



УДК 543.3:631.41:504.5 (477)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.36>

ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ ІОНІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ҐРУНТАХ, ТРАНСФОРМОВАНИХ У РЕЗУЛЬТАТІ ВИБУХІВ

І. П. Онищук¹, О. Ю. Кичкирук², А. М. Гаврилова³

Сучасна екологічна ситуація в Україні значно ускладнилася внаслідок повномасштабної війни, що триває із 2022 року. Одним з актуальних напрямів сучасних досліджень є вивчення наслідків бойових дій для стану навколишнього середовища, зокрема – рівня забруднення ґрунтів токсичними елементами. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які вивільняються в довкілля внаслідок вибухів боеприпасів, руйнування військової техніки, складів з боеприпасами, хімічних об'єктів та інфраструктури. Беручи до уваги високу мобільність та стійкість таких забруднень, дослідження їхнього вмісту у ґрунтах бойових зон має надзвичайно велике значення з погляду як екологічного моніторингу, так і збереження здоров'я населення.

Метою роботи є визначення вмісту іонів важких металів (Cd , Pb , Cu , Zn , Ni , Co) у зразках ґрунтів, відібраних з території, де сталися вибухи бойових снарядів, з подальшим оцінюванням рівня забруднення та потенційних екологічних ризиків. Для реалізації поставленої мети було застосовано сучасні аналітичні методи: атомно-абсорбційну спектроскопію (ААС) для кількісного визначення металів, потенціометричний метод вимірювання рН і ваговий аналіз для додаткової характеристики проб. Робились кислотні витяжки для отримання рухомих форм металів, що дозволяє оцінити їхню доступність для біоти.

У результаті проведених вимірювань встановлено, що окремі зразки ґрунту мають перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) для таких металів, як свинець, кадмій і мідь.

Натомість концентрації нікелю, цинку та кобальту виявилися на рівні, значно нижчому за встановлені нормативи. Деякі проби не містили слідів окремих металів, що свідчить про неоднорідність забруднення та значний вплив локальних чинників.

Наукова новизна роботи полягає в дослідженні конкретного впливу бойових дій на кількісний вміст іонів важких металів у ґрунті на обмеженій території, де зафіксовані вибухи. Результати підтвер-

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Onyshchuk-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2847-8570

² кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: kychkyruk-o@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0558-1647

³ здобувач вищої освіти
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Zahorodnia-A@zu.edu.ua
ORCID: 0009-0006-9728-5824

джують припущення про мобілізацію важких металів унаслідок воєнних дій і формують базу для порівняння з фоновими показниками в інших регіонах. Практична значущість дослідження полягає в можливості використання отриманих даних для екологічного моніторингу, оцінювання ризиків для здоров'я населення, а також для розроблення заходів щодо рекультивції забруднених територій. Отримані результати доповнюють існуючі наукові дані щодо впливу війни на довкілля в Україні, зокрема – роботи, виконані у Дніпропетровській, Миколаївській і Херсонській областях, де було також зафіксовано локальне перевищення вмісту токсичних металів у ґрунтах. Отже, представлена робота є внеском у формування сучасного розуміння наслідків воєнної екологічної катастрофи та слугує підґрунтям для подальших досліджень у цьому напрямі.

Ключові слова: важкі метали, ґрунт, бойові дії, екологічний моніторинг, атомно-абсорбційна спектроскопія, токсичні елементи, кислотна витяжка, забруднення довкілля.

DETERMINATION OF HEAVY METAL ION CONTENT IN SOILS TRANSFORMED AS A RESULT OF EXPLOSIONS

I. P. Onyshchuk, O. Y. Kychkyruk, A. M. Havrylova

The current environmental situation in Ukraine has significantly deteriorated due to the full-scale war that began in 2022. One of the urgent areas of modern research is the study of the consequences of military actions on the environment, particularly the level of soil contamination with toxic elements. Of special concern are heavy metals released into the environment as a result of explosions of ammunition, destruction of military equipment, ammunition depots, chemical facilities, and infrastructure. Given the high mobility and persistence of such pollutants, research into their concentrations in soils of combat zones is extremely important both for environmental monitoring and public health protection.

The aim of this study is to determine the concentrations of heavy metal ions (Cd, Pb, Cu, Zn, Ni, Co) in soil samples collected from areas affected by explosions of military ordnance and to assess the contamination levels and potential ecological risks. To achieve this objective, modern analytical methods were used: atomic absorption spectroscopy (AAS) for quantitative metal determination, potentiometric pH measurement, and gravimetric analysis for additional sample characterization. Soil samples were subjected to acid extraction to obtain mobile metal forms, which reflects their bioavailability.

The analytical results showed that certain soil samples exceeded the maximum permissible concentrations (MPCs) for lead, cadmium, and copper. In contrast, nickel, zinc, and cobalt concentrations remained significantly below regulatory limits. Some samples showed no detectable levels of specific metals, reflecting the heterogeneity of contamination and the strong influence of local factors.

The scientific novelty of the study lies in the assessment of the specific impact of military activities on the quantitative content of heavy metal ions in soil within a defined area affected by explosions.

The results confirm the hypothesis regarding the mobilization of heavy metals due to warfare and provide a basis for comparison with background levels in other regions. The practical significance of the research lies in the potential use of the data for environmental monitoring, health risk assessment, and the development of measures for the remediation of contaminated areas.

The findings contribute to the existing body of knowledge on the environmental consequences of warfare in Ukraine, complementing previous studies conducted in Dnipropetrovsk, Mykolaiv, and Kherson regions, where localized exceedances of toxic metal concentrations in soils were also observed. Therefore, this work adds to the understanding of the environmental impacts of war and serves as a foundation for further research in this field.

Key words: heavy metals, soil, military actions, environmental monitoring, atomic absorption spectroscopy, toxic elements, acid extraction, environmental pollution.

Вступ

В умовах сучасних воєнних конфліктів забруднення довкілля бойовими речовинами стає актуальним питанням екологічної безпеки в багатьох регіонах планети. Вивчення наслідків застосування різних вибухових речовин та їх потрапляння в повітря, ґрунти та воду сприяє розробленню екологічних стратегій відновлення постраждалих територій та запобіганню подальшої деградації природного середовища.

Сучасні екологічні проблеми численні, мають різні етіологію, ступінь вивчення та вирішення, проте питання впливу саме вибухових речовин, які використовують у складі бойових частин безпілотного літального апарата (далі – БпЛА) “Shahed-136” та керованих ракет, зокрема Х-22, Х-101, на ґрунтові процеси залишається не досить дослідженим з деяких причин. По-перше, вибухи спричиняють утворення вирв, ущіль-

нення ґрунту та зміни його структури, що значно ускладнює відбір релевантних проб, оскільки ґрунт у зоні вибуху може бути змішаним із глибшими шарами або мати нерівномірний склад. По-друге, вибухові речовини містять токсичні компоненти, як-от важкі метали, нітрати та залишки органічних сполук (гексогену, октогену й інших). Їх виявлення та встановлення рівня забруднення ними потребують складних лабораторних аналізів, а також порівняння з контрольними зразками. По-третє, відбір проб є проблематичним і небезпечним процесом для дослідників, оскільки зони вибухів можуть містити нерозірвані боєприпаси та залишки токсичних речовин, що створює безпекові ризики. Проведення польових робіт з відбору проб потребує спеціального дозволу та супроводу спеціальних служб. По-четверте, стан ґрунту в зоні вибуху змінюється із часом: відбуваються природне осідання, вимивання забруднень та поступове відновлення, а це ускладнює довгостроковий моніторинг і потребує регулярного збору даних.

Воєнні дії на території України мають далекосяжні наслідки. Зокрема, Україна є однією з найбільших аграрних держав світу, тому збереження родючості ґрунтів має стратегічне значення. Вивчення наслідків впливу бойових дій на стан ґрунтів, як надважливого компоненту екосистем, допоможе розробити ефективні механізми рекультивації та ремедіації сільськогосподарських угідь та підтримки продовольчої безпеки у країні й у світі. Токсичні залишки вибухових речовин, які проникають у ґрунтові води, включаються в ланцюги живлення, створюють довгострокові ризики для здоров'я людей і біорозмаїття екосистем. Науковий аналіз допоможе оцінити потенційні загрози та розробити ефективні заходи захисту здоров'я людей і збереження біорозмаїття. Окрім того, отримання об'єктивних результатів дослідження стану ґрунтів, які зазнали змін унаслідок вибухів, має правові та міжнародні аспекти, бо ці результати можуть стати важливим аргументом у міжнародних судах і переговорах щодо екологічної компенсації. Це підвищує значущість таких досліджень не лише в науковій, а й у правовій площині.

Тривалі активні бойові дії є причиною формування локалізованих воєнно-технологічних геохімічних аномалій. Ці аномалії характеризуються: ущільненням, змішуванням ґрунтових горизонтів і утворенням

кратерів, що змінює та ускладнює природні процеси ґрунтоутворення; високою концентрацією важких металів (у зонах вибухів бойових частин БпЛА, снарядів і авіабомб часто фіксується підвищений вміст свинцю, кадмію, ртуті, миш'яку й інших токсичних елементів); зниженнями або підвищеннями рН ґрунтового розчину, що впливає на його родючість та здатність до відновлення. Усі ці особливості в сумі прогнозовано зумовлять довгострокове обмеження або цілковиту заборону на використання земельних ресурсів у сільськогосподарській, промисловій, природоохоронній, рекреаційній галузях.

Вибухові процеси є одними зі значущих факторів надходження токсичних речовин, зокрема важких металів, у ґрунти. Загалом вибухові пристрої (артилерійські снаряди, міни, гранати, КАБи, ракети різного типу, бойові частини Shahed-136) забруднюють ґрунт металами Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродуктами (Сплодитель, 2023). Сучасні моделі бойових зарядів містять тротил, гексоген, окфол або їхні суміші, що забезпечують високу потужність вибуху, а також алюмінієві порошки, які застосовуються для посилення вибухової хвилі та термобаричних ефектів, нітрати та перхлорати, що можуть використовуватися як окислювачі у складі вибухових сумішей.

Наприклад, детонація 115-мм осколково-фугасної бомби з гексогеном супроводжується утворенням приблизно 4000 л газоподібних продуктів згоряння. До 30% цих газів диспергує в атмосфері, тоді як значна частина, зокрема й важкі фракції та важкі метали, акумулюється у ґрунті.

Аналіз проб ґрунту, відібраних у зонах систематичних артилерійських обстрілів, демонструє високий вміст іонів свинцю (Pb^{2+}) та міді (Cu^{2+}) у ґрунтовому розчині. Вибухові гранати різного типу також є важливим чинником підвищення концентрації свинцю у ґрунтах (Hlavatskyi et al., 2024; Мацера, 2025).

Метою дослідження є визначення вмісту іонів важких металів у ґрунтах після вибухів бойових снарядів для оцінювання рівня забруднення та потенційних екологічних ризиків. Основними завданнями дослідження є:

- ідентифікація панівних важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn та інших), що потрапляють у ґрунт після детонації;
- проведення аналізу концентрації іонів (зокрема, Pb, Cd, Cu, Ni, Zn) у різних ґрунтових горизонтах для оцінювання глибини проникнення забруднення;

- оцінювання впливу вибухових речовин на фізико-хімічні характеристики ґрунту;
- розроблення рекомендацій щодо моніторингу та ремедіації забруднених територій.

Матеріал і методи

Для дослідження використовували об'єднані змішані проби ґрунту, відібрані на території Житомирської області в місцях вибухів, спричинених ударними безпілотними літальними апаратами (БпЛА типу "Shahed-136") і ракетами Х-22, Х-101. Ґрунтові зразки відбиралися з поверхневого шару вибухової вибухи та із глибини 20 см на семи майданчиках (табл. 1). Відбір проб проводився відповідно до стандартних методик, з урахуванням просторової варіабельності забруднення. Проби відбиралися у випадково визначених точках вибухів і прилеглої до них території, що дозволило забезпечити репрезентативність даних.

Таблиця 1
Перелік локацій, використаних для відбору проб ґрунтів

№ проби	Джерело ураження
П1	БпЛА типу "Shahed"
П2	БпЛА типу "Shahed"
П3	Керовані ракети
П4	БпЛА типу "Shahed"
П5	Керовані ракети
П6	БпЛА типу "Shahed" і керовані ракети
П7	БпЛА типу "Shahed"
П8	Контрольна

Для забезпечення репрезентативності, особливо в дослідженні великих ділянок або територій з потенційним забрудненням, формуються змішані зразки. Це передбачає відбір низки точкових проб (зазвичай від 10 до 20) з рівномірно розподілених ділянок у межах одного гомогенного контуру (наприклад, поля, ділянки в парку, умовно однорідної зони забруднення). Точкові проби ретельно перемішуються, з отриманої маси відбирається усереднений (змішаний) зразок вагою 0,5–1,0 кг. Використання спеціального інструментарію (ґрунтових бурів або лопат) забезпечує відбір проби по всій необхідній глибині без перемішування шарів. Після відбору зразки поміщаються в чисту тару (поліетиленові пакети або тканинні мішки), маркуються із зазначенням номера проби, дати відбору, місця та глибини, транспортуються до лабораторії (ДСТУ ISO 11047:2005).

Ґрунтові зразки для дослідження відбиралися із глибини 20 см і з поверхневого шару різних зон вибухів (загалом проведено аналіз 40 змішаних об'єднаних проб ґрунту). У лабораторії зразки висушували до повітряно-сухого стану, очищали від сторонніх включень (каміння, рослинних решток) та подрібнювали, просіюючи через сито з отворами 1 мм для подальших хімічних аналізів.

Для підготовки витяжки за методикою (Набиванець та ін., 1996) зважували 10,00 г підготовленого й просіяного ґрунту, вносили в конічні колби та додавали 100 мл 1 М розчину нітратної кислоти. Суміш струшували в горизонтальному шейкері протягом 1 години за кімнатної температури. Після цього фільтрували через паперовий фільтр.

Визначення вмісту металів методом атомно-абсорбційної спектроскопії здійснювали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115ПК. Атомізацію виконували полум'яним способом, з використанням суміші ацетилен – повітря, з відповідною довжиною хвилі для кожного металу: Pb – 283,3 нм, Cd – 228,8 нм, Cu – 324,7 нм, Ni – 232,1 нм, Zn – 213,9 нм, Co – 240,7 нм. Вміст металів у пробах визначали за калібрувальними графіками, які будувались за стандартними розчинами з відомою концентрацією відповідних металів. Усі вимірювання проводили у трьох повтореннях, з урахуванням холостих проб.

Результати визначення вмісту іонів металів у відібраних пробах ґрунтів виражали у мг/кг повітряно-сухого ґрунту. Вміст рухомих форм порівнювали із гранично допустимими концентраціями (далі – ГДК) згідно з державними нормами та з результатами контрольної проби – неуразованої ділянки ґрунту. Для визначення вмісту іонів важких металів у ґрунтових зразках, відібраних з територій, що зазнали впливу вибухів бойових зарядів, було застосовано методи кількісного аналізу, зокрема атомно-абсорбційну спектроскопію та ваговий аналіз.

Контроль рН витяжки здійснювали з використанням потенціометричного аналізу, щоб оцінити реакцію ґрунтового середовища та можливу мобільність металів. Використовували рН-метр "PH800 Benchtop pH Meter" фірми "Apera" (USA) з попереднім калібруванням буферними розчинами (рН = 4,00 та рН = 7,00).

Для отримання об'єктивних результатів кислотності ґрунтів проводили три види аналізів, зокрема визначали: активну, обмінну та гідролітичну кислотність. Активну кислотність оці-

нювали шляхом підготовки водної витяжки: наважку повітряно-сухого ґрунту масою 6,00 г заливали 30 мл дистильованої води, перемішували на шейкері протягом 20 хвилин, після чого відбирали порцію розчину над осадом і вимірювали рН (Набиванець та ін., 1996).

Обмінну кислотність встановлювали в сольовій витяжці, з використанням 1 М розчину KCl. Наважку ґрунту масою 20,00 г заливали 50 мл 1 М розчину KCl, перемішували протягом 15 хвилин і вимірювали рН у витяжці (Набиванець та ін., 1996).

Гідролітичну кислотність визначали на основі сольової витяжки, яку готували відповідно до методики (Набиванець та ін., 1996). Для цього наважку повітряно-сухої проби ґрунту масою 40,00 г заливали 100 мл 1 М розчину натрій ацетату, перемішували на шейкері протягом 30 хвилин, після чого отриманий розчин пропускали через паперовий фільтр. П'ятдесят мілілітрів прозорого фільтрату титрували 0,1 М розчином NaOH у присутності фенолфталеїну до появи блідо-рожевого забарвлення. Гідролітичну кислотність ґрунту (далі – Н(гідр)) розраховували за формулою:

$$H(\text{гідр}) = \frac{C(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})}{V(\text{сольової витяжки})} \times 1,75,$$

де $V(\text{NaOH})$ – об'єм розчину, який витратили на титрування 50 мл ґрунтової витяжки; $C(\text{NaOH})$ – концентрація розчину для титрування; 1,75 – коефіцієнт перерахунку повної гідролітичної кислотності на 1 кг ґрунту (Набиванець та ін., 1996).

Ваговий аналіз використовувався як допоміжний метод для зважування зразків.

Коефіцієнт забруднення (далі – Кз) ґрунту розраховують по-різному, за сферами застосування. Зазвичай Кз показує ступінь перевищення фактичного рівня забруднення над нормативом. У нашому випадку коефіцієнт забруднення розраховували як $K_z = F_z/N$, де F_z – фактичний рівень забруднення; N – нормативний рівень забруднення.

Використані методики дозволили забезпечити комплексний підхід до оцінювання стану ґрунтів, які зазнали впливу вибухових пристроїв та їх детонації. Поєднання хімічних, фізико-хімічних методів дослідження дозволило отримати репрезентативні результати, необхідні для аналізу впливу техногенного навантаження на екосистеми.

Результати

У результаті проведених досліджень було встановлено, що кислотність ґрунтового покриву в межах ураження детонаційними процесами варіює залежно від просторового розташування пробовідбірних майданчиків. Дані щодо активної, обмінної та гідролітичної кислотності ґрунтів наведені в таблиці 2.

Активна кислотність (рН водної витяжки), яка визначає концентрацію водневих іонів у ґрунтовому розчині, була в діапазоні рН = 6,10–7,41. Це свідчить про нейтральний або слаболужний характер ґрунтового середовища в досліджених пробах із зон ураження. Найменше значення рН було зафіксовано на майданчику П8 (контрольна проба) – 6,10. Максимальний рівень активної кислотності спостерігався на майданчику П5 (зона ураження керованою авіаційною ракетою) – 7,35, що може бути пов'язано з особливостями взаємодії складників ґрунту з детонуючими вибуховими речовинами.

Показники обмінної кислотності (рН сольової витяжки) у досліджуваних пробах П1 – П7 були в межах 6,71–7,28, що свідчить про досить стабільний стан ґрунтового буферного комплексу. Найвищі значення рН обмінної кислотності зафіксовано на майданчику П2 (рН = 7,28), що може свідчити про здатність ґрунту до нейтралізації кислотних компонентів. Найменше значення обмінної кислотності спостерігалось на ділянці П8 (рН = 4,87), що може свідчити про більший вміст рухомих кислотних форм

Таблиця 2
Показники активної і потенційної кислотності ґрунтових проб досліджуваної території

№ проби	Активна кислотність, рН	Обмінна кислотність, рН	Гідролітична кислотність, ммоль Н ⁺ /кг
П1	7,32	6,71	0,00083
П2	7,32	7,28	0,00055
П3	7,26	7,00	0,00069
П4	7,27	7,11	0,00083
П5	7,35	7,00	0,00097
П6	7,41	7,10	0,00097
П7	7,25	7,22	0,00055
П8	6,10	4,87	0,00138

або потенційну мобільність важких металів у ґрунті, який не зазнав руйнівного впливу детонаційних процесів вибухових речовин і процесу горіння.

Гідролітична кислотність, що характеризує здатність до сорбційного накопичення іонів водню порушених ділянок ґрунтів, коливалася в межах 0,00055–0,00097 ммоль Н⁺/кг. Найвищий рівень гідролітичної кислотності був зафіксований у пробах з дослідних майданчиків П5 та П6 (де мало місце ураження керованими ракетами) – 0,00097 ммоль Н⁺/кг, що може бути свідченням активної деградації ґрунту або підвищеного рівня його виснаження. Найвищий рівень гідролітичної кислотності встановлено для майданчика П8 – 0,00138 ммоль Н⁺/кг, що може вказувати на низьку кислотність ґрунту, що зазвичай характерно для нейтральних або слабокислих ґрунтів. Це означає, що ґрунт на майданчику П8 має стабільні умови для росту рослин, але його хімічний склад ще потрібно аналізувати комплексно.

Отримані результати свідчать про те, що ґрунти в межах досліджених ділянок, які зазнали порушення внаслідок вибухів з подальшим горінням, не мають значних відхилень у кислотності від норми, проте такі коливання кислотності в порівнянні з контрольною ділянкою можуть свідчити про зміни хімічного складу ґрунту внаслідок детонації боєприпасів. Зокрема, утворення оксидів азоту та сірки, які можуть взаємодіяти з водою та утворювати слабкі кислоти; порушення балансу мінералів і органічних речовин; наявність важких металів або залишків вибухових речовин. Усі досліджені параметри перебувають у межах оптимальних значень для більшості природних ґрунтів із слабкислим і слаболужним середовищем.

Отримані результати вмісту іонів важких металів дозволяють оцінити ступінь забруднення ґрунтового покриву та визначити просторові закономірності накопичення важких металів залежно від ступеня антропогенного втручання. У таблиці 3 наведено концентрації досліджуваних металів у відібраних пробах.

Умови проведення аналізу. Наважка ґрунту – 10 г, об'єм розчину – 100 мл, час контакту – 1 год. Для оцінювання рівня забруднення отримані результати порівнювалися з нормативами гранично допустимих концентрацій (ГДК), затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин» (Кабінет ..., 2021).

Кадмій (Cd²⁺) був виявлений у П2 (0,20 мг/кг), П3 (0,02 мг/кг) і П6 (0,24 мг/кг), що не перевищує ГДК, яка становить 0,7 мг/кг (див. табл. 3). Нульові значення у П1, П4, П5 та П8 свідчать про відсутність забруднення або нижчий за межу виявлення вміст рухомих іонів Cd²⁺. Єдине перевищення ГДК зафіксовано у П7 (4,3 мг/кг), що вказує на надзвичайне забруднення кадмієм у цій локації – у 6,14 раза. Оскільки точно відомо, що ґрунт у цій локації зазнав техногенного забруднення внаслідок падіння і подальшої детонації БпЛА (вибухи боєприпасів, залишки корпусу).

Таблиця 3

Результати атомно-абсорбційного визначення вмісту іонів металів у пробах ґрунтів

Вміст йонів, мг/кг	Cd*, **	Pb*, **, ***	Cu	Zn*	Co	Ni*, **
ГДК, мг/кг, рухома форма	0,70	6,00	3,00	23,00	5,00	4,00
П1	0,00	3,20	3,95	3,31	32,57	7,30
П2	0,20	559,50	13,60	27,80	98,81	9,80
П3	0,02	15,05	20,35	21,19	46,30	5,20
П4	0,00	33,40	65,25	13,82	72,68	8,55
П5	0,00	9,05	22,3	5,10	66,36	8,25
П6	0,24	25,60	10,9	14,40	72,68	8,90
П7	4,30	315,25	41,45	26,26	43,62	8,25
П8	0,00	0,00	0,00	3,20	5,10	0,75

Примітка. Характеристика шкідливих хімічних речовин за характером дії на організм людини: * – канцерогенні (бластомогенні) сполуки: плумбум (Pb), цинк (Zn), нікель (Ni); ** – сенсibilізуючі хімічні речовини або алергени (нікель (Ni)); *** – мутагенні речовини (плумбум (Pb)); **** – проявляє репродуктивну токсичність (плумбум (Pb)).

Рухомі форми іонів Pb^{2+} виявили в усіх зразках, окрім П8 (контрольний зразок). У П1 (3,2 мг/кг) концентрація іонів Pb^{2+} не перевищує ГДК. Тоді як у П3 (15,05 мг/кг), П4 (33,4 мг/кг), П5 (9,05 мг/кг) та П6 (25,6 мг/кг) фіксується суттєве перевищення ГДК. Вміст Pb^{2+} у пробах із локацій П2 (559,5 мг/кг) та П7 (315,25 мг/кг) перевищує допустимі концентрації в 93,25 та 52,5 рази відповідно. Такі концентрації свідчать про серйозне техногенне забруднення, зумовлене вибухом БпЛА, який цілком може бути джерелом локального забруднення свинцем, особливо якщо в його конструкції або боєприпасах використовувалися свинцевовмісні матеріали (свинцеві кулі, шрапнель або оболонки). Під час вибуху ці матеріали розпорошуються у формі аерозолів, пилу або уламків, які осідають у ґрунті. Якщо БпЛА оснащений свинцево-кислотними акумуляторами, під час вибуху можливе вивільнення свинцю у формі оксидів або електроліту. У деяких випадках свинець може бути присутній у фарбах, припоях, стабілізаторах пластмас, які під час горіння або вибуху утворюють токсичні сполуки. Таке гостре локальне забруднення свинцем може свідчити про те, що змішана проба відбиралась безпосередньо з епіцентру вибуху БпЛА.

Перевищення концентрації рухомої форми іонів міді (Cu^{2+}) виявили в усіх змішаних пробах, окрім контрольної П8. Максимальний вміст відмічено у П4 (65,25 мг/кг), що перевищує ГДК для міді (3 мг/кг) у 21,75 рази. В інших пробах вміст Cu^{2+} коливається від 3,95 до 41,45 мг/кг (табл. 3), що може свідчити про локальне техногенне забруднення, пов'язане з вибухом або руйнуванням конструкцій БпЛА.

Активні іони цинку (Zn^{2+}) виявили в усіх досліджуваних пробах, причому його концентрації коливаються від 3,20 (нижче ГДК, тобто в межах норми) до 27,80 мг/кг (перевищує ГДК на $\approx 21\%$). У змішаних пробах П2 (27,80 мг/кг) та П7 (26,26 мг/кг) визначили перевищення ГДК в 1,21 та 1,14 рази відповідно. У пробі П3 (21,19 мг/кг) концентрація іонів близька до ГДК, але не перевищує її. В інших пробах вміст Zn^{2+} залишається в межах допустимого рівня. Підвищений вміст цинку у П2 та П7 свідчить про локальне техногенне забруднення, що, імовірно, пов'язане з вибухом або розпадом конструкцій БпЛА, які могли містити сплави, фарби або елементи електроніки із вмістом цинку. Водночас нерівномірність розподілу Zn^{2+} у пробах вказує на плямистий

характер забруднення. Середньозважений фоновий вміст рухомих форм Zn^{2+} у ґрунтах України становить 0,6 мг/кг. У більшості регіонів України вміст цинку не перевищує 2 мг/кг. Цинк є есенціальним мікроелементом, і виявлені концентрації у П1, П3, П4, П5, П6 та П8 є безпечними та достатніми для забезпечення нормального функціонування ґрунтових екосистем.

ГДК для Ni^{2+} становить 4,0 мг/кг. Усі проби, окрім П8, перевищують цей норматив. Найвищі значення зафіксовано у П2 (9,80 мг/кг), П6 (8,90 мг/кг) та П4 (8,55 мг/кг). Нікель є складником сплавів, акумуляторів, електроніки, що також свідчить про техногенне походження. Перевищення ГДК за вмістом іонів нікелю у 1,3–2,4 рази свідчить про необхідність постійного моніторингу та розроблення можливих заходів щодо контролю його вмісту в компонентах екосистем. Нікель є складником сплавів, акумуляторів, електроніки – його присутність у досліджуваних пробах свідчить про техногенне походження.

Концентрація іонів кобальту (Co^{2+}) перевищена в усіх пробах, за винятком П8. Найбільший вміст виявлений у П2 (98,81 мг/кг), П4 (72,68 мг/кг) та П6 (72,68 мг/кг). Кобальт використовується в акумуляторах, сплавах, магнітах – його наявність підтверджує участь високотехнологічних компонентів у забрудненні. Відсутність чітко регламентованої ГДК для кобальту в українському законодавстві ускладнює інтерпретацію цих результатів, однак високі концентрації можуть свідчити про потенційно небезпечний рівень забруднення та потребують подальшого дослідження з урахуванням фонових показників для даного регіону. Для ґрунтового оцінювання екологічного ризику, пов'язаного з кобальтом, необхідно проведення додаткових токсикологічних досліджень або звернення до специфічних галузевих нормативів.

Розрахований коефіцієнт забруднення (далі – Кз) (табл. 4) дозволяє порівняти фактичну концентрацію кожного важкого металу з його гранично допустимою концентрацією (ГДК) та дає змогу: оцінити ступінь перевищення ГДК та наявність забруднення проб загалом; виявити просторові закономірності забруднення тощо. Зокрема встановили, що найбільш забруднені проби – П2, П4, П7. У них зафіксовано комплексне перевищення концентрацій кількох важких металів, що свідчить про гостре техногенне забруднення, імовірно, пов'язане з вибухами БпЛА або боєприпасів.

Таблиця 4

Середні значення коефіцієнтів забруднення змішаних проб щодо іонів токсичних металів

Проба	Cd	Pb	Cu	Zn	Co	Ni
П1	0,00	0,53	1,32	1,42	6,51	1,83
П2	0,29	93,25	4,53	4,29	19,76	2,45
П3	0,03	2,51	6,78	2,01	9,26	1,30
П4	0,00	5,57	21,75	0,60	14,54	2,14
П5	0,00	1,51	7,43	0,22	13,27	2,06
П6	0,34	4,27	3,63	0,63	14,54	2,23
П7	6,14	52,54	13,82	1,14	10,91	2,06
П8	0,00	0,00	0,00	0,14	1,02	0,19

Проби з найбільшим забрудненням: П7 – критично перевищені концентрації Cd (6,14), Pb (52,54), Cu (13,82), Co (10,91); П2 – дуже високе перевищення Pb (93,25), Cu (4,53), Co (19,76); П4 – Cu (21,75), Co (14,54); у П5, П6 – концентрації Cu, Co, Ni перевищують норму у 2–7 разів. Помірне забруднення виявлено у П3 – за Cu (6,78) та Co (9,26). У П1 наявне лише перевищення Co в 6,51 раза. У пробі П8 усі показники в межах норми або дуже близько до фону.

Обговорення

Для обґрунтування екологічної значущості й об'єктивності отриманих результатів було здійснено порівняльний аналіз із даними сучасних досліджень, що стосуються забруднення ґрунтів важкими металами на території України. Особливу увагу приділено роботам, які охоплюють території, що зазнали впливу бойових дій або інтенсивного техногенного навантаження. Зокрема, згідно з результатами агроекологічного моніторингу в межах дослідницької ініціативи компанії “Corteva Agriscience” (проєкт “Soil Test”), спрямованої на оцінювання стану ґрунтів після бойових дій, було проаналізовано понад 400 зразків проб ґрунтів. У звіті зазначено, що вміст нікелю перевищував нормативні значення приблизно на 20%, тоді як концентрації свинцю та миш'яку залишалися в межах допустимого рівня (Corteva ..., 2025). Порівняно із цими даними, результати даного дослідження демонструють значно вищі рівні забруднення: зокрема, вміст свинцю у П2 сягав 559,5 мг/кг, що в понад 90 разів перевищує ГДК, а вміст нікелю в кількох пробах перевищував норматив у 2–2,5 раза. Це свідчить про більш інтенсивне та локалізоване забруднення, імовірно, пов'язане з вибухами безпілотних літальних апаратів.

Результати досліджень, проведених у межах великих міст України, зокрема

Києва, Донецька й Івано-Франківська, свідчать про підвищений вміст важких металів у ґрунтах. Максимальні концентрації такі: свинець – 47,03 мг/кг, мідь – 66,42 мг/кг, цинк – 252,3 мг/кг, кадмій – 0,41 мг/кг. У нашому дослідженні вміст свинцю в окремих пробах перевищував 500 мг/кг, а кадмію – 4,3 мг/кг, що значно перевищує навіть показники, характерні для промислових зон. Це вказує на надзвичайно високий рівень локального забруднення, який не є типовим для звичайних урбанізованих територій (Андрусишина, 2020).

У дослідженнях, проведених у місті Дніпрі, виявлено значно вищі концентрації свинцю (до 7 830 мг/кг) та інших металів у ґрунтах поблизу промислових підприємств, що перевищує показники, зафіксовані в нашому дослідженні (Laptiev et al., 2024).

Знищення Каховської дамби у 2023 р. спричинило вивільнення понад 90 тис. тон важких металів, як-от свинець, кадмій і нікель, що призвело до значного забруднення водних екосистем (Klimentov, 2025).

У роботі, присвяченій оцінюванню стану ґрунтів на територіях, що зазнали бойових дій, було встановлено, що найбільш небезпечними є забруднення свинцем, кадмієм, міддю та нікелем у ґрунтах прифронтових зон. Автори акцентують на тому, що бойові дії призвели до вивільнення токсичних речовин у ґрунт, воду та повітря, спричинивши довгостроковий ризик для здоров'я населення та біосфери. Наводяться методики кількісного оцінювання рівнів забруднення з використанням індексів екологічного ризику, які дозволяють класифікувати території за ступенем небезпеки. У статті наголошується на необхідності розроблення системного підходу до моніторингу та ремедіації забруднених територій, а також міжнародного втручання з метою екологічної

безпеки (Rawtani et al., 2022). Зважаючи на комплексне перевищення ГДК за кількома металами у П2, П4 та П7, ці ділянки можна віднести саме до 5-го класу небезпеки. Це підтверджує, що джерелом забруднення є інтенсивний техногенний вплив, зокрема вибухи боєприпасів або уламки БпЛА.

Під час аналізу отриманих результатів на місці спаленої техніки виявлено зменшення вмісту рухомих форм фосфору до 40% та підвищення вмісту марганцю на 200–500% порівняно з фоновими показниками.

У результаті проведеного аналізу проб ґрунту, узятих з полів, на яких велися активні бойові дії, було виявлено збільшення вмісту у ґрунті заліза у 5 разів, марганцю – удвічі, міді – у 7 разів, нікелю – утричі, хрому – у 8 разів. Незважаючи на зростання концентрацій, значення залишалися в межах ГДК, що свідчить про буферну здатність ґрунту до акумуляції металів. Перевищення ГДК відзначено за вмістом у ґрунтах іонів кадмію – понад 0,85 мг/кг у рухомій формі за норми 0,7 мг/кг. Відомо, що кадмій негативно впливає на мікробіологічну активність, ферментативні процеси, а також порушує фотосинтез, транспірацію та засвоєння макро- і мікроелементів у рослин. Його токсичність проявляється навіть у незначних концентраціях.

На місцях згорілої техніки та у вирвах після вибухів рН ґрунту порівняно з фоновим був підвищений у бік підлужнення. Зафіксовано підвищення рН ґрунту на 0,21 одиниці порівняно з фоновими значеннями. Це пояснюється вигоранням органічної речовини та накопиченням лужних елементів. У короткостроковій перспективі це може впливати на мобільність важких металів, зокрема Pb, Cu та Ni, які в лужному середовищі утворюють металоорганічні комплекси з підвищеною рухливістю. Відмічається також зменшення вмісту гумусу порівняно з контрольними ділянками – коливання становлять від 0,3 до 1%. Це пов'язано з термічним руйнуванням органічної речовини та мікробіоти. Втрата гумусу негативно впливає на водоутримувальну здатність, структурність ґрунту та його біологічну активність.

Зміна рН, втрата гумусу та накопичення важких металів у межах допустимих значень створюють потенційні ризики для агровикористання ґрунтів. Активність іонів металів у ґрунті залежить не лише від їхньої хімічної природи, а й від властивостей ґрунотвірної породи, вмісту глинистих

фракцій, вологості, мікробіологічної активності й інших ландшафтно-геохімічних чинників. У лужних умовах посилюється утворення металоорганічних комплексів, що сприяє збільшенню рухливості свинцю, міді та нікелю, оскільки вони мають високу спорідненість з органічною речовиною.

Вибухові речовини, що використовуються в бойових зарядах БпЛА та керованих ракетах, характеризуються надзвичайною токсичністю навіть у мінімальних дозах, здатністю уражати великі площі, проникати в техніку та споруди, а також тривалим збереженням у ґрунтах і атмосфері. Їх застосування ускладнює своєчасне виявлення та ідентифікацію, а також дозволяє керувати масштабами ураження (Мацера, 2025). Хоча в нашому дослідженні не йдеться про пряме використання хімічної зброї, виявлені концентрації важких металів (особливо Pb, Cd, Cu) свідчать про подібний за наслідками токсичний ефект на ґрунтове середовище.

Колегами (Bondar et al., 2023) було встановлено, що вибухи на півночі України спричиняють утворення магнетитоподібних частинок із підвищеною магнітною сприйнятливістю, які містять залишки вибухових речовин. У таких зонах фіксувалося суттєве перевищення фонових рівнів As, Ba, Cu, Fe, Pb і Zn. Це узгоджується з нашими результатами, де у П2, П4 та П7 виявлено значне перевищення вмісту свинцю (до 559,5 мг/кг), міді (до 65,25 мг/кг) та цинку (до 27,80 мг/кг), що може бути наслідком розсіювання металевих частинок після вибухів.

Подібні висновки зроблено в роботі, у якій вивчали ґрунти долини річки Ірпінь (Bondar et al., 2023), досліджували магнітні та хімічні властивості зразків ґрунту із зон падіння ракет у долині річки Ірпінь, особливо зосереджувались на територіях, уражених бойовими діями та боєприпасами, що не вибухнули. Дослідження мало на меті відрізнити пов'язані з війною магнітні та хімічні сигнали та природний фон ґрунту.

Учені виявили, що в місцях падіння ракет і снарядів спостерігається локальне зростання концентрацій Pb, Cu, Zn, що корелює з підвищеними магнітними індексами. Це підтверджує ефективність комплексного підходу до оцінювання забруднення, який може бути застосований і до нашого випадку (Hlavatskyi et al., 2024).

У дослідженні (Petrushka et al., 2024) простежено зниження концентрацій Cd, Cu, Ni та Pb у ґрунтах протягом шести місяців після

обстрілів. Це свідчить про активні процеси трансформації та міграції металів у ґрунтовому середовищі. У нашому випадку, хоча дослідження є моментальним, наявність рухомих форм металів (особливо Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+}) вказує на їхню високу біодоступність і потенційну здатність до вертикального переміщення у профілі ґрунту.

Автори роботи (Trokhymenko et al., 2023) дослідили рівень забруднення ґрунтів у місцях знищення танків Т-72Б3 і Т-80. Було встановлено, що вміст свинцю перевищував ГДК у десятки разів, а також спостерігалось накопичення Zn , Cd , Cu . Це цілком узгоджується з нашими результатами, де проби, відібрані поблизу місць падіння БпЛА, демонструють подібне комплексне перевищення по кількох металах. Особливо показовими є П2 і П7, які мають перевищення ГДК по 45 елементах.

У ґрунтах Дніпропетровської, Миколаївської та Запорізької областей виявлено перевищення вмісту свинцю у 3, 5 і 11 разів відповідно. Також зафіксовано підвищення кислотності й ущільнення поверхневого шару, що ускладнює агровикористання. Високі концентрації важких металів у ґрунтах, що потенційно використовуються для сільського господарства, вказують на необхідність подальшого моніторингу й оцінювання придатності таких земель (Bulba et al., 2024).

Після потрапляння до ґрунту вибухові залишки та важкі метали зазнають складної трансформації під впливом як абіотичних, так і біотичних чинників. Їхня мобільність та хімічна поведінка визначаються сукупністю фізико-хімічних і біологічних процесів, серед яких ключову роль відіграють розчинення, випаровування, адсорбція, фотоліз, гідроліз і мікробіологічна деградація. Інтенсивність цих процесів залежить від гранулометричного складу, мінералогічної будови, вмісту гумусу, кислотно-лужного балансу, окисно-відновного потенціалу та наявності геохімічних бар'єрів (Кроїк, 2011).

Часовий фактор також суттєво впливає на динаміку забруднення. Зокрема, підвищена кислотність та наявність розчинних органічних речовин можуть прискорювати міграцію токсикантів. Переміщення забруднюючих речовин у ґрунті відбувається як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Горизонтальна міграція є найбільш активною в перші дні після вибухів і часто зумовлена аерозольним перенесенням. Вертикальне переміщення, своєю чер-

гою, зумовлюється дифузією іонів, капілярним підняттям вологи, діяльністю кореневих систем, ґрунтової мезофауни й антропогенними впливами. Найбільш визначальним чинником вертикальної міграції є водний режим ґрунту (Мірошніченко, 2001).

У ґрунтовому розчині забруднювачі можуть існувати як у вільній іонній формі, так і у зв'язаному стані, підтримуючи динамічну рівновагу. Метали у природних водах часто утворюють комплекси з неорганічними лігандами або органічними кислотами, що значно підвищує їхню рухливість (Яковенко та ін., 2015). Залежно від ступеня мобільності, важкі метали в рідкій фазі ґрунту поділяють на три основні форми: нерозчинну, колоїдну й істинно розчинну. Вони можуть бути представлені гідроксидами, орґано-мінеральними комплексами з гуміновими та фульвокислотами.

Колоїдні форми важких металів включають мінеральні, органічні й орґано-мінеральні частинки. У межах останніх метали формують хелатні або метал-орґанічні комплекси, які виникають внаслідок сорбції металів орґанічною речовиною або гідрооксидами заліза, марганцю і алюмінію (Сплодитель та ін., 2020). Після потрапляння до ґрунту мінеральні форми металів поступово переходять у більш стабільні структури під впливом біотичних чинників. Це сприяє їхньому закріпленню у твердій фазі, зокрема у формі сполук як літофільних, так і халькофільних елементів. Сукупність цих процесів формує сорбційний ландшафтно-геохімічний бар'єр, який обмежує подальшу міграцію токсичних елементів у ґрунтовому профілі.

Висновки

Усі досліджені змішані проби ґрунту містять іони важких металів, що свідчить про наявність техногенного навантаження, пов'язаного із впливом вибухових речовин, що містяться в бойових зарядах БпЛА та керованих ракет, фрагментах їхніх корпусів. Найбільш забрудненими виявилися П2, П4 та П7, які демонструють комплексне перевищення по кількох елементах.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) були перевищені для таких металів, як: кадмій – у П7 (4,3 мг/кг), що в 6,14 раза перевищує ГДК (0,7 мг/кг); свинець у П2 (559,5 мг/кг) та П7 (315,25 мг/кг), що у 93 та 52 рази перевищує ГДК (6,0 мг/кг); мідь у всіх пробах, окрім П8, з максимальним значенням у П4 (65,25 мг/кг), що у 21,75 раза перевищує ГДК (3,0 мг/кг); цинк у П2 (27,80 мг/кг) та

П7(26,26мг/кг), що перевищує ГДК(23,0мг/кг); кобальт у всіх пробах, окрім П8, з максимальним значенням у П2 (98,81 мг/кг), що в 19,76 разів перевищує ГДК (5,0 мг/кг); нікель у всіх пробах, окрім П8, з перевищенням в 1,32,45 разів щодо ГДК (4,0 мг/кг).

П8 є умовно фоновою, оскільки вміст усіх досліджених металів у ній не перевищує нормативні значення. Це підтверджує локальний характер забруднення, пов'язаний із конкретними точками впливу (вибухи, згоріла техніка).

Коефіцієнти забруднення (Кз) свідчать про дуже сильне забруднення (Кз > 5) іонами Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} у П2 та П7; сильне забруднення (Кз = 25) іонами Co^{2+} , Ni^{2+} у більшості проб; помірне забруднення (Кз = 12) іонами Zn^{2+} у П2 та П7.

Комплексне забруднення ґрунтів важкими металами, особливо у П2, П4 та П7, свідчить про формування екологічно небезпечних осередків, які потребують подальшого моніторингу, оцінювання ризиків та, за потреби, рекультиваційних заходів.

Наявність рухомих форм металів вказує на їхню високу біодоступність і потенційну здатність до міграції у ґрунтового профілі, що створює ризики для рослин, мікробіоти та ґрунтових вод.

Зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту (зниження вмісту фосфору, підлужнення рН, зменшення гумусу) додатково ускладнюють екологічну ситуацію та можуть впливати на поведінку металів у ґрунтовому середовищі.

Більшість досліджених проб (П1 – П7) характеризується нейтральною або слабколужною реакцією ґрунтового розчину. Значення активної кислотності (рН) у цих пробах коливаються в межах 7,257,41, що свідчить про помірне підлужнення ґрунтів

на територіях, де відбувалися бойові дії або згоріла техніка.

П8 характеризується найнижчим значенням рН = 6,10, що відповідає слабкислому середовищу. Це може свідчити про фоновий або незабруднений стан ділянки, яка не зазнала прямого техногенного впливу.

Обмінна кислотність у П1 – П7 також залишається на рівні рН = 7,007,28, що підтверджує стійке підлужнення ґрунтового середовища. Найнижче значення обмінної кислотності зафіксовано у П8 із рН = 4,87, що підтверджує її відмінність від решти проб.

Гідролітична кислотність у всіх пробах залишається дуже низькою (від 0,00055 до 0,00138 моль екв/100 г ґрунту), що свідчить про високу буферну здатність ґрунтів і відсутність глибоких процесів закислення. Найвище значення гідролітичної кислотності спостерігається у П8, що може бути пов'язано із природними особливостями ґрунотвірної породи або вищим вмістом органічної речовини.

Підлужнення ґрунтів у зонах бойових дій (П1 – П7), імовірно, пов'язане з вигоранням органічної речовини та мікробіоти; накопиченням лужних елементів (наприклад, кальцію, магнію, калію) після вибухів; зменшенням гумусового горизонту, що знижує кислотність.

Зміна кислотності ґрунту має екологічне значення, оскільки величина рН є ключовим фактором, що регулює: рухливість важких металів (у лужному середовищі зростає мобільність Pb, Cu, Ni); активність мікроорганізмів; доступність поживних речовин для рослин.

Отже, підлужнення ґрунтів у зонах техногенного впливу може сприяти підвищенню біодоступності токсичних металів, що створює додаткові ризики для екосистем, навіть за відсутності перевищення ГДК.

Список використаної літератури

Андрусишина І. Гігієнічна оцінка впливу металів на ендокринну систему як техногенних факторів малої інтенсивності : дис. ... докт. біол. наук : 14.02.01. Київ, 2020. 354 с.

Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу / А. Сплодитель та ін. Київ : ГО «Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 154 с.

ДСТУ ISO 11047:2005. Якість ґрунту. Визначання кадмію, хрому, кобальту, купруму, плюмбуму, мангану, ніколу та цинку в екстракті, отриманому після оброблення ґрунту «царською водкою». Методи полуменевої та електротермічної атомно-абсорбційної спектроскопії. Київ : Держстандарт України, 2005. 20 с. [Електронний ресурс]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51731 (дата звернення 10.05.2025).

Corteva надає фермерам можливість перевірити стан ґрунтів, які постраждали від військових дій [Електронний ресурс]. URL: <https://surl.li/scbbqw> (дата звернення 10.06.2025).

Кроїк Г. Токсикологічні аспекти накопичення та розподілу важких металів у ґрунтах промислових агломерацій. *Zoocenosis-2011: Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах*. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2011. С. 15–18.

Мацера О. Вплив воєнних дій на стан ґрунтів в Україні. *Агробізнес сьогодні* [Електронний ресурс]. URL: <https://agro-business.com.ua/zberezhennia-hruntu/item/31567-vplyv-voiennykh-dii-na-stan-> (дата звернення 10.06.2025).

Мірошниченко М. Адсорбційні механізми бар'єрної функції ґрунтів у міграції важких металів. *Вісник Запорізького державного університету*. 2001. № 1. С. 1–5.

Набиванець Б., Сухан В., Калабіна Л. Аналітична хімія природного середовища : підручник. Київ : Либідь, 1996. 304 с.

Сплодитель А., Кураєва І., Злобіна К. Особливості акумуляції важких металів у ґрунтах урбанізованих ландшафтів м. Бровари. *Геологічний журнал*. 2020. № 2. С. 39–51.

Яковенко О., Кураєва І., Кроїк Г., Злобіна К. Геохімічні особливості розподілу важких металів у ґрунтах зони впливу підприємств кольорової металургії. *Вісник Дніпропетровського університету*. Серія «Геологія, географія». 2015. № 23 (1). С. 152–157. <https://doi.org/10.15421/111520>.

Bondar K., Bakhmutov V., Poliachenko I., Hlavatskyi D., Menshov O. Magnetic and chemical signals of post-blast residue in soil: A case study from northern Ukraine. *Science of The Total Environment*. 2025. V. 977. P. 179342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179342>.

Bulba I., Drobitko A., Zadorozhnii Yu., Pismennyi O. Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*. 2024. № 27 (7). P. 107–117. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107>.

Laptiev V., Giltrap M., Tian F., Ryzhenko N. Assessment of Heavy Metals (Cr, Cu, Pb, and Zn). Bioaccumulation and Translocation by *Erigeron canadensis* L. in Polluted Soil. *Pollutants*. 2024. № 4 (3). P. 434451. <https://doi.org/10.3390/pollutants4030029>.

Klimentov M. Destruction of Ukraine dam triggered toxic “time bomb”, researchers say [Електронний ресурс]. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/03/13/kakhovka-dam-environment-heavy-metals-science-study/> (дата звернення 14.03.2025).

Petrushka K., Petrushka I., Holdrych A. Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems*. 2024. V. 9. № 2. P. 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>.

Rawtani D., Gupta G., Khatri N., Rao P.K., Hussain C.M. Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *Science of The Total Environment*. 2022. № 850. P. 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>.

Trokhymenko G., Litvak S., Litvak O., Andreeva A., Rabich O., Chumak L., Nalysko M., Troshyn M., Komarysta B., Sopov D. Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. V. 5. № 10 (125). P. 616. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289>.

Hlavatskyi D., Menshov O., Poliachenko I., Bakhmutov V., Bondar K. Comparison of magnetic and geochemical parameters in soil for the estimation of heavy metals pollution caused by warfare. *GeoTerrace-2024*. Lviv, 2024. P. 14. URL: <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/GeoTerrace-2024-067.pdf>.

References

Andrusyshyna, I.M. (2020). *Hihienichna otsinka vplyvu metaliv na endokrynnu systemu yak tekhnohennykh faktoriv maloi intensyvnosti* [Hygienic assessment of the impact of metals on the endocrine system as technogenic factors of low intensity] (Doctoral dissertation, 14.02.01 Hygiene and Occupational Pathology). Kyiv [in Ukrainian].

ДСТУ ISO 11047:2005 (2005). *Yakist gruntu. Vyznachannia kadmiu, khromu, kobaltu, kuprumu, plumbumu, manhanu, nikolu ta tsynku v ekstrakti, otrymanomu pislia obroblennia gruntu “tsarskoiu vodkoiu”*. *Metody polumenevoi ta elektrotermichnoi atomno-absorbtsiinoi spektrometrii* [Soil quality. Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in an extract obtained after digestion with aqua regia. Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods]. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. [Electronic resource] URL: https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=51731 (access date 10.05.2025) [in Ukrainian].

Corteva nadaie fermeram mozhlyvist pereviryty stan gruntiv, yaki postrazhdaly vid viiskovykh dii [Corteva provides farms with the opportunity to check the condition of soils affected by military operations]. [Electronic resource] URL: <https://surl.li/scbbqw> (access date 10.06.2025) [in Ukrainian].

Kroik, H.A. (2011). Toksykologichni aspekty nakopychennia ta rozpodilu vazhkykh metaliv u gruntakh promyslovykh ahlomeratsii [Toxicological aspects of the accumulation and distribution of

heavy metals in the soils of industrial agglomerations]. In *Zoocenosis-2011: Bioriznomanittia ta rol tvaryn v ekosystemakh* [Biodiversity and the role of animals in ecosystems]. Dnipropetrovsk: Vyd-vo DNU, pp. 1518 [in Ukrainian].

Matsera, O. (2025). Vplyv voiennykh dii na stan gruntiv v Ukraini [The influence of military actions on the state of soils in Ukraine] [Agribusiness today]. [Electronic resource] URL: <https://agro-business.com.ua> <https://agro-business.com.ua/zberezhennia-hruntu/item/31567-vplyv-voiennykh-dii-na-stan-> (access date 15.05.2025) [in Ukrainian].

Miroshnychenko, M.M. (2001). Adsorbtsiini mekhanizmy bariernoï funktsii gruntiv u mihratsii vazhkykh metaliv [Adsorption mechanisms of the barrier function of soils in the migration of heavy metals]. *Visnyk Zaporizkoho derzhavnoho universytetu* [Bulletin of Zaporizhzhya State University], 1, 15 [in Ukrainian].

Nabyvanets, B.I., Sukhan, V.V., & Kalabina, L.V. (1996). *Analitichna khimiia pryrodnoho seredovyscha* [Analytical chemistry of the natural environment]. Kyiv: Lybid [in Ukrainian].

Splodytel, A.O., Kuraieva, I.V., & Zlobina, K.S. (2020). Osoblyvosti akumulatsii vazhkykh metaliv u gruntakh urbanizovanykh landshaftiv m. Brovary [Peculiarities of the accumulation of heavy metals in the soils of urbanized landscapes of Brovary]. *Heolohichnyi zhurnal* [Geological Journal], (2), 3951 [in Ukrainian].

Splodytel, A., Holubtsov, O., Sorokina, L., & Chumachenko, S. (2023). *Vplyv viiny rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu* [The impact of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soil. Results of the analysis]. Kyiv: HO "Tsentr ekolohichnykh initsiatyv "Ekodiia" [NGO "Centre for Environmental Initiatives "Ecodiya"] [in Ukrainian].

Yakovenko, O.V., Kuraieva, I.V., Kroik, H.A., & Zlobina, K.S. (2015). Heokhimichni osoblyvosti rozpodilu vazhkykh metaliv u gruntakh zony vplyvu pidpriemstv kolorovoi metalurhii [Geochemical features of heavy metals distribution in soils of the zone of influence of non-ferrous metallurgy enterprises]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Heolohiia, heohrafiia* [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Geology, Geography], 23 (1), 152157. <https://doi.org/10.15421/111520> [in Ukrainian].

Bondar, K.M., Bakhmutov, V., Poliachenko, I., Hlavatskyi, D., & Menshov, O. (2025). Magnetic and chemical signals of post-blast residue in soil: A case study from northern Ukraine. *Science of The Total Environment*, 977, 179342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179342> [in English].

Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnyi, Yu., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, 27 (7), 107117. <https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107> [in English].

Laptiev, V., Giltrap, M., Tian, F., & Ryzhenko, N. (2024). Assessment of heavy metals (Cr, Cu, Pb, and Zn): Bioaccumulation and translocation by *Erigeron canadensis* L. in polluted soil. *Pollutants*, 4 (3), 434451. <https://doi.org/10.3390/pollutants4030029> [in English].

Klimentov, M. (2025, March 14). Destruction of Ukraine dam triggered toxic "time bomb", researchers say. *The Washington Post*. [Electronic resource] URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2025/03/13/kakhovka-dam-environment-heavy-metals-science-study/> [in English].

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), 109116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109> [in English].

Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P.K., & Hussain, C.M. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *Science of The Total Environment*, 850, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932> [in English].

Trokhymenko, G., Litvak, S., Litvak, O., Andreeva, A., Rabich, O., Chumak, L., Nalysko, M., Troshyn, M., Komarysta, B., & Sopov, D. (2023). Assessment of iron and heavy metals accumulation in the soils of the combat zone. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (10 [125]), 616. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289> [in English].

Hlavatskyi, D., Menshov, O., Poliachenko, I., Bakhmutov, V., & Bondar, K. (2024). Comparison of magnetic and geochemical parameters in soil for the estimation of heavy metals pollution caused by warfare. In *GeoTerrace-2024* (pp. 14). Lviv. URL: <https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2024/09/GeoTerrace-2024-067.pdf> [in English].

Отримано: 17.07.2025

Прийнято: 25.08.2025

Опубліковано: 17.10.2025

