.

Таблиця 1

ГДК та фонові значення вмісту рухомих сполук Mn, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb за визначення в буферній ацетатно-амонійній витяжці (згідно з постановою КМУ № 1325 (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text>))

Елемент	Марганець, Mn	Мідь, Cu	Цинк, Zn	Кадмій, Cd	Свинець, Pb	Нікель, Ni	Хром, Cr
Рухомі форми (вилучення ацетатно-амонійним буферним розчином рН 4,8), мг/кг							
Гранично допустима концентрація (ГДК)							
	140	3	23	0,7	6	4	6
ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ							
За фоном України (рівень забруднення)							
Рівень забруднення	(ф) – фон	(сл) – слабкий	(пом.) – помірний	(сер.) – середній	(під.) – підвищений	(вис.) – високий	(д.в.) – дуже високий

Оцінка забруднення ґрунту базується на порівнянні з ГДК або фоновими концентраціями. Для кількісного аналізу застосовуються такі коефіцієнти:

Коефіцієнт концентрації (Кс):

$$K_c = C_i / C_f, \quad (1)$$

де Кс – коефіцієнт концентрації хімічної речовини; Сі – фактичний вміст хімічної речовини в ґрунті; Сф – середня фонові концентрація хімічної речовини у розглянутому районі.

Коефіцієнт техногенного геохімічного навантаження (Кі):

$$K_i = C_i / \text{ГДК}, \quad (2)$$

де Кі – коефіцієнт техногенного геохімічного навантаження; Сі – фактичний вміст хімічної речовини в ґрунті; ГДК – гранично допустима концентрація хімічної речовини у розглянутому районі.

Інтегральний показник поелементного забруднення (Ксі):

$$K_{ci} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{fi}}, \quad (3)$$

де Ксі – інтегральний показник поелементного забруднення ґрунту; Сі – концентрації забруднювальних

речовин, що контролюється; Сфі – фоновий вміст забруднювальних речовин.

Коефіцієнт реакції ґрунту на забруднення (Кр):

$$K_r = (A - A_f) / A_f, \quad (4)$$

де А і Аф – параметри, які контролюється в забрудненій і фоновій пробах.

Щоб оцінити рівень забруднення важкими металами в ґрунтах внаслідок бойових дій і розрахувати екологічні ризики відповідно до їх токсичного впливу на навколишнє середовище, застосовано метод індексу RI, запропонований Hakanson (1980):

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (5)$$

$$E_r = T_r^i * P_i, \quad (6)$$

де Ер – індивідуальний коефіцієнт потенціалу екологічного ризику, Тг – коефіцієнт токсичності металу.

Нормування значень екологічного ризику, проведені за методикою Riyadh Al-Anbari et al. (2015), наведено в табл. 2 і 3.

Коефіцієнти токсичності для Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn і Ti були 30, 2, 5, 5, 5 відповідно (Hakanson, 1980).

Таблиця 2

Значення показників екологічного ризику (Riyadh Al-Anbari et al., 2015)

Er	Індивідуальний коефіцієнт потенціалу екологічного ризику
Er < 40	Низький – низький коефіцієнт потенціалу і екологічний ризик
40 ≤ Er < 80	Середній – помірний коефіцієнт і потенційний екологічний ризик
80 ≤ Er < 160	Значний – значний коефіцієнт потенційний екологічний ризик
160 ≤ Er < 320	Високий – потенціал високого ризику
Er ≥ 320	Дуже високий – дуже високий екологічний ризик

Таблиця 3

Граничні значення інтегрального (RI)

RI	Комплексний потенційний екологічний ризик
RI < 90	Низький потенційний екологічний ризик
90 ≤ RI < 180	Помірний потенційний екологічний ризик
180 ≤ RI < 360	Високий потенційний екологічний ризик
360 ≤ RI < 720	Дуже високий потенційний ризик для навколишнього середовища
RI ≥ 720	Суттєво дуже високий екологічний ризик потенціал

Результати

Території, що зазнали впливу військових дій, зазнають значних змін як у структурі ландшафту, так і у хімічному складі ґрунтів. Одним з основних напрямків дослідження

таких територій є типізація та моніторинг рівнів забруднення важкими металами. Це дає змогу оцінити екологічний стан земель та розробити ефективні заходи з їх рекультиватії. Типізація територій передбачає

класифікацію земель за ступенем пошкодження та рівнем забруднення. Основні типи територій, які піддавалися аналізу: зони опорних пунктів: місця розташування військових баз і фортифікаційних споруд, таких як капоніри.

Результати досліджень вмісту важких металів у зразках ґрунту, взятих із різних зон капоніра, демонструють різний рівень забруднення залежно від типу домішок і хімічного складу ґрунту. Науковий аналіз отриманих даних дає змогу оцінити екологічний ризик і потенційний вплив на навколишнє середовище (табл. 4).

У групі зразків, насичених нафтою, встановлено концентрації марганцю (34,13 мг/кг) та хрому (4,00 мг/кг), які перебувають на фоновому рівні, що свідчить про їх природне походження. Мідь (24,49 мг/кг), цинк (44,16 мг/кг), кадмій (8,30 мг/кг) та свинець (155,73 мг/кг) – у межах допустимих значень, але свинець перевищує екологічні стандарти в кілька разів, що є критичним фактором забруднення. Нікель має слабкий рівень забруднення (2,40 мг/кг), що вказує на обмежений техногенний вплив.

Таблиця 4

Вміст рухомих форм важких металів у мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніру за вилучення ацетатно-амонієм буферним розчином (pH 4,8), мг/кг

Капонір	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
Група зразків усередині капоніра, насичені нафтою	34,13 (ф)	24,49 (д.в.)	44,16 (д.в.)	8,30 (д.в.)	155,73 (д.в.)	2,40 (сл.)	4,00 (ф)
Група зразків усередині капоніра, без ознак вуглеводнів	48,05 (ф)	132,14 (д.в.)	49,98 (д.в.)	13,30 (д.в.)	177,34 (д.в.)	4,60 (пом.)	6,20 (ф)
Група зразків усередині капоніра, зі шматками сріблястого розплавленого металу	113,00 (пом)	242,54 (д.в.)	62,71 (д.в.)	24,55 (д.в.)	175,00 (д.в.)	8,80 (під.)	15,90 (сл.)
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	104,40 (пом.)	243,56 (д.в.)	50,18 (д.в.)	25,09 (д.в.)	188,70 (д.в.)	8,10 (під.)	9,40 (ф)
	14,70 (ф)	18,92 (д.в.)	41,75 (д.в.)	4,10 (д.в.)	86,09 (д.в.)	2,80 (сл.)	15,20 (сл.)
Верхній шар (гільза)	7,98(ф)	1,47(ф)	3,58(ф)	0,23(ф)	2,46(ф)	1,2(ф)	1,1(ф)
Верхній шар	12,1(ф)	1,24(ф)	5,07(ф)	0,498(ф)	2,09(ф)	1,3(ф)	4,2(ф)
Об'єм вибірки	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Середнє	47,77 (ф)	94,91 (д.в.)	37,1 (д.в.)	10,87 (д.в.)	112,49 (д.в.)	4,17 (пом.)	8,00 (ф)
Стандартне відхилення	43,96	110,69	22,67	10,56	82,44	3,14	5,74
Помилка середнього	16,62	41,84	8,57	3,99	31,16	1,19	2,17
Коефіцієнт варіації	0,92	1,17	0,61	0,97	0,73	0,75	0,72
Мінімальне значення	7,98	1,24	5,07	0,23	2,09	1,20	1,10
Нижній квартиль	13,40	10,20	23,67	2,30	44,28	1,85	4,10
Медіана	34,13	24,49	44,16	8,30	155,73	2,80	6,20
Верхній квартиль	76,23	187,34	50,08	18,93	176,17	6,35	12,30
Максимальне значення	113,00	243,56	62,71	25,09	188,70	8,80	15,90

У ґрунтових зразках зони капоніра без ознак вуглеводнів спостерігається зростання вмісту міді (132,14 мг/кг) і свинцю (177,34 мг/кг), що вказує на накопичення металів від військових дій або промислових забруднювачів. Нікель (4,60 мг/кг) перевищує фон, демонструючи помірне забруднення. Інші елементи залишаються в межах допустимих рівнів, хоча перевищення ГДК для важких металів може спричинити токсичні ефекти для біоти.

Група зразків ґрунту із шматками розплавленого металу має значне підвищення концентрації марганцю (113,00 мг/кг) і міді (242,54 мг/кг), що свідчить про потужний техногенний вплив. Свинець (175,00 мг/кг) залишається на високому рівні, а нікель (8,80 мг/кг) та хром (15,90 мг/кг) перевищують природний фон, що створює ризик довготривалого забруднення ґрунту та вод. Аналіз зразків ґрунту з рудими глинистими домішками констатує, що марганець (104,40 мг/кг) і нікель (8,10 мг/кг) перевищують норму, що вказує на середній рівень забруднення. Свинець (188,70 мг/кг) і кадмій (25,09 мг/кг) мають високі концентрації, що підтверджує значний вплив важких металів на екосистему. Вміст хрому (9,40 мг/кг) залишається на фоновому рівні. Забруднення важкими металами у всіх досліджуваних зразках вказує на серйозний екологічний вплив військових дій. Особливо критичні концентрації свинцю, міді та кадмію, що є небезпечною зниження родючості ґрунту, токсичності для рослин і ризику забруднення ґрунтових вод.

У капонірі коефіцієнт варіації характеризувався як високий для всіх важких металів. Середній показник рухомих форм міді, цинку, свинцю і кадмію характеризувався як дуже високий.

Для повної оцінки екологічного ризику важливо визначити рівень кумулятивного забруднення ґрунту відразу кількома токсичними речовинами, базуючись на інтегральному показнику поелементного забруднення (Kci) (табл. 5).

Сумарний коефіцієнт ($K_{ci}=51,4-161$) забруднення капонірів характеризується як небезпечний, а отже без рекультивції цю територію неможливо використовувати. Коефіцієнт концентрації забруднювальних речовин (K_c) був надзвичайно високим за вмістом міді – 8,2–81,19, інтегральний показник забруднення (K_{ci}) зруйнованого чорнозему південного всередині капоніру K_{ci} становив 51,4–161 і характеризувався як катастрофічний або сильнозабруднений. Але подальші дослідження вмісту залишків вибухових речовин можуть підвищити рівень забруднення. Верхній шар ґрунту підлягає утилізації.

Для кількісно визначення ризику для довкілля залежно від перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) хімічних елементів, пріоритизації природоохоронних заходів та забезпечення безпечного використання землі проведено нормування значень екологічного ризику території капоніру (за методикою Riyad Al-Anbari et al. (2015) і Hakanson (1980), яку наведено в табл. 6).

Результати досліджень важких металів у різних зонах капоніра, представлені у вигляді екологічного ризику (E_r) для кожного елемента та сумарного ризику (R_I), свідчать про значний техногенний вплив. Значення ризику дають змогу оцінити ступінь забруднення та можливі екологічні наслідки для кожного місця відбору зразків.

Таблиця 5

Коефіцієнт концентрації забруднювальних речовин (Kc)
та інтегральний показник забруднення (Kci) мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніру

Місце відбору зразка	Kc							Kci
	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	
Насичені нафтою	0,24	8,16	1,92	13,83	25,96	0,60	0,67	51,38
Без ознак вуглеводнів	0,34	44,05	2,17	22,17	29,56	1,15	1,03	100,47
Зі шматками сріблястого розплавленого металу	0,81	80,85	2,73	40,92	29,17	2,20	2,65	159,31
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	0,75	81,19	2,18	41,82	31,45	2,03	1,57	160,97
Верхній шар (гільза)	0,11	39,33	1,82	6,83	14,35	0,70	2,53	65,67
Верхній шар	0,06	0,49	0,24	0,38	0,41	0,30	0,18	2,07
Верхній шар	0,09	0,41	0,22	0,83	0,35	0,33	0,70	2,92

Таблиця 6

Комплексний показник забруднення RI (Hakanson, L., 1980) мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніра, 2024 р.

Місце відбору зразка	Er							RI
	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	
Насичені нафтою	1,22	40,8	9,60	415	130	1,20	1,33	598
Без ознак вуглеводнів	1,72	220	10,87	665	148	2,30	2,07	1049
Зі шматками сріблястого розплавленого металу	4,04	404	13,63	1228	147	4,40	5,30	1805
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	3,73	406	10,91	1255	157	4,05	3,13	1840
Верхній шар (гільза)	0,53	199	9,08	205	71,7	1,40	5,07	489
Верхній шар	0,06	2,45	1,21	11,50	2,05	0,60	0,37	18,2
Верхній шар	0,09	2,07	1,10	24,90	1,74	0,65	1,40	31,9

Зразки, насичені нафтою, продемонстрували найвищий індивідуальний екологічний ризик для кадмію ($Er=415$), що свідчить про критичне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) і створює значну загрозу для екосистеми. Вміст свинцю ($Er=130$) також становить серйозну небезпеку. Сумарний показник ризику ($RI=598$) вказує на високий рівень екологічної небезпеки цієї території. У зразках без ознак вуглеводнів найбільший ризик зафіксовано для міді ($Er=220$) і кадмію ($Er=665$), що зумовлює сумарний ризик ($RI=1049$) і потребує термінових рекультивацийних заходів для зниження рівня забруднення. Ґрунтові зразки зі шматками сріблястого розплавленого металу демонструють найвищі значення ризику: кадмію ($Er=1228$) і міді ($Er=404$). Сумарний індекс забруднення ($RI=1805$) вказує на надзвичайно високий ризик для ґрунтів і прилеглих екосистем, що вимагає посилення заходів з очищення та екологічного контролю. Зразки з рудими глинистими домішками (елювіальний горизонт) також мають переважні значення ризику за кадмієм ($Er=1255$) і міддю ($Er=406$). Загальний показник ($RI=1840$) свідчить про катастрофічний рівень забруднення, який потребує негайного втручання.

Загальна оцінка рівня індивідуального коефіцієнта потенціалу екологічного ризику капоніру з нафтою, без нафти і зі сріблястими кульками показала дуже високий показник для Cd – 415–1255, значний Pb ($Er=220$ –406), високий та дуже високий для міді ($Er=220$ –406), решта металів характеризувались як низький. Комплексна оцінка рівня забруднення цього капоніра за методикою Hakanson (1980) показала суттєво дуже високий потенційний ризик для навколишнього середовища від капонірів ($RI=598$ –1840) і потребує як технічного, так і біологічного етапу рекультивації. Забруднення важкими металами капоніру з рудими глинистими домішками призвело до класифікації Riyadh Al-Anbari et al. (2015) до дуже високого екологічного ризику.

Дискусія і висновки

Результати досліджень вказують на високий рівень техногенного впливу важких металів, що є наслідком військових дій. Особливо небезпечними є концентрації кадмію, свинцю та міді, які значно перевищують гранично

допустимі концентрації, створюючи серйозні екологічні ризики для ґрунту, рослинного покриву та підземних вод.

Оцінка коефіцієнта концентрації (Kc) показала надзвичайно високі значення для міді (від 8,2 до 81,19) і кадмію, що потребує застосування комплексного моніторингу й модернізованих технологій очищення для стабілізації екосистеми.

Диференціація забруднення залежно від типу домішок показала, що зразки ґрунту, насичені нафтою, мали найвищий екологічний ризик для кадмію ($Er=415$) і свинцю ($Er=130$). У зразках без ознак вуглеводнів найбільш ризикованими є мідь ($Er=220$) і кадмій ($Er=665$). Зразки зі сріблястими металевими фрагментами демонструють критично високий ризик для кадмію ($Er=1228$) і міді ($Er=404$), а сумарний ризик (RI) сягає 1805, що свідчить про катастрофічне забруднення.

Комплексна оцінка за методикою Hakanson (1980) показала, що загальний індекс екологічного ризику для території капоніра варіюється від 598 до 1840, що класифікується як "дуже високий ризик" для довкілля. За критеріями Riyadh Al-Anbari et al. (2015), це вимагає впровадження негайних рекультивацийних заходів.

Забруднення важкими металами досягло рівня, за якого використання цих територій без технічної і біологічної рекультивації є небезпечним. Верхній шар ґрунту в багатьох зонах рекомендується видалити через його токсичність.

Внесок авторів: Оксана Тонха – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Олександр Меньшов – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Дмитро Літвінов – методологія, валідація даних, вимірювання; Ксенія Бондар – ідея, аналіз та інтерпретація даних; Олена Глазунова – написання (перегляд і редагування); Олена Літвінова – валідація даних, вимірювання; Олена Піковська – формальний аналіз; Віктор Забалуєв – методологія.

Подяки, джерела фінансування. Дослідження виконувалися за проектом PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023, що реалізується у рамках програми підтримки українських дослідницьких колективів Польської академії наук, що виконується у співпраці з Національною академією наук США. В рамках науково-дослідної роботи № PH/65-2024 в межах задекларованої тематики "Центр трансферу технологій штучного інтелекту для відновлення сільськогосподарських земель".

Список використаних джерел

- Ачкасов, А., Попович, Н., Пересадко, В., & Гордєзіані, Т. (2024). Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довочасні реалії й післявоєнні перспективи. *Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 60, 124–136. <https://periodicals.karazin.ua/geoeo/article/view/24204/21949>
- Балюк, С., Кучер, А., & Солода, М. (2024). Оцінка впливу війни на чорноземі як передумова відновлення їхньої родючості. *Агропортал*. <https://agroportal.ua/blogs/ocinka-vplivu-viyni-na-chornozemi-yak-peredumova-vidnovlennya-jihnoji-rodnyuchosti>
- В Україні заміновано майже 139 тисяч кв. км території – Шмигаль. *Суспільне*. 2024. <https://suspline.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa>
- Гопцій, Д., & Анопрієнко, Т. (2023). Забруднення земель в Україні внаслідок війни: оцінка масштабів проблеми та пошук шляхів її вирішення. Екологічна і біологічна безпека в умовах війни: реалії України. Збірник матеріалів науково-практичної конференції (Україна, Київ, 19–20 липня 2023 р.). Київ. 43–49.
- Дмитренко, О.В., Дем'янюк, О.С., Погоріла, Л.П., Свидинок, Н.Л., Роща, В.В., Кирилюк, П.М., & Романенко, В.М. (2023). Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. *Агроекологічний журнал*, 4, 89–96. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758>
- Кузменко, В.О., Третяк, Н.М., Чорнай, В.І., & Яриш, І.Ю. (2024). Воєнний екоцид в Україні як згубний наслідок застосування російських ракет та снарядів. *Scientific works of State Scientific Research Institute of AME TC*, 1(19), 62–72. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.08>
- Руденко, М.В., Третяк, Н.М., & Маренич, А.І. (2024). Маркетингові дослідження впливу російської агресії на стан аграрного сектора України. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*, 2(45). <https://doi.org/10.31673/2415-8089.2024.010505>
- Al-Anbari, Riyad, & Al Obaidy, Abdul Hameed, & Hussein Abd Ali, Fatima. (2015). Pollution Loads and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Urban Soil Affected by Various anthropogenic Activities. *International Journal of Advanced Research*, 3, 104–110. (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com
- Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
- Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001.
- Harari, S., & Annesi-Maesano, I. (2023). The war in Ukraine is an environmental catastrophe. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 27(2), 94–95(2). <https://doi.org/10.5588/ijtld.22.0603>
- Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. <https://doi.org/10.32317/ekon. apk/6.2024.10>
- Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). *Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine*. In 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), 2024(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenyg, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7>
- Ostapenko, P., Bonchkovskiy, O., Shvaiko, V., & Bonchkovskiy, A. (2022). *War and soils in Ukraine: how to estimate soil losses?* Ukrainian Researchers Society. Kyiv. <https://hromady.org/wp-content/uploads/2023/03/War-and-soils-in-Ukraine.pdf>
- Parakhnenko V.H., Zadorozhna O.M., Liakhovska N.O., & Biahopoluchna A.H. (2023). Environmental assessment of chemical pollution of soils as a result of the war. *Taurida Scientific Herald*, 131, 367–373. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/131_2023/46.pdf
- Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837(2022) 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
- Petrushka, K., Petrushka, I., Yushman, Y. (2023). Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 77–85. <https://doi.org/10.12911/22998993/170078>
- Pham, Tung Gia, Degener, & Jan, Kappas, Martin. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pigulevskiy, P., & Svistun, V. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geophysical Journal*, 46(3). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483>
- Pihulevskiy, P., Tiapkin, O., Anisimova, L., Kalinichenko, O., & Panteleeva, N. (2021). Geophysical and tectonic modernization of geoeological monitoring system of territories near nuclear fuel cycle objects of Ukrainian Southeast. In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2021(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Shevchuk, V. V., Ivanik, O. M., Tustanovska, L. V., Kravchenko, D. V., Hadiatska, K. P., Tiukhtei, A., & Pikul, S. T. (2020). Geodynamics and geohazards in the Middle Dnieper Region (Ukraine). In *Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, 2020, 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205015>
- 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), Sychevs'kyi, S., Bykova, O., Menshov, O., Kruglov, O., Kovalenko, V., Sonko, R., Hutsol, T., & Glowacki, S. (2021). *Spatial Heterogeneity of Soil Parameters in Different Forest-Steppe Landscapes of Ukraine*. Wydawnictwo SGGW.
- Tykhenko, O., Martyn, A., Tykhenko, R., Openko, I., Shevchenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskiy, A., & Volk, P. (2024). Impact of Comparative Assessment of Soil Quality on Determining the Value of Agricultural Land (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 252–261. <https://doi.org/10.12912/27197050/183900>
- Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane in the problems of geophysics. In *Geoinformatics 2010-9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (pp. A055-A055). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402814>

References

- Achkasov, A., Popovych, N., Peresadko, V., & Gordeziani, T. (2024). Geoinformation support of geoportals of territorial communities: pre-war realities and post-war prospects. *Visnyk of V.N. Karazin Harkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 60, 124–136. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09> [in Ukrainian].
- Al-Anbari, Riyad, & Al Obaidy, Abdul Hameed, & Hussein Abd Ali, Fatima. (2015). Pollution Loads and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Urban Soil Affected by Various anthropogenic Activities. *International Journal of Advanced Research*, 3, 104–110. (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com
- Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
- Doran, J.W., & Zeiss, M.R. (2000). Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6)
- Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001.
- Harari, S., & Annesi-Maesano, I. (2023). The war in Ukraine is an environmental catastrophe. *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 27(2), 94–95(2). <https://doi.org/10.5588/ijtld.22.0603>
- Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. <https://doi.org/10.32317/ekon. apk/6.2024.10>
- Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). *Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine*. In 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), 2024(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenyg, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7>
- Ostapenko, P., Bonchkovskiy, O., Shvaiko, V., & Bonchkovskiy, A. (2022). *War and soils in Ukraine: how to estimate soil losses?* Ukrainian Researchers Society. Kyiv. <https://hromady.org/wp-content/uploads/2023/03/War-and-soils-in-Ukraine.pdf>
- Parakhnenko V.H., Zadorozhna O.M., Liakhovska N.O., & Biahopoluchna A.H. (2023). Environmental assessment of chemical pollution of soils as a result of the war. *Taurida Scientific Herald*, 131, 367–373. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/131_2023/46.pdf
- Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837(2022) 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>
- Petrushka, K., Petrushka, I., Yushman, Y. (2023). Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 77–85. <https://doi.org/10.12911/22998993/170078>
- Pham, Tung Gia, Degener, & Jan, Kappas, Martin. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pigulevskiy, P., & Svistun, V. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geophysical Journal*, 46(3). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483>
- Pihulevskiy, P., Tiapkin, O., Anisimova, L., Kalinichenko, O., & Panteleeva, N. (2021). Geophysical and tectonic modernization of geoeological monitoring system of territories near nuclear fuel cycle objects of Ukrainian Southeast. In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2021(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.
- Shevchuk, V. V., Ivanik, O. M., Tustanovska, L. V., Kravchenko, D. V., Hadiatska, K. P., Tiukhtei, A., & Pikul, S. T. (2020). Geodynamics and geohazards in the Middle Dnieper Region (Ukraine). In *Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, 2020, 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20205015>
- 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), Sychevs'kyi, S., Bykova, O., Menshov, O., Kruglov, O., Kovalenko, V., Sonko, R., Hutsol, T., & Glowacki, S. (2021). *Spatial Heterogeneity of Soil Parameters in Different Forest-Steppe Landscapes of Ukraine*. Wydawnictwo SGGW.
- Tykhenko, O., Martyn, A., Tykhenko, R., Openko, I., Shevchenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskiy, A., & Volk, P. (2024). Impact of Comparative Assessment of Soil Quality on Determining the Value of Agricultural Land (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 252–261. <https://doi.org/10.12912/27197050/183900>
- Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane in the problems of geophysics. In *Geoinformatics 2010-9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (pp. A055-A055). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402814>

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenig, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7>

Ostapenko, P., Bonchkovskiy, O., Shvaiko, V., Bonchkovskiy, A. (2022). *War and soils in Ukraine: how to estimate soil losses?* Ukrainian Researchers Society. Kyiv. <https://hromady.org/wp-content/uploads/2023/03/War-and-soils-in-Ukraine.pdf>

Parakhnenko, V.H., Zadorozhna, O.M., Liakhovska, N.O., & Blahopoluchna, A.H. (2023). Environmental assessment of chemical pollution of soils as a result of the war. *Taurida Scientific Herald*, 131, 367–373. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/131_2023/46.pdf

Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837(2022) 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>

Petrushka, K., Petrushka, I., & Yuhman, Y. (2023). Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 77–85. <https://doi.org/10.12911/22998993/170078>

Pham, Tung Gia, Degener, Jan, & Kappas, Martin. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>

Pigulevskiy, P., & Svistun, V. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geophysical Journal*, 46(3). <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483>

Pihulevskiy, P., Tiapkin, O., Anisimova, L., Kalinichenko, O., & Panteleeva, N. (2021). Geophysical and tectonic modernization of geoeological monitoring system of territories near nuclear fuel cycle objects of Ukrainian Southeast. In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and*

Ecological Condition of the Environment, 2021(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Rudenko, M.V., Tretyak, N.M., & Marenich, A.I. (2024). Marketing research on the impact of Russian aggression on the state of the agricultural sector of Ukraine. *Economics. Management. Business*, 2(45). <https://doi.org/10.31673/2415-8089.2024.010505> [in Ukrainian].

Shevchuk, V. V., Ivanik, O. M., Tustanovska, L. V., Kravchenko, D. V., Hadiatska, K. P., Tiukhtei, A., & Pikul, S. T. (2020). Geodynamics and geohazards in the Middle Dnieper Region (Ukraine). In *Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, 2020(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055015>

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>

Tonkha, O., Nurek, T., Kravchenko, Y., Sychevs'kyi, S., Bykova, O., Menshov, O., Kruglov, O., Kovalenko, V., Sonko, R., Hutsol, T., & Glowacki, S. (2021). *Spatial Heterogeneity of Soil Parameters in Different Forest-Steppe Landscapes of Ukraine*. Wydawnictwo SGGW.

Tykhenko, O., Martyn, A., Tykhenko, R., Openko, I., Shevchenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskiy, & A., Volk, P. (2024). Impact of Comparative Assessment of Soil Quality on Determining the Value of Agricultural Land (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 252–261. <https://doi.org/10.12912/27197050/183900>

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane in the problems of geophysics. In *Geoinformatics 2010 – 9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (pp. A055–A055). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402814>

Отримано редакцією журналу / Received: 23.12.24

Прорецензовано / Revised: 08.01.25

Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Oksana TONKHA¹, DSc (Agric. Sci.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-0677-5494

e-mail: oksana16095@gmail.com

Oleksandr MENSCHOV², DSc (Geol.), Senior Researcher,

ORCID ID: 0000-0001-7280-8453

e-mail: menshov@knu.ua

Dmytro LITVINOV¹, DSc (Agric. Sci.), Prof.

ORCID ID: 0000-0001-6589-3805

e-mail: litvinovdv@nubip.edu.ua

Kseniia BONDAR^{2,3}, DSc (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-4946-7707

e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Olena GLAZUNOVA¹, DSc (Ped. Sci.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-0136-4936

e-mail: o-glazunova@nubip.edu.ua

Olena LITVINOVA¹, PhD (Agric. Sci.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-0962-8406

e-mail: litvinova@nubip.edu.ua

Olena PIKOVSKA¹, PhD (Agric. Sci.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-5052-9223

e-mail: pikovska@nubip.edu.ua

Viktor ZABALUEV¹, DSc (Agric. Sci.), Prof.

ORCID ID: 0000-0001-9299-0651

e-mail: viaza@ukr.net

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

ASSESSMENT OF SOIL POLLUTION LEVELS IN SOUTHERN UKRAINE DAMAGED BY MILITARY ACTIONS

Background. Russian aggression and military actions in Ukraine have caused significant soil damage and contamination. Approximately 139,000 square kilometers of Ukrainian territory have been affected by war-related pollution, leading to annual economic losses of \$11.2 billion due to mined fields. Degradation processes impact over 15 million hectares of land, including more than 5 million hectares of chernozems, which have undergone various types of military degradation: physical, mechanical, chemical, physico-chemical, and biological.

Methods. To ensure proper use and compliance with maximum allowable concentrations (MAC) of hazardous substances during soil analysis and quality assessment, the selection of detection and control methods, as well as the establishment of general requirements and procedures for related activities, regulatory legal acts and standards are applied.

Results. During the study, soil resources in the villages of Blahodatne, Kyselivka, Vasylyk, and Maksymivka, located in the Mykolaiv district east of Mykolaiv, were analyzed. The concentration coefficient (Ks) assessment revealed extremely high values for copper (ranging from 8.2 to 81.19) and cadmium, necessitating the implementation of comprehensive monitoring and advanced purification technologies to stabilize the ecosystem. The differentiation of pollution based on the type of impurities showed that soil samples saturated with oil had the highest ecological risk for cadmium (Er=415) and lead (Er=130). In samples without hydrocarbon traces, the most hazardous elements were copper (Er=220) and cadmium (Er=665).

Samples containing silvery metallic fragments exhibited a critically high risk for cadmium ($Er=1228$) and copper ($Er=404$), while the total risk index (RI) reached 1805, indicating a catastrophic level of contamination.

Conclusions. The level of heavy metal pollution is high, making the use of the studied areas unsafe without technical and biological reclamation. In many zones, removing the topsoil layer is recommended due to its toxicity.

Key words: *soil, heavy metals, war in Ukraine, pollution.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.