

Екогеохімічна оцінка забруднення важкими металами ґрунтового покриву Ізюмського району під впливом бойових дій

Юрій Буц¹

д. техн. н., професор, завідувач кафедри охорони праці та навколишнього середовища,

¹ Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна,

e-mail: butsyura@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0003-0450-2617>;

Олена Крайнюк²

к. техн. н., доцент, завідувач кафедри кібербезпеки,

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна,

e-mail: alenauvarova@ukr.net,  <https://orcid.org/0000-0001-9524-040X>;

Валерій Сухов³

к. геол. н., зав. лаб., кафедра фундаментальної та прикладної геології,

³ Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,

e-mail: valery.sukhov@karazin.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5784-5248>;

Анатолій Лісняк³

к. с.-г. н., доцент, кафедра екології та менеджменту довкілля,

e-mail: anlisnyak@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-5850-7328>;

Лідія Катковнікова¹

к. техн. н., доцент, кафедра охорони праці та навколишнього середовища,

e-mail: katkovnikova@kart.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-9843-2033>

Військові дії на сході України завдали значної шкоди ґрунтам у зонах інтенсивних обстрілів. Метою роботи є оцінка екогеохімічного стану ґрунтового покриву Харківщини та визначення рівнів екологічного ризику забруднення важкими металами в місцях ракетних та артилерійських ударів. Дослідження проведено у форматі комплексної експедиції в Ізюмському районі Харківської області, що зазнав значних руйнувань від обстрілів. Експериментальна частина виконана в лабораторії «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (м. Харків). Методом атомно-абсорбційної спектроскопії визначено вміст токсичних елементів (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn) та супутніх металів (Fe, Cr, Mn) для детальної характеристики геохімічного фону. Інтерпретація результатів базувалася на сучасних підходах до оцінки екологічного ризику. Насамперед визначався коефіцієнт забруднення, який показує, у скільки разів вміст ВМ перевищує природний фоновий рівень. Далі розраховувався геокумуляційний індекс, що дозволяв встановити, чи є перевищення концентрацій наслідком саме техногенного впливу, зокрема військових дій. На завершальному етапі обчислювався інтегральний індекс потенційного екологічного ризику, який враховує токсичність кожного ВМ та прогнозує можливі наслідки його накопичення для екосистеми. Представлено результати комплексного дослідження хімічного забруднення ґрунтів у східній частині Харківської області, що постраждала від обстрілів та авіаційних ударів. На ключових ділянках Ізюмського району методом геоприв'язки відібрано зразки ґрунту з дванадцяти вирв від вибухів. За допомогою атомно-абсорбційної спектроскопії визначено концентрації Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Cd, Hg та інших важких металів. Дані свідчать про значне перевищення фонових рівнів токсичних елементів у ґрунтах, зокрема Zn, Pb та Cu, що безпосередньо пов'язано зі складом боєприпасів та залишками металевих уламків. Розраховані коефіцієнт забруднення, індекс гео-аккумуляції та індекс потенційного екологічного ризику вказують на помірні та високі загрози для екосистеми на більшості ділянок. Найбільші показники ризику зафіксовані в місцях інтенсивних бомбардувань, що підтверджує тривалі негативні наслідки воєнних дій. Отримана оцінка обґрунтовує впровадження системи моніторингу довкілля та створення наукової бази для відновлення територій у післявоєнний період.

Ключові слова: екогеохімічна оцінка, забруднення ґрунту, важкі метали, екологічний ризик, вплив військових операцій, Ізюмський район, моніторинг навколишнього середовища, відновлення ґрунтів.

Як цитувати: Буц Юрій, Крайнюк Олена, Сухов Валерій, Лісняк Анатолій, Катковнікова Лідія (2025). Екогеохімічна оцінка забруднення важкими металами ґрунтового покриву Ізюмського району під впливом бойових дій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 530-541. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-39>

In cites: Buts Yuriy, Krainiuk Olena, Sukhov Valeriy, Lisnyak Anatoliy, Katkovnikova Lidiya (2025). Ecogeochemical assessment of heavy metal contamination of the soil cover of the Izyum district under the impact of military operations. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 530-541. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-39> [in Ukrainian]

Вступ. Бойові дії становлять суттєву небезпеку забруднення для навколишнього природного середовища [1-3], зокрема для ґрунтового покриву, який є основою екосистем та сільськогосподарського виробництва [4]. Ізюмщина – один з найбільш постраждалих регіонів Харківської області України, де інтенсивні ракетні та артилерійські обстріли призвели до великих лісо-

вих пожеж [5], утворення численних вирв і суттєвих геохімічних змін [6, 7]. Тобто регіон значною мірою характеризується численними бєлігеративними ландшафтними комплексами [8]. Забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ) та продуктами детонації боєприпасів створює довготривалі ризики для екологічної безпеки регіону [9, 10]. Враховуючи масштаб і тривалість бойових

дій, актуальним є розроблення і застосування сучасних технологій моніторингу стану ґрунтів [11, 12], що дозволить своєчасно оцінювати ступінь забруднення, планувати заходи з ремедіації територій, а також оцінити вплив на здоров'я населення [13, 14].

Одним із ключових екологічних наслідків військових дій є забруднення ґрунтів важкими металами, що відбувається внаслідок розпаду вибухових речовин та металевих уламків [15, 16]. Зокрема, у місцях детонації боєприпасів можлива акумуляція таких ВМ, як свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni) та цинк (Zn). Ці хімічні елементи мають високу токсичність, можуть мігрувати у глибші горизонти ґрунту та негативно впливати на розвиток та формування рослинності й мікроорганізмів [17].

Вибухи артилерійських снарядів, мін та ракет спричиняють комплексні зміни у ґрунтах [18]: від механічного руйнування структури до хімічного забруднення [19]. Під час детонації у ґрунт потрапляють фрагменти боєприпасів, вибухових речовин [20] та токсичні сполуки, зокрема важкі метали [17] – свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni), цинк (Zn) та інші [21]. Ці хімічні елементи мають високу біоаккумулятивну здатність і значну токсичність, що призводить до деградації ґрунтів, погіршення стану екосистем та загрози для здоров'я населення. Інтеграція сучасних аналітичних підходів та цифрових технологій обробки даних (за допомогою Python) забезпечила формування системи моніторингу екогеохімічного складу ґрунтів, що включає розрахунок екологічних індексів і побудову наочних графічних моделей (діаграм, теплових карт), при цьому розроблений код доступний у відкритому доступі на GitHub для відтворення та подальшого використання [2].

Отже, військові конфлікти завдають ґрунтам і екосистемам значної шкоди, що проявляється у фізичній, хімічній та біологічній деградації. Для збереження рівня екологічної безпеки критично важливі сучасний моніторинг, науково обґрунтовані стратегії ремедіації та міжнародна співпраця.

Мета дослідження. Метою дослідження є оцінка впливу бойових дій на екогеохімічний склад ґрунтів Харківщини із застосуванням сучасних методів моніторингу та лабораторного аналізу, а також визначення рівня екологічного ризику забруднення важкими металами у зонах ракетних та артилерійських обстрілів.

Для досягнення мети передбачено виконання наступних завдань:

1. Організувати відбір ґрунтових зразків у вирвах від вибухів із використанням GPS-координат та фотофіксації.

2. Визначити концентрації важких металів у відібраних зразках за допомогою атомно-абсорбційної спектроскопії.

3. Порівняти результати з фоновими показниками.

4. Оцінити екологічний ризик та окреслити напрями застосування отриманих даних у системах моніторингу довкілля і плануванні ремедіації.

Матеріали і методи досліджень. Дослідження здійснювалося у форматі комплексної експедиції, організованої в межах Ізюмського району, на сході Харківської області – регіону, що зазнав найбільшого руйнування від артилерійських обстрілів і бомбардувань.

Ґрунти регіону представлені переважно чорноземами та темно-сірими лісовими ґрунтами, які характеризуються високим вмістом гумусу (від 5 до 8 %) та високим рівнем родючості. Вони мають значну буферну здатність і стійкість до деградаційних процесів. Однак, військові дії, включаючи детонацію боєприпасів, механічні пошкодження та вплив важкої техніки, спричинили локальне порушення структури ґрунтового покриву [11]. Вибухи снарядів призвели до утворення вирв, деструкцію ґрунтових горизонтів та порушення природного дренажу, що може спричинити зміну фізико-хімічних властивостей ґрунту [21, 22].

До завдань дослідження було отримати репрезентативні дані щодо впливу бойових дій на ґрунтовий покрив та визначити рівень концентрації ВМ у місцях детонації боєприпасів. Для забезпечення точності та надійності досліджень застосовувались такі етапи відбору:

Попередня підготовка. Визначення та картографування місць відбору зразків ґрунту за допомогою геоінформаційних технологій. Вибір локацій здійснювався на основі аналізу супутникових знімків та польового обстеження уражених земель.

Процедура відбору. Щоб виключити ризик вторинної контамінації, ґрунт відбирали за методикою комбінованого відбору з поверхневого шару (0–20 см) стерильним буром у 12 точках, розташованих у вирвах від вибухів артилерійських снарядів. Відбір здійснювався у листопаді 2024 року.

У сучасних дослідженнях також пропонується інноваційний підхід до відбору зразків ґрунту з вирв артилерійських снарядів для точнішої ідентифікації забруднення та визначення впливу конкретних типів боєприпасів [23], однак нами використаний класичний підхід із відбором зразків у центрі кратера, на середині радіусу та на його краю для комплексної оцінки рівня забруднення [18, 24]. Для подальшого аналізу у статті використані усереднені значення концентрацій ВМ, розраховані за результатами вимірювань з кожної зони вирви.

Для визначення природного (фонового) рівня забруднення додатково відбиралися контрольні зразки ґрунту на відстані 500–1000 м від зони ураження, у напрямку, протилежному переважаючим вітрам, на території, де відсутні сліди військової діяльності чи техногенного впливу. Відбір фонових зразків здійснювався за аналогічною методикою та з тієї ж глибини (0–20 см), що забезпечує коректність порівняння результатів.

Документування. Для кожного зразка фіксувалися точні координати за допомогою GPS. Виконувалася фотофіксація місць відбору. Заповнювалися польові протоколи з описом фізичних характеристик ґрунту (колір, структура, наявність видимих сторонніх включень). Для кожної точки здійснювали документування координат за допомогою GPS та фотофіксацію.

Транспортування та зберігання. Зразки поміщали у герметичні пластикові контейнери, транспортували до лабораторії в ізольованих умовах і зберігали у прохолодному, захищеному від світла приміщенні до моменту аналізу.

Дана методика дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх факторів на якість зразків та забезпечує достовірність отриманих результатів під час подальшого лабораторного аналізу.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії еколого-аналітичних досліджень на базі Науково-дослідної установи «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем» (УКРНДІЕП) (м. Харків). Основним методом визначення концентрації ВМ обрано атомно-абсорбційну спектроскопію (AAS), що забезпечує високу чутливість і точність вимірювань. Аналіз охоплював ключові токсичні хімічні елементи – свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni) і цинк (Zn), а також низку супутніх важких металів (Fe, Cr, Mn), які дозволяли істотніше охарактеризувати геохімічний фон.

Інтерпретація результатів базувалася на сучасних підходах до оцінки екологічного ризику. Для цього було використано низку інтегральних індексів: коефіцієнт забруднення (Contamination Factor, CF), що показує, у скільки разів вміст важких металів перевищує природний фон (запропонований Nakanson [25] у 1980 році для кількісної оцінки ступеня забруднення окремими металами відносно природного фону); геоаккумуляційний індекс (Geoaccumulation Index, Igeo), який дозволяє встановити техногенний характер перевищень, зокрема наслідки військових дій (вперше розроблений Müller [26] у 1969 році для порівняння сучасних концентрацій металів із докомінованими значеннями); а також інтегральний індекс потенційного екологічного ризику (Potential Ecological Risk Index, PERI), що враховує токсичність окремих хімічних елементів і дає змогу про-

гнозувати можливі наслідки їхнього накопичення для екосистем (також запропонований Nakanson [25] у 1980 році для комплексної оцінки потенційного ризику забруднення для біоти).

Отримані показники стали основою для побудови просторової моделі розподілу забруднення ґрунтів. На її базі розроблено концепцію «розумного моніторингу» – інтегрованої системи, яка поєднує лабораторні вимірювання, геоінформаційні технології та автоматизований збір польових даних. Такий підхід дозволяє створити адаптивну мережу контролю, здатну відстежувати динаміку забруднення у режимі реального часу та своєчасно сигналізувати про критичні зміни в стані ґрунтів на територіях, постраждалих від бойових дій. Це дозволило отримати достовірні результати щодо рівня екологічної небезпеки, оцінити масштаби забруднення та спрогнозувати його вплив на довкілля й здоров'я населення, а також окреслити подальші напрями ремедіації постраждалих територій.

Результати дослідження.

Для оцінки рівня геохімічного забруднення були відібрані 36 зразків ґрунту у місцях формування 12 вирв від артилерійських снарядів та авіабомб на землях сходу Харківської області. Відбір здійснювався в межах міст Ізюма, Борової, Балаклії, сел. Кам'янки, Веприцький хутір та прилеглих населених пунктів, що зазнали інтенсивних обстрілів (рис. 1). Такий підхід дозволив простежити особливості акумуляції ВМ саме у зонах безпосереднього ураження (табл. 1).

Аналіз концентрації важких металів.

Лабораторний аналіз зразків ґрунту відібраних з місць детонації снарядів і бомб на сході Харківської області, показав значні відмінності у концентрації ВМ, порівняно з фоновими рівнями, що фіксуються для чорноземів регіону. Найбільш виражене перевищення виявлено для цинку (Zn), свинцю (Pb) та міді (Cu), що безпосередньо пов'язано з хімічним складом боєприпасів та металевих уламків, які потрапляють у ґрунт після вибухів.

Проведений лабораторний аналіз засвідчив, що у зразках ґрунту з вирв від артилерійських снарядів спостерігається істотне зростання вмісту ВМ у зіставленні з фоновими концентраціями (табл. 2, рис. 2). Найбільш помітні аномалії зафіксовані для свинцю (Pb), цинку (Zn), міді (Cu) та хрому (Cr), що свідчить про їхній зв'язок із залишками боєприпасів та їх металевими уламками.

Зокрема, концентрація Zn у більшості зразків коливалася від 23 до 240 мг/кг, при цьому максимальні значення зафіксовано у зразку № 11 (240 мг/кг) – у зоні інтенсивних обстрілів, де спостерігалася велика кількість уламків техніки та фрагментів боєприпасів. Вміст Pb, одного з най-

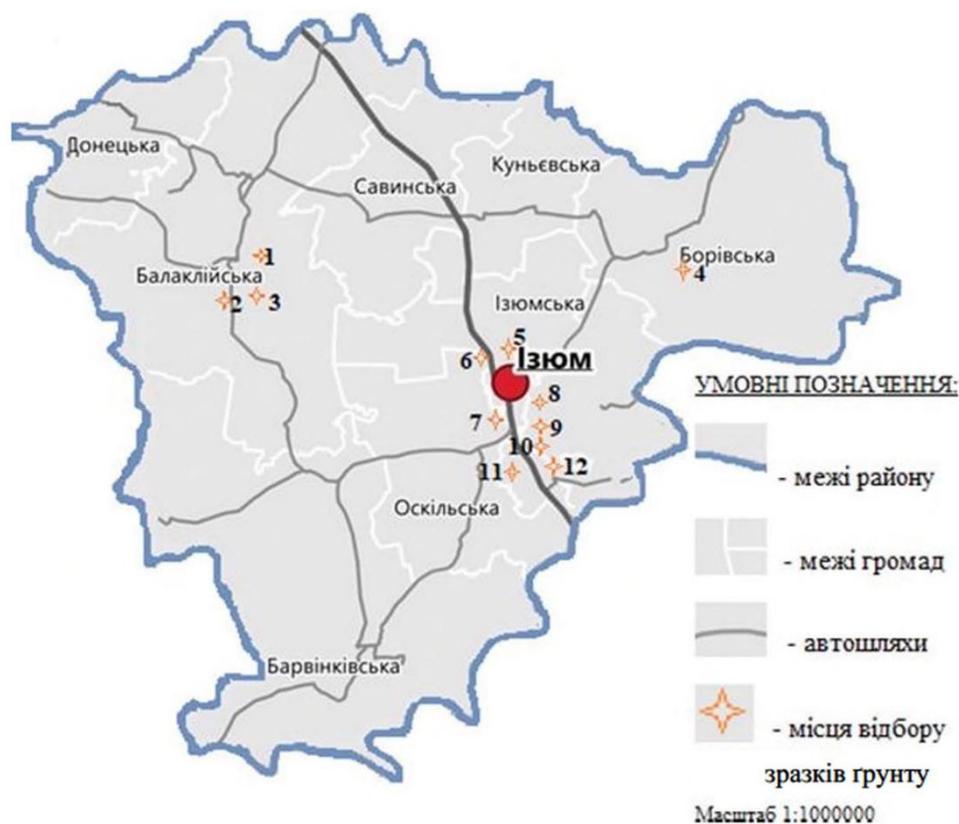


Рис 1. Місця відбору зразків ґрунту / Fig 1. Soil sampling locations

Таблиця 1 / Table 1

Місця відбору зразків ґрунту / Soil sampling locations

№	Координати	Місце розташування
1.	49°28'08.8"N 36°53'03.4"E	м. Балаклія, Харківська обл. Біля АЗС Укргазвидобування
2.	49°27'07.7"N 36°53'57.1"E	м. Балаклія, Харківська обл.
3.	49°27'05.2"N 36°53'58.0"E	м. Балаклія, Харківська обл.
4.	49°28'08.8"N 36°53'03.4"E	с. Борова, Харківська обл. (ліс, Борівська Дача)
5.	49°10'23.9"N 37°16'35.0"E	м. Ізюм Харківська обл.
6.	49°10'24.6"N 37°16'34.9"E	м. Ізюм Харківська обл.
7.	49°10'38.8"N 37°16'33.2"E	м. Ізюм Харківська обл. (біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
8.	49°10'38.1"N 37°16'35.1"E	м. Ізюм Харківська обл. (біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
9.	49°10'37.0"N 37°16'33.9"E	м. Ізюм Харківська обл. (біля меморіального парку «Гора Крем'янець»)
10.	49°09'06.1"N 37°16'41.4"E	с. Веприцький хутір, Ізюмський район Харківська обл.
11.	49°07'06.1"N 37°17'25.1"E	с. Кам'янка, Харківська обл. (берег р. Греківка)
12.	49°07'04.6"N 37°17'26.7"E	с. Кам'янка, Харківська обл.

більш токсичних хімічних елементів, у ряді зразків перевищував 60 мг/кг, а у двох випадках досягав 72–85 мг/кг, що є серйозним екологічним сигналом, оскільки Рb має високу мобільність і здатність до біоаккумуляції.

Мідь (Cu), яка часто використовується у сплавах для виготовлення снарядів, також демонструє підвищені показники – від 11 до 71 мг/кг. У кількох зразках (№ 2, 5, 11) спостерігалось перевищення фоновому рівня більше ніж в 3 рази. Концентрації Fe закономірно були найвищими серед усіх досліджених ВМ (від 6 100 до 48 000 мг/кг),

що пояснюється як природним вмістом Fe у чорноземах та темно-сірих лісових ґрунтах, так і надходженням цього металу внаслідок руйнування боеприпасів і військової техніки.

Кадмій (Cd) і ртуть (Hg) виявлено у незначних концентраціях (ртуть – здебільшого нижче межі визначення у 0,025 мг/кг), проте навіть мінімальні кількості цих хімічних елементів становлять суттєву загрозу, зважаючи на їхню високу токсичність. Хром (Cr) та нікель (Ni) продемонстрували локальні перевищення (Cr – до 56 мг/кг, Ni – до 39 мг/кг), що свідчить про можливе використан-

Результати геохімічного аналізу: масова частка важких металів у зразках ґрунту, мг/кг /

Results of geochemical analysis: mass fraction of heavy metals in soil, mg/kg

№ зразок	Zn	Pb	Hg	Cu	Fe	Cr	Ni	Mn
1 зразок	50	60	<0,025	14	6100	11	5,9	150
2 зразок	67	45	0,035	20	13200	29	15	220
3 зразок	44	19	<0,025	13	9400	22	10	175
1-2-3 фон	37	9	<0,025	6	8500	16	10	165
4 зразок	53	72	0,085	17	9800	21	11	180
5 зразок	95	67	0,055	29	17800	42	22	300
4-5 фон	46	13	<0,025	8	8300	17	10	180
6 зразок	31	10	<0,025	11	20000	40	24	250
6 фон	23	12	<0,025	5	16000	18	10	225
7 зразок	100	39	0,025	25	16000	33	20	280
8 зразок	120	85	0,095	33	21000	50	30	450
7-8 фон	52	10	<0,025	11	12800	12	11	240
9 зразок	23	8,3	<0,025	14	8800	17	9,4	170
10 зразок	36	15	<0,025	16	7600	19	8	190
9-10 фон	33	10	<0,025	6	7200	14	11	185
11 зразок	240	38	<0,025	71	48000	56	39	610
11 фон	59	21	<0,025	19	16500	16	17	368
12 зразок	89	58	0,045	27	15400	35	18	260
12 фон	41	5	<0,025	14	13400	17	10	255

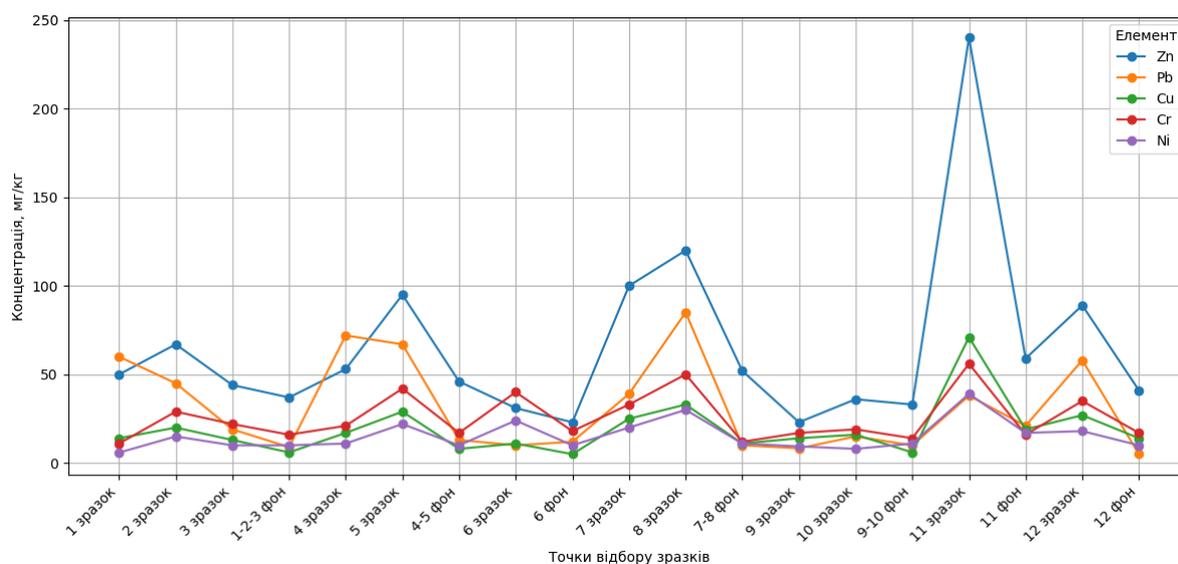


Рис. 2. Порівняння концентрацій важких металів у ґрунтових зразках та фонових значеннях, мг/кг /
Fig. 2. Comparison of heavy metal concentrations in samples and background values, mg/kg

ня легованих сталей у снарядах та осколках.

Загалом отримані дані демонструють чітку тенденцію: у місцях активних бойових дій ґрунти характеризуються локальними, але дуже високими концентраціями окремих ВМ, що підтверджує прямий зв'язок між військовими діями та екологічним станом території. Ці результати стали основою для подальшої оцінки рівня забруднення за індексами CF, Igeo та PERI, а також для моделювання просторового розподілу токсичних хімічних елементів у ґрунтовому покриві.

Свинець (Pb) у більшості зразків перевищує

фонові показники у 3–5 разів, особливо у зразках 4, 5 та 8 (до 85 мг/кг проти фонового рівня 10–13 мг/кг). Це підтверджує, що Pb є основним маркером вибухової та вогнепальної активності.

Цинк (Zn) демонструє нерівномірний розподіл: у зразку 11 концентрація сягнула 240 мг/кг, що майже у 4 рази вище за фон. Подібні сплески можуть бути пов'язані з використанням цинкових сплавів у оболонках снарядів.

Мідь (Cu) показала перевищення у 2–3 рази у більшості зразків (максимум у зразку 11–71 мг/кг), що відповідає застосуванню міді у де-

тонаторах та капсулях.

Хром (Cr) та нікель (Ni) локально фіксують сильні підйоми, особливо в зразках 6, 8 та 11 (Cr – до 56 мг/кг, Ni – до 39 мг/кг), що може свідчити про їхнє надходження з фрагментів сталі та броні.

Ртуть (Hg) виявлена у слідових кількостях (0,025–0,095 мг/кг), але в окремих зразках (4, 5, 8) спостерігається підвищення у 3–4 рази відносно фону, що може вказувати на залишки вибухових речовин, які містять ртутні сполуки.

Залізо (Fe) та марганець (Mn) в цілому демонструють природне походження, але у зразках 11 та 6 зафіксовано значне зростання (Fe – до 48 000 мг/кг, Mn – до 610 мг/кг), що пояснюється вмістом сталевих уламків у зоні вибуху.

Особливо відрізняється зразок 11 (Балаклія), де зафіксовано максимальні значення майже за всіма показниками (Zn, Cu, Fe, Cr, Ni, Mn). Це може свідчити про масоване ураження території важкими боєприпасами та накопичення ВМ у ґрунті після детонації.

В цілому, результати демонструють, що бойові дії спричиняють локальне, але дуже інтенсивне забруднення, з різким зростанням концентрацій токсичних ВМ у місцях вибухів. Найнебезпечнішими є ділянки із високим вмістом Pb, Cu та Zn, які мають тенденцію до міграції у глибші шари ґрунту, створюючи довгостроковий екологічний ризик.

Аналіз коефіцієнтів забруднення.

Коефіцієнт забруднення. (коефіцієнт концентрації, CF Contamination Factor) показує у скільки разів концентрація хімічного елемента у зразку перевищує фон. Розрахунок коефіцієнта забруднення (CF) для кожного з досліджуваних ВМ показав суттєву варіабельність рівня техногенного навантаження на ґрунти в межах досліджуваних територій (рис. 3). Найбільш критичні значення CF зафіксовані для заліза (Fe) та цинку (Zn), що в окремих зразках перевищують фонові концентрації у 2–4 рази, відображаючи інтенсивне надходження цих елементів у результаті руйнування боєприпасів та металевих конструкцій. Значне забруднення виявлено також для свинцю (Pb) та міді (Cu) – у більшості ключових точок CF перевищує 3, що свідчить про суттєвий антропогенний вплив та потенційну небезпеку для екосистеми.

Для нікелю (Ni), марганцю (Mn) та хрому (Cr) спостерігаються помірні відхилення від фонових значень (CF у межах 1–2), що може бути пов'язано як із внеском військових дій, так і з природними екогеохімічними особливостями ґрунтів. Особливої уваги потребує вміст ртуті (Hg): хоча її концентрації залишаються відносно низькими, коефіцієнт забруднення подекуди перевищує 2, вказуючи на локальні джерела надходження цього токсичного хімічного елемента.

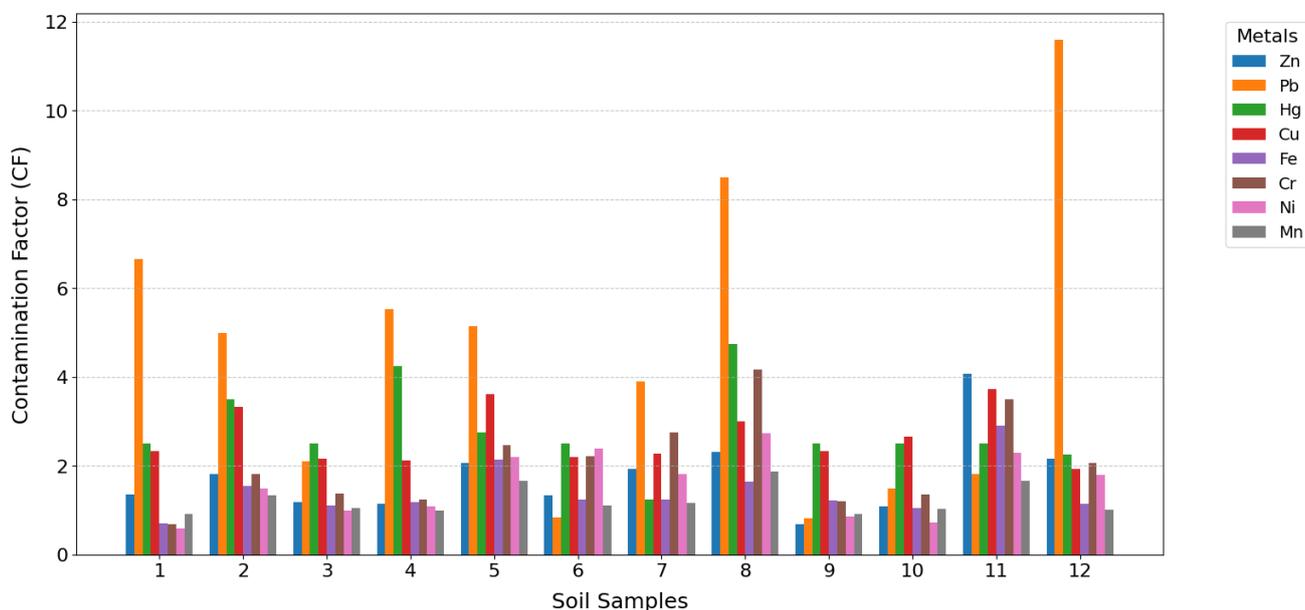


Рис. 3. Коефіцієнт забруднення (КЗ) важкими металами у зразках ґрунту /
Fig. 3. Contamination Factor (CF) for Heavy Metals in Soil Samples

Отримані результати засвідчують формування складного спектра «металевого» забруднення внаслідок бойових дій, з домінуванням хімічних елементів конструкційного походження (Fe, Zn, Cu, Pb). Це підкреслює необхідність комплексного моніторингу та пріоритетної уваги до

територій з найбільшими CF, де ризики для довкілля є найбільш вираженими.

Індекс геоаккумуляції. Для оцінки ступеня забруднення ґрунту ВМ було розраховано індекс геохімічного забруднення (I_{geo}) за формулою Мюллера:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{metal}}{1,5 \cdot C_{background}} \right)$$

де: C_{metal} – концентрація важкого металу у зразку, мг/кг;

$C_{background}$ – фонові концентрації важкого металу для даного регіону, мг/кг;

1,5 – коригуючий коефіцієнт, що враховує природні геохімічні варіації.

Індекс геоаккумуляції (I_{geo}) використовується для визначення антропогенного впливу на концентрацію ВМ у ґрунтах. Цей показник враховує природні коливання фонових концентрацій за допомогою коригуючого коефіцієнта, що робить оцінку більш точною і дозволяє виділити рівні забруднення за шкалою від незабрудненого до надзвичайно сильно забрудненого середовища (Müller, 1969).

Таким чином, на рис. 3 представлені результати комплексного аналізу геохімічного забруднення важкими металами в зоні дослідження, що дає можливість ідентифікувати локальні вогнища забруднення і планувати подальші заходи екологічного моніторингу та ремедіації.

У наших дослідженнях I_{geo} був розрахований для важких металів, таких як цинк, свинець, ртуть, мідь, хром, нікель та марганець. Аналіз засвідчив, що найбільш виражене техногенне забруднення спостерігається для свинцю та ртуті, де значення I_{geo} у деяких зразках перевищують 2, що відповідає категорії «помірно сильне» та «сильне забруднення» (рис. 3). Це підтверджує гіпотезу про значний вплив військових дій на стан ґрунтового покриву в цьому регіоні.

Показник сумарного екологічного ризику

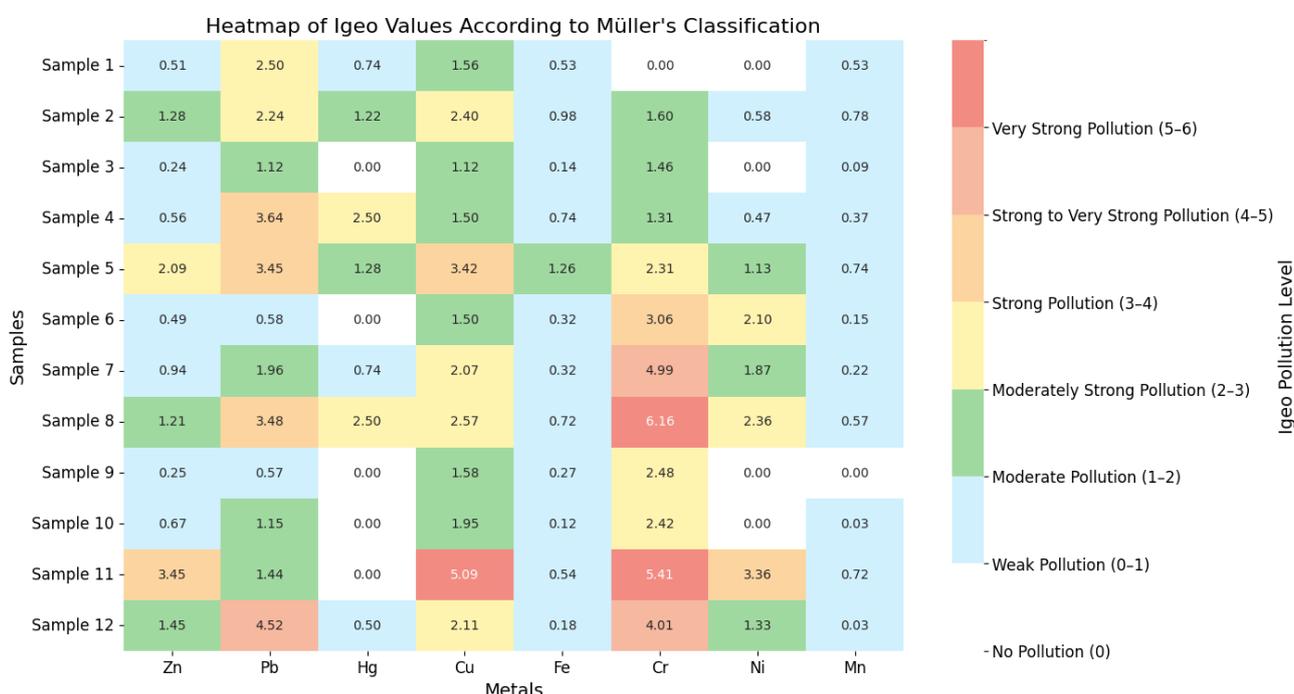


Рис. 4. Теплова карта значень I_{geo} згідно з класифікацією Мюллера / Fig. 4. Heatmap of Igeo Values According to Müller's Classification

(Potential Ecological Risk Index, PERI) – це інтегральний індекс, який оцінює потенційний екологічний ризик, пов'язаний із забрудненням ґрунту ВМ. Він враховує як концентрацію важкого металу у зразку, так і його токсичність. Формула розрахунку для кожного металу:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$$

де E_r^i – потенційний екологічний ризик для металу,

T_r^i – токсичний коефіцієнт металу,

$C_f^i = C_i/B_i$ – коефіцієнт забруднення (концентрація важкого металу у зразку поділена на фонову концентрацію).

Сумарний індекс PERI розраховується як сума ризиків усіх ВМ у зразку.

Жоден із зразків не продемонстрував надзвичайно високого рівня ризику, проте у більшості випадків показник PERI перевищує 160, що свідчить про високий потенційний ризик для екосистеми. Найбільші значення зафіксовано у зразках № 8 (PERI = 275,3) та № 4 (PERI = 219,6), що вказує на значне сумарне навантаження ВМ, ймовірно пов'язане з інтенсивними бойовими діями та руйнуванням ґрунтового покриву.

Зразки № 6, 7, 9 та 10 мають нижчі значення PERI (99,8–135,3), які відповідають значному, але не критичному ризику. Це може бути зумовлено як меншою концентрацією токсичних ВМ, так і

більш стабільними ґрунтовими умовами.

Градація індексу PERI (за Hakanson, 1980)

$PERI < 150 \rightarrow$ *низький ризик*

$150 \leq PERI < 300 \rightarrow$ *помірний ризик*

$300 \leq PERI < 600 \rightarrow$ *високий ризик*

$PERI \geq 600 \rightarrow$ *дуже високий ризик*

Діаграма (рис. 4) наочно демонструє просторову неоднорідність ризику:

- зелені та жовтогарячі відтінки відповідають зразкам із помірним та значним ризиком;

- червоні відтінки позначають ділянки з високим рівнем небезпеки для довкілля.

Важливо підкреслити, що жоден із досліджених пунктів не можна вважати «безпечним» – навіть мінімальні значення PERI перевищують 99, що потребує екологічного моніторингу та подальшої рекультивациі території. Таким чином, аналіз PERI вказує на необхідність оцінки довгострокових екологічних наслідків та визначення пріоритетних зон для відновлення ґрунтів (рис. 5).

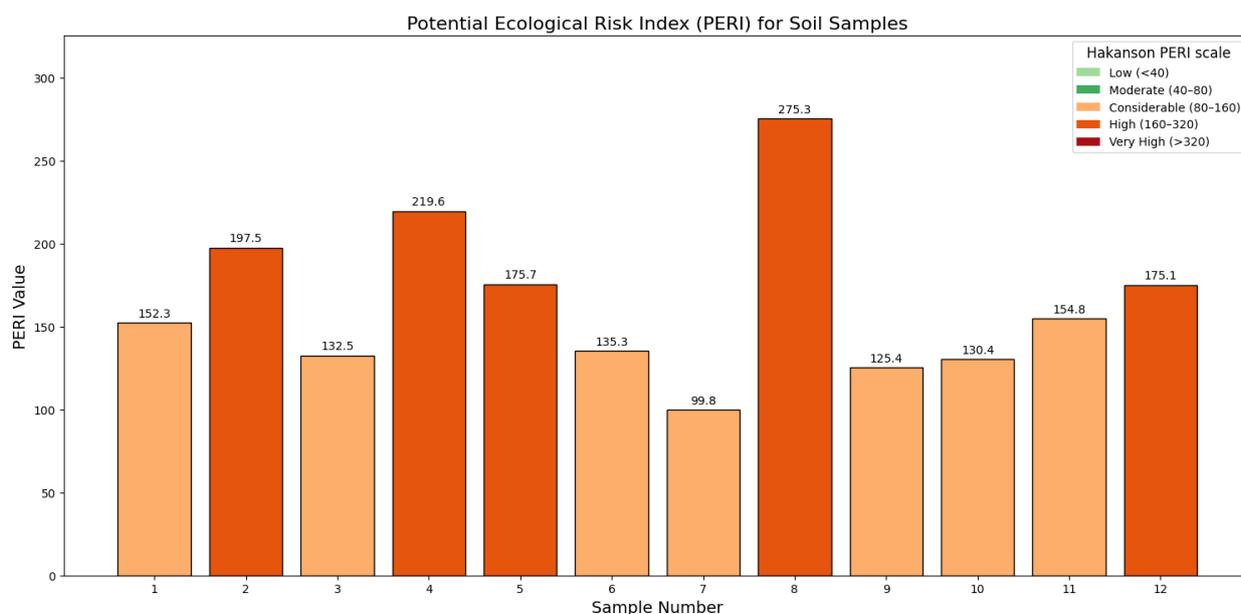


Рис. 5. Індекс потенційного екологічного ризику (PERI) для зразків ґрунту /
Fig. 5. Potential Ecological Risk Index (PERI) for Soil Samples

Вплив складу боеприпасів на хімічне забруднення ґрунтів. Сучасні боеприпаси, які активно використовуються у збройних конфліктах, містять широкий спектр хімічних компонентів, які після вибуху або розкладання здатні спричинити суттєве хімічне забруднення довкілля, зокрема ґрунтів. До основних токсичних елементів, що входять до складу боеприпасів, окрім важких металів (свинець, мідь, кадмій, цинк, нікель), належать вибухові речовини (тринітротолуол (ТНТ), гексоген (RDX), октоген (HMX)) та продукти їхнього термічного або механічного розкладу [27, 28].

Після використання артилерії, ракетних систем, мінометів чи авіаційних засобів ураження, ці речовини потрапляють у ґрунт як у вигляді дрібнодисперсних залишків снарядів, так і в результаті фугасної чи осколкової дії. Значна частина ВМ та органічних сполук довготривало зберігається у ґрунтового середовищі, негативно впливаючи на мікрофлору, гальмуючи розвиток рослинності та порушуючи природні біогеохімічні процеси [29].

Результати досліджень, проведених у районах інтенсивних бойових дій (зокрема, на прик-

ладі Ізюмського району Харківської області), засвідчують підвищений вміст свинцю, міді та нітроароматичних сполук у ґрунтах поблизу місць детонацій [11, 21]. Порівняльний аналіз із фоновими даними підтверджує техногенне походження цих забруднень. Особливо небезпечним є локальне зосередження вибухових залишків, що не лише ускладнює відновлення екосистем, але й створює додаткові ризики для цивільного населення.

Таким чином, хімічне забруднення ґрунтів унаслідок бойових дій є безпосередньо пов'язаним зі складом боеприпасів, що використовуються у збройному конфлікті. Ці наслідки мають кумулятивний характер і потребують подальшого моніторингу, картографування зон ризику та розроблення стратегії ремедіації та рекультивациі.

Проведені розрахунки індексів забруднення (CF), геоаккумуляційного індексу (Igeo) та індексу потенційного екологічного ризику (PERI) дозволили комплексно охарактеризувати ступінь техногенного навантаження на ґрунти дослідженої території. Отримана екогеохімічна оцінка свідчить про локальні зони підвищеного ризику, що вимагають першочергового втручання та конт-

ролю. Застосування запропонованих підходів забезпечує створення науково обґрунтованих систем екологічного моніторингу, здатних оперативно відстежувати зміни у складі ґрунтів та визначати пріоритетні ділянки для рекультивациі. На основі отриманих даних можуть бути розроблені стратегії ремедіації та післявоєнного відновлення територій, уражених бойовими діями, а також вдосконалені регіональні програми управління ґрунтовими ресурсами.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило суттєвий техногенний вплив бойових дій на хімічний склад ґрунтів Східної Харківщини. У результаті аналізу зразків ґрунту, відібраних у зонах детонацій боєприпасів, встановлено значне локальне перевищення вмісту важких металів – передусім цинку (Zn), свинцю (Pb), міді (Cu), а також хрому (Cr) і нікелю (Ni) – порівняно з природним фоновим рівнем.

Розраховані показники забруднення (CF), геоокумуляції (Igeo) та потенційного екологічного

ризик (PERI) свідчать про формування осередків помірного та високого екологічного навантаження, що створює довготривалі ризики для екосистем і здоров'я населення. Особливо критичні значення виявлені у зразках із місць масованих обстрілів (зокрема, у Балаклійському та Ізюмському районах), де вміст токсичних елементів перевищує допустимі нормативи у кілька разів.

Ідентифіковано прямий зв'язок між складом сучасних боєприпасів і характером забруднення ґрунтів. Отримані результати підкреслюють необхідність впровадження інтегрованих систем "розумного" моніторингу, які поєднують аналітичну хімію, геоінформаційні технології та індексну оцінку ризику для забезпечення ефективного екологічного контролю в зонах воєнного ураження.

Отримана екогеохімічна оцінка закладає наукове підґрунтя для розроблення стратегії рекультивациі та сталого відновлення постраждалих територій, а також має важливе значення для формування політики екологічної безпеки в умовах воєнних конфліктів.

Список використаних джерел

1. Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P., & Hussain, C. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *The Science of the Total Environment*, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
2. Крайнюк, О., Буц, Ю., Барбашин, В., Нікітченко, О., & Сухов, В. (2024). Деградація екосистем у Харківській області під час війни: супутниковий аналіз. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (61), 329-343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26>
3. Moliszewska, E., Bida, I., Matik, K., Ślusarczyk, A., Pawliczek, D., Havryliuk, O., Hovorukha, V., & Tashyrev, O. (2025). Analysis of variations in heavy metal levels and soil microorganism counts resulting from shelling incidents in Ukraine. *Archives of Environmental Protection*, 51(1), 83-91. <https://doi.org/10.24425/aep.2025.153752>
4. Байназаров, А., Попов, В., Вовк, У., & Пілюгін, А. (2024). Динаміка лісових пожеж на території Ізюмського району, викликаних бойовими діями. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, (40), 18-24. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-02>
5. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 4(1), 129-145. <https://doi.org/10.31648/aspal.9788>
6. Shvalya, V., Olenik, J., Vengust, D., Baranov, O., Cvelbar, U. (2024). Nanosculptured tungsten oxide: High-efficiency SERS sensor for explosives tracing *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135171: 2-10 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135171>
7. Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(1), 14328. <https://doi.org/10.15835/nbha53114328>
8. Denysyk, H., Kanskiy, V., Ataman, L., Volovyk, V., & Denysyk, B. (2025). Belligerent landscape boundaries of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(1), 32-40. <https://doi.org/10.15421/112504>
9. Shaforost, Y., Pogrebniak, O., Lut, O., Litvin, V., & Shevchenko, O. (2024). Chemical military-technogenic load on the soils of military training grounds. *Plant and Soil Science*, 15(2), 67-79. <https://doi.org/10.31548/plant2.2024.67>
10. 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)), 6-16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289>
11. 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. *The Science of the Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
12. Moon, I., Kim, H., Jeong, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. (2021). Chemical properties of heavy metal-contaminated soils from a Korean military shooting range: Evaluation of Pb sources using Pb isotope ratios. *Applied Sciences*, 11(15), 7099. <https://doi.org/10.3390/app11157099>
13. Kornus, A., Kornus, O., Shyshchuk, V., & Potseluev, V. (2020). The regional nosogeographical analysis and factors affecting population respiratory morbidity (on example of the Sumy region, Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(1), 82-93. <https://doi.org/10.15421/112008>
14. Krainiukov O., Nekos A., Buts Y., Kochanov E., Miroshnychenko I. (2020) Biomonitoring of soil quality within the limits of the oil refining enterprise XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November, 2020: 1-5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056064>

15. Krainiuk, O., Buts, Y., Ponomarenko, R., Asotskyi, V., Darmofal, E., Kalynovskyi, A., & Maniuk, V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geocology*, 34(2), 304–317. <https://doi.org/10.15421/112526>
16. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Didenko, N. V., & Barbashyn, V. V. (2023). Ecological consequences of environmental pollution with heavy metals as a result of the war in Ukraine. *European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov 2023, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
17. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Pakki, M. (2024). Technogenic and ecological hazards of using chemical plant protection products (on the example of copper-containing preparations). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (60), 354–365. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-26>
18. Михайлюк, В. І. (2024). Вплив воєнних дій на вміст органічної речовини і елементів живлення в ґрунтах півдня України. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, 29(1(44)), 109–123. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1\(44\).305376](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376)
19. Babii, V., Kondratenko, O., Lytvychenko, O., Hlavachek, D., Zhdan-Pushkina, O., Stankevych, V., Ostanina, N., Brytsun, V., Rudnytska, O., Suvorova, I., & Tetenova, I. (2024). Analytical consideration of the issues of soil pollution by hazardous substances, which contained in shells and rockets and possible ways of their influence on the population. *Environment & Health*, 4, 45–51. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.045>
20. Козярін І.П., Хоменко І.М., Черниченко І.О., Литвиченко О.М. (2023) Особливості лабораторних досліджень стану довкілля у воєнний період, 3, 24–30. *Environment & Health*. <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.03.024>
21. 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>
22. Корсун, С., Болоховська, В., Болоховський, В., Хоменко, Т., Борко, Ю., Дем'янюк, О., & Костина, Т. (2024). Агроекологічне обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених воєнними діями/ *Агроекологічний журнал*, 22, 100–112. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663>
23. Ivan, J., Šustr, M., Gregor, J., Potuzák, L., & Varecha, J. (2025). Advancing soil sampling techniques for environmental assessment of artillery impact zones. *Journal of Ecological Engineering*, 26(5):1–14. <https://doi.org/10.12911/22998993/196688>
24. Дмитренко, О., Дем'янюк, О., Погоріла, Л., Свидинюк, Н., Рожса, В., Кирилюк, П., & Романенко, В. (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>
25. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
26. Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118. <https://sid.ir/paper/618491/en>
27. Zgorelec, Ž., Šprem, N., Abramović, R., Galić, M., Hrelja, I., Delač, D., Safner, T., & Kisić, I. (2025). Temporal and Spatial Changes in Soil Quality at Shooting Ranges: A Case Study in Croatia. *Land*, 14(1), 78. <https://doi.org/10.3390/land14010078>
28. Mendes, G., Soares, L., Viegas, R., Chivavone-Filho, O., & Nascimento, C. (2023). Lead (Pb) in Shooting Range Soil: a Systematic Literature Review of Contaminant Behavior, Risk Assessment, and Remediation Options. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06783-x>
29. Flores, F., Mena, E., Granda, S., & Duchicela, J. (2025). Microbial Community Composition of Explosive-Contaminated Soils: A Metataxonomic Analysis. *Microorganisms*, 13. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13020453>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

References

1. Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P., & Hussain, C. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: A perspective. *The Science of the Total Environment*, 157932. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157932>
2. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Sukhov, V. (2024). Ecosystem degradation in Kharkiv region during the war: satellite analysis. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (61), 329–343. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-26> [in Ukrainian]
3. Moliszewska, E., Bida, I., Matik, K., Ślusarczyk, A., Pawliczek, D., Havryliuk, O., Hovorukha, V., & Tashyrev, O. (2025). Analysis of variations in heavy metal levels and soil microorganism counts resulting from shelling incidents in Ukraine. *Archives of Environmental Protection*, 51(1), 83–91. <https://doi.org/10.24425/aep.2025.153752>
4. Bainazarov, A., Popov, V., Vovk, U., & Piliugin, A. (2024). The dynamics of forest fires caused by war in the territory of Izyum district. *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography*, (40), 18–24. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-02> [in Ukrainian]
5. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 4(1), 129–145. <https://doi.org/10.31648/aspal.9788>
6. Shvalya, V., Olenik, J., Vengust, D., Baranov, O., Cvelbar, U. (2024). Nanosculptured tungsten oxide: High-efficiency SERS sensor for explosives tracing *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135171: 2–10 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135171>

7. Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(1), 14328. <https://doi.org/10.15835/nbha53114328>
8. Denysyk, H., Kanskiy, V., Ataman, L., Volovyk, V., & Denysyk, B. (2025). Belligerent landscape boundaries of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(1), 32-40. <https://doi.org/10.15421/112504>
9. Shaforost, Y., Pogrebniak, O., Lut, O., Litvin, V., & Shevchenko, O. (2024). Chemical military-technogenic load on the soils of military training grounds. *Plant and Soil Science*, 15(2), 67-79. <https://doi.org/10.31548/plant2.2024.67>
10. 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)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289289>
11. 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. *The Science of the Total Environment*, 964, 178594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>
12. Moon, I., Kim, H., Jeong, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. (2021). Chemical properties of heavy metal-contaminated soils from a Korean military shooting range: Evaluation of Pb sources using Pb isotope ratios. *Applied Sciences*, 11(15), 7099. <https://doi.org/10.3390/app11157099>
13. Kornus, A., Kornus, O., Shyshchuk, V., & Potseluev, V. (2020). The regional nosogeographical analysis and factors affecting population respiratory morbidity (on example of the Sumy region, Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(1), 82-93. <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112008>
14. Krainiukov O., Nekos A., Buts Y., Kochanov E., Miroshnychenko I. (2020) Biomonitoring of soil quality within the limits of the oil refining enterprise XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment», November, 2020: 1–5 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056064>
15. Krainiuk, O., Buts, Y., Ponomarenko, R., Asotskiy, V., Darmofal, E., Kalynovskiy, A., & Maniuk, V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(2), 304–317. <https://doi.org/10.15421/112526>
16. Krainiuk, O. V., Buts, Y. V., Didenko, N. V., & Barbashyn, V. V. (2023). Ecological consequences of environmental pollution with heavy metals as a result of the war in Ukraine. *European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov 2023, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520013>
17. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Pakki, M. (2024). Technogenic and ecological hazards of using chemical plant protection products (on the example of copper-containing preparations). *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (60), 354-365. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-26>
18. Mikhaylyuk, V. (2024). Influence of military actions on the content of organic matter and nutrients in soils of southern Ukraine. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 29(1(44)). [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1\(44\).305376](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376) [in Ukrainian]
19. Babii, V., Kondratenko, O., Lytvychenko, O., Hlavachek, D., Zhdan-Pushkina, O., Stankevych, V., Ostanina, N., Brytsun, V., Rudnytska, O., Suvorova, I., & Tetenova, I. (2024). Analytical consideration of the issues of soil pollution by hazardous substances, which contained in shells and rockets and possible ways of their influence on the population. *Environment & Health*, 4, 45-51. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.045>
20. Koziarin, I., Khomenko, I., Chernychenko, I., & Lytvychenko, O. (2023). Features of laboratory studies of environment state during the war period. *Environment & Health*, 3, 24-30. <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.03.024> [in Ukrainian]
21. 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>
22. Korsun, S., Bolokhovska, V., Bolokhovskiy, V., Khomenk, T., Borko, Y., Demyanyuk, O., & Kostyna, T. (2024). Agroecological substantiation of meliorative factors for restoration of soils disturbed by military actions. *Agroecological journal*, 22, 100-112. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663>. [in Ukrainian]
23. Ivan, J., Šustr, M., Gregor, J., Potuzák, L., & Varecha, J. (2025). Advancing soil sampling techniques for environmental assessment of artillery impact zones. *Journal of Ecological Engineering*, 26(5):1-14. <https://doi.org/10.12911/22998993/196688>
24. Dmytrenko, O., Demyanyuk, O., Pohorila, L., Sydyniuk, N., Rozha, V., Kyrlyuk, P., & Romanenko, V. (2023). Ecotoxicological assessment of soddy-podzolic soil under the influence of hostilities. *Agroecological journal*, 4, 89-96. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758>. [in Ukrainian]
25. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
26. Müller G. (1969). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, 2, 108–118. <https://sid.ir/paper/618491/en>
27. Zgorelec, Ž., Šprem, N., Abramović, R., Galić, M., Hrelja, I., Delač, D., Safner, T., & Kisić, I. (2025). Temporal and Spatial Changes in Soil Quality at Shooting Ranges: A Case Study in Croatia. *Land*, 14(1), 78. <https://doi.org/10.3390/land14010078>.
28. Mendes, G., Soares, L., Viegas, R., Chivone-Filho, O., & Nascimento, C. (2023). Lead (Pb) in Shooting Range Soil: a Systematic Literature Review of Contaminant Behavior, Risk Assessment, and Remediation Options. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06783-x>.

Ecogeochemical assessment of heavy metal contamination in the soil cover of the Izyum district under the impact of military operations

Yuriy Buts¹

DSc (Technical), Professor,

Head of the Department of Labor and Environmental Protection,

¹ Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine;

Olena Krainiuk²

PhD (Technical), Associate Professor,

Head of the Department of Cybersecurity,

² Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;

Valeriy Sukhov³

PhD (Geology), Head of the Laboratory,

Department of Fundamental and Applied Geology,

³ V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;

Anatoliy Lisnyak³

PhD (Agricultural), Associate Professor,

Department of Ecology and Environmental Management;

Lidiya Katkovnikova¹

PhD (Technical), Associate Professor,

Department of Labor and Environmental Protection

ABSTRACT

Purpose of the study. The ongoing military conflict in eastern Ukraine has caused significant damage to the environment, especially the soil cover in regions that have been subjected to intensive shelling. The purpose of the study is to assess the impact of hostilities on the ecogeochemical composition of soils in the Kharkiv region using modern monitoring and laboratory analysis methods, as well as to determine the level of environmental risk of heavy metal contamination in areas of missile and artillery shelling.

Materials and methods of research. The study was carried out in the format of a comprehensive expedition organized within the Izyum district, in the east of the Kharkiv region - the region that suffered the greatest destruction from artillery shelling and bombing. Experimental studies were conducted in the laboratory of ecological and analytical research on the basis of the Scientific Research Institution "Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems" (UKRNDIEP) (Kharkiv). The main method for determining the concentration of BM was atomic absorption spectroscopy (AAS), which provides high sensitivity and accuracy of measurements. The analysis covered key toxic chemical elements - lead (Pb), cadmium (Cd), copper (Cu), nickel (Ni) and zinc (Zn), as well as a number of associated heavy metals (Fe, Cr, Mn), which allowed for a more significant characterization of the geochemical background. The interpretation of the results was based on modern approaches to environmental risk assessment. First of all, the contamination factor (CF) was determined, which shows how many times the BM content exceeds the natural background level. Next, the geoaccumulation index (Geoaccumulation Index, Igeo) was calculated, which made it possible to establish whether the excess concentrations are a consequence of man-made influences, in particular military actions. At the final stage, an integral Potential Ecological Risk Index (PERI) was calculated, which takes into account the toxicity of each HM and predicts the possible consequences of its accumulation for the ecosystem.

Results. This study presents the results of a comprehensive field and laboratory study of chemical contamination of soils in the eastern Kharkiv region, focusing on areas directly affected by artillery and air bombardments. Soil samples were collected from 12 explosion craters throughout the Izyum district using georeferenced sampling methods. Concentrations of heavy metals, namely zinc (Zn), lead (Pb), copper (Cu), nickel (Ni), chromium (Cr), cadmium (Cd), mercury (Hg) and others, were determined using atomic absorption spectrometry. The data show significant excesses of background levels for several toxic elements, especially Zn, Pb and Cu, with contamination closely correlated with the composition of munitions and metal debris. Pollution indicators such as the contamination coefficient (CF), geoaccumulation index (Igeo) and potential ecological risk index (PERI) indicate moderate to high ecological risks in most of the studied sites. The highest PERI values were observed in areas of concentrated bombing, which highlights the long-term ecological consequences of military operations. The obtained ecogeochemical assessment emphasizes the need for an intelligent environmental monitoring system and provides a scientific basis for soil restoration strategies in post-conflict areas.

Keywords: *ecogeochemical assessment, soil contamination, heavy metals, ecological risk, impact of military operations, Izyum region, environmental monitoring, restoration.*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 4 August 2025

Accepted 7 November 2025