

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНА НЕБЕЗПЕКА ВПЛИВУ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ НА ҐРУНТОВИЙ ПОКРИВ ХАРКІВЩИНИ

Ю. В. Буц¹, О. В. Крайнюк², Р. В. Пономаренко³, А. О. Каграманян¹, В. В. Барбашин⁴¹Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна³Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна⁴Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна

УДК 504.064.2 (477.54)

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.2.2

Отримано: 05 вересня 2025

Прийнято: 27 листопада 2025

Cite as: Buts Y., Krayniuk O., Ponomarenko R., Kahramanyan A., Barbashyn V. (2025). Technogenic-ecological hazard of the impact of military actions on the land cover of the Kharkiv region. Technogenic and ecological safety, 18(2/2025), 14–22. doi: 10.52363/2522-1892.2025.2.2

Анотація

Розглянуто основні техногенно-екологічні аспекти впливу військових дій на ґрунтовий покрив, зокрема забруднення, зміну гідрологічного режиму та руйнування структури ґрунту. Висвітлено техногенно-екологічну небезпеку військових дій на території України, проаналізовано результати лабораторних досліджень проб ґрунтів, відібраних на землях Харківського регіону, які постраждали унаслідок ведення бойових дій, а саме ділянки із згорілою військовою технікою або ділянки після обстрілу артилерійськими снарядами та авіабомбами.

Підтверджено, що військові дії призводять до значного хімічного забруднення ґрунтового покриву важкими металами через вибухи, згоряння військової техніки та витіки промислових хімікатів. Це забруднення негативно впливає на екосистеми, знижуючи родючість ґрунтів, порушуючи ріст рослин та акумулюючи токсичні речовини у харчовому ланцюзі, що створює ризики для здоров'я людей. Акцентована увага на необхідності подальших досліджень та заходів з очищення та відновлення забруднених ґрунтів для мінімізації екологічних наслідків війни.

У статті розглядається вплив бойових дій в Україні в період з 2022 по 2024 роки на хімічне забруднення ґрунтового покриву важкими металами. Аналізуються основні джерела забруднення, серед яких руйнування боєприпасів, згоряння військової техніки та вибухи снарядів і ракет. Представлені результати лабораторних досліджень, проведених у Харківському регіоні, свідчать, що вміст свинцю, міді та цинку у ґрунтах суттєво перевищує фонові рівні та гранично допустимі концентрації. Зокрема, середній вміст свинцю у ділянках бойових дій у 2,8 рази перевищує ГДК. Концентрація цинку утримує перевищує фонові значення та у 1,2...1,4 рази перевищує ГДК. Середній вміст купруму становить 1,45 ГДК, спостерігається перевищення ГДК у 7 з 10 ділянок.

Висвітлено негативний вплив хімічного забруднення на біорізноманіття, стан рослин і тварин, а також ризики для здоров'я людей через біоаккумуляцію та біомагніфікацію важких металів у харчовому ланцюзі. Високий коефіцієнт варіації вмісту важких металів у зразках ґрунтів свідчить про значну нерівномірність забруднення, що потребує подальших досліджень для розробки ефективних заходів з очищення та відновлення забруднених земель.

Ключові слова: техногенно-екологічна небезпека, військові дії, Харківщина, ґрунтовий покрив, важкі метали.

Постановка проблеми

Військова агресія РФ в Україні спричинила руйнування інфраструктури, масові міграції та людські жертви, а також серйозно вплинула на природне середовище. Військові дії, які охопили значну частину країни, призвели до тривалих екологічних змін, що мають негативний вплив на здоров'я населення. Оцінка таких техногенно-екологічних наслідків є важливим завданням для мінімізації їх впливу на постраждалі території.

Вивчення техногенно-екологічного впливу бойових дій є важливим з кількох причин:

- збереження здоров'я населення, оскільки забруднення ґрунтів, води та повітря може мати довготривалі негативні наслідки для здоров'я людей, включаючи підвищення рівня захворюваності;
- відновлення екосистем, розуміння масштабу та характеру екологічних пошкоджень є необхідним для розробки ефективних стратегій відновлення та реабілітації постраждалих екосистем;
- запобігання подальшому руйнуванню екосистем, вивчення впливу бойових дій на довкілля дозволить виявити найуразливіші ланки та прийняти заходи для запобігання погіршенню ситуації;

– глобальний вплив на зміну клімату та біорізноманіття;

– розробка екологічної політики та законодавства, спрямованих на захист навколишнього природного середовища в умовах військових конфліктів, яка можлива за результатами наукових досліджень [1].

Таким чином, дослідження техногенно-екологічних наслідків війни в Україні є надзвичайно важливим завданням для забезпечення сталого розвитку, збереження здоров'я населення та відновлення природного середовища країни.

Порушення ґрунтового покриву, спричинені війною, здебільшого мають фізичний, хімічний і біологічний характер [2]. Фізичні порушення ґрунту пов'язані з будівництвом оборонних ліній, риттям траншей, бліндажів, утрамбовуванням унаслідок руху важкої техніки, утворенням вирв від снарядів. Хімічні порушення включають у себе потрапляння у ґрунт забруднюючих речовин, таких як нафтопродукти, важкі метали (ВМ), нітроароматичні вибухові речовини, фосфор-органічні нервово-паралітичні речовини, діоксини або радіоактивні елементи. Біологічні порушення,

викликані зміною фізико-хімічних властивостей ґрунту та втратою гумусу.

У зонах бойових дій виявлено ВМ. Більшість з них (Pb, Hg, As, Cd, Cu та Ni) зазвичай зустрічаються у підвищених концентраціях у районах бойових дій. Але слід враховувати саме рухливу форму, а не загальну концентрацію [3]. Хоча при зміні умов (рН ґрунту, кислотні дощі, повені, що змінюють окислювально-відновний потенціал), важкорозчинні сполуки ВМ можуть перетворюватись на рухливі форми [4, 5].

Наслідки широкомасштабної війни, що розв'язала рф проти України практично детально не досліджені. База знань щодо пошкодження ґрунтів бойовими діями повільно наповнюється, але є потреба у подальшому вивченні цього питання із застосуванням фітореMediaції, вивченні міграції ВМ із замінованих земель та територій, що підлягали артилерійським обстрілам та бомбардуванню [2].

Відзначимо, що за 2022-2024 роки бойові дії завдали непоправної шкоди екосистемам України, включаючи ґрунтовий покрив. Війна призводить не лише до фізичного руйнування ґрунту, але й до його хімічного забруднення. Потрапляння снарядів, згоріла військова техніка і нафтопродукти знищують екосистему, забруднюючи ґрунти і водні об'єкти [2, 6]. Одним із найнебезпечніших забруднювачів ґрунтів є ВМ: свинець, купрум, ртуть, миш'як, нікель та цинк. Ці ВМ потрапляють у довкілля із залишками вогнепальної зброї, що містить високі концентрації металевих часток, а також внаслідок використання артилерії, гранат і ракет.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Забруднення ВМ може спостерігатися багато років, оскільки вони утворюють нерозчинні та важкорозчинні оксиди та гідроксиди і накопичуються у ґрунтах, що впливає на їх родючість [1–16].

В Україні також є поодинокі дослідження, наприклад вивчення Луганської (Північно-Луганської), Северодонецько-Лисичанської та Торецько-Горлівсько-Єнакіївської промислових агломерацій свідчать, що вміст Zn на забруднених територіях перевищував фонове значення до 7,6 разів, Cd – в 1,4 рази, Pb – в 1,1 рази [16].

Результати аналізу ґрунту Львова після ракетного обстрілу показали, що в усіх зразках ґрунту спостерігалось значне перевищення ГДК Ti, Zn, Pb та Ni. Доведена висока ефективність вилучення рослинами Zn, Cu, Cr та Cd з ґрунту [14].

Військові дії в Україні спричинили значну деградацію ґрунтів, що зумовлено механічними пошкодженнями важкою технікою, забрудненням уламками військової техніки, боєприпасами та залишками паливно-мастильних матеріалів. Дослідження [7] виявило суттєві зміни в структурі та складі ґрунтових фракцій, що супроводжуються зниженням мікробіологічної активності та високою токсичністю. Аналіз вмісту важких металів (Pb, Zn, Cd) засвідчив їх акумуляцію у верхніх шарах ґрунту, що спричиняє фізико-хімічну деградацію та

негативно впливає на стан агроєкосистем. На основі отриманих результатів авторами введено новий термін – «деградація ґрунтів, спричинена бойовими діями», що охоплює механічне, фізичне, хімічне, біологічне та фізико-хімічне руйнування ґрунтового покриву [7].

Подібні наслідки спостерігаються і в інших регіонах України. Так, дослідження [10] показало, що інтенсивне бомбардування сільськогосподарських земель у Сумській та Чернігівській областях спричинило локальне підвищення концентрацій Ba, Zr, Rb, Zn та V. Проте загальні тенденції не вказують на суттєве забруднення, що ускладнює комплексну оцінку впливу бойових дій на стан ґрунтів. Водночас у Київській територіальній громаді Чернігівської області через активні бойові дії було пошкоджено близько 44 га ґрунтового покриву, а загальні екологічні та економічні збитки оцінено у 192,2 млн. грн. [10]. Використовуючи супутникові знімки, вдалося визначити зони бомбтурбації та встановити рівень забруднення, що варіювався залежно від інтенсивності бойових дій.

Масштабне картографування Харківщини дозволило виявити понад 420 615 кратерів і понад 3411 га ґрунтів, що зазнали механічного пошкодження від руху важкої техніки [8]. Незважаючи на незначні концентрації важких металів у більшості зразків, критичний рівень забруднення виявлено у місцях падіння ракет та авіаційних катастроф, що створює додаткові ризики для довкілля. Особливу увагу приділено оцінці ймовірності забруднення ґрунтів вибухонебезпечними предметами та нерозірваними боєприпасами.

Аналіз геохімічного складу ґрунтів у Чкалівській територіальній громаді Харківської області свідчить про незначне підвищення вмісту ВМ, яке, однак, не є критичним для ведення сільськогосподарства [15]. У роботі оцінено процеси самовідновлення ґрунтів та розглянуто можливі методи їх рекультивації. Загалом, військові дії суттєво впливають на стійкість ґрунтового покриву, змінюючи його фізичні, хімічні та біологічні властивості. Високий вміст токсичних речовин та підвищена кислотність ґрунту спостерігаються в районах активних бойових дій, а масштабне забруднення паливно-мастильними матеріалами призводить до загибелі флори та фауни.

Попри велику кількість проведених досліджень, оцінка впливу війни на стан ґрунтів залишається фрагментарною. Тому ми наголошуємо на необхідності подальших комплексних геохімічних досліджень та розробки методів моніторингу й екологічного відновлення постраждалих територій.

Постановка завдання та його вирішення

Метою статті є оцінка техногенно-екологічного впливу бойових дій на рівень забруднення ґрунтів важкими металами, огляд порушень ґрунтового покриву, спричинених війною, прогнозування можливих ризиків, пов'язаних із руйнуванням та забрудненням ґрунтів.

Матеріали і методи досліджень

Концентрації важких металів аналізували за допомогою полум'яного атомно-абсорбційного спектрофотометра (AAS). Експериментальне дослідження виконано у лабораторії еколого-аналітичних досліджень аналітичного центру «Українського науково-дослідного інституту екологічних проблем».

Вміст валових форм ВМ визначали відповідно до ДСТУ ISO 11047. Отримані результати порівнювали із гранично допустимою концентрацією (ГДК) відповідно до Нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах (Постанова КМУ № 1325).

У ході дослідження автори самостійно здійснили відбір проб ґрунту під час кількох експедицій у різні райони Харківщини, що зазнали впливу бойових дій. З кожної вирви від вибухів відбирали по 3–4

проби з різних зон – дна та брівки. Надалі ці проби об'єднували для формування середньої зразкової проби, яка використовувалася для подальшого аналізу. Загалом було сформовано 10 середніх проб, що репрезентують стан ґрунтів у досліджених районах. Відбір здійснювався з верхнього 20-сантиметрового шару ґрунту відповідно до стандартних методик екологічного моніторингу та оцінки забруднення (табл. 1).

У якості фонових значень вибрано проби ґрунту з ділянок, розташованих на відстані до 200 метрів від територій, що зазнали впливу вибухів снарядів. Відбір фонових проб здійснювався на землях із аналогічним типом землекористування, що дозволяє коректно порівнювати результати та оцінювати вплив бойових дій на хімічний склад і фізико-хімічні властивості ґрунтів. Дані збирали з вересня 2022 року до грудня 2024 року.

Таблиця 1 – Відбір проб ґрунтів для хімічного аналізу з місць, що постраждали внаслідок бойових дій у Харківському регіоні

№ проби	Розташування	Опис	Тип землекористування	Форма рельєфу	Морфометричні параметри зон уражень
1	Великий Бурлук	Місце масового знищення військової техніки	Сільськогосподарське поле	Плакор	Площа ураження ~0,1...0,3 га
2	Старий Салтів	Місце падіння авіабомб/снарядів	Лісосмуга поруч із полем	Схил	Діаметр кратерів до 5 м
3	Куп'янськ	Місце масового знищення військової техніки	Луки, відкритий простір	Плакор	Площа ураження ~0,3...0,4 га
4	Куп'янськ	Місце падіння авіабомб/снарядів	Сільськогосподарське поле	Схил	Діаметр кратерів до 6 м
5	Борова	Місце масового знищення військової техніки	Лісова зона	Тераса	Площа ураження ~0,2...0,3 га
6	Ізюм	Місце масового знищення військової техніки	Лісосмуга, узлісся	Плакор	Площа ураження ~0,3...0,5 га
7	Савинці	Місце масового знищення військової техніки	Сільськогосподарське поле	Плакор	Площа ураження ~0,2 га
8	Балаклія	Місце падіння авіабомб/снарядів	Лісова зона	Схил	Діаметр кратерів 4...6 м
9	Харків (окружна, р-н Північної Салтівки)	Місце падіння авіабомб/снарядів	Забудована територія, узбіччя дороги	Плакор	Діаметр кратерів 3...4 м
10	Харків (окружна, р-н П'ятихатки)	Місце падіння авіабомб/снарядів	Лісопарк	Схил	Діаметр кратерів 3...4 м

Результати та їх обговорення

Розглянемо основні аспекти впливу військових дій на ґрунти, включаючи фізичне пошкодження ґрунту, хімічне забруднення, біологічний вплив та порушення гідрологічного режиму, з прикладами та наслідками для довкілля, сільського господарства та соціально-економічної сфери.

1. Бойові дії можуть істотно змінювати гідрологічний режим ґрунту, що призводить до зміни ландшафтних комплексів [11].

2. Забруднення родючого шару ґрунтів може бути результатом розривів снарядів, витоків забруднюючих речовин і призвести до суттєвого зниження вологості та родючості ґрунту та інших руйнівних процесів.

3. Руйнування структури ґрунту внаслідок впливу важкої військової техніки призводить до ущільнення ґрунту, що обмежує здатність рослин ефективно використовувати наявні водні ресурси та адаптуватися до змін у водному балансі.

4. Великі пожежі, спричинені бойовими діями, також викликають зміни в гідрологічному режимі ґрунту. Масштабні зміни, зокрема лісові пожежі, зниження рослинності та зміни в індексах NDVI, автори аналізувати за допомогою супутникових знімків [6].

5. Існують дослідження, які вказують на можливий позитивний вплив військових дій на ґрунт, зокрема через створення «нейтральних» територій, таких як демілітаризовані зони, які можуть сприяти відновленню біорізноманіття, а також використання кратерів для розведення риб [9].

6. Важливо враховувати, що природний темп відновлення родючого шару ґрунту дуже повільний. Війна має довгостроковий вплив на екосистему, і відновлення ґрунтів може зайняти багато часу та зусиль.

За заявою прем'єр-міністра України, рф в Україні створила найбільше у світі мінне поле.

Понад 30 % території країни заміновано (YONHAP NEWS AGENCY, 2023). Площа потенційно замінованої території складає – 250 000 км² [2].

Однією з серйозних екологічних проблем є саме хімічне забруднення ґрунту внаслідок війни в Україні (табл. 2). Джерела хімічного забруднення ґрунту під час війни включають:

1. Залишки вибухових речовин, які можуть містити токсичні компоненти, що забруднюють ґрунт (залишки боєприпасів, кулі, осколки снарядів, міни). Ці залишки часто містять ВМ, такі як свинець, мідь, цинк, які потрапляють у ґрунт і забруднюють його.

2. Горіння військової техніки та обладнання, потрапляння у ґрунт нафтопродуктів.

3. Хімічні речовини зі складів та промислових підприємств, витоки промислових хімікатів у результаті руйнування інфраструктури.

Таблиця 2 – Вплив бойових дій на ґрунти (складено авторами)

Аспекти впливу	Деталі	Приклади	Наслідки
Фізичне пошкодження ґрунту	Кратери від вибухів	Вибухи артилерійських снарядів, ракет та авіабомб створюють кратери глибиною до кількох метрів, викликають динамічне ущільнення ґрунту, порушення горизонтів ґрунту	Руйнування ґрунтового профілю, перемішування генетичних горизонтів Зміни у фізичних властивостях ґрунту, утворення бєлігеративних ландшафтів з новими типами мікрорельєфу [7, 11]
	Ущільнення ґрунту	Ущільнення ґрунту внаслідок пересування важкої техніки (танків, БТР)	Зниження аерації ґрунту, погіршення водопроникності, дегазація ґрунту
	Механічне ушкодження	Будівництво оборонних споруд, розкопки траншей або тунелів, фортифікаційні споруди, лінії оборони тощо	Знищення ґрунтового профілю, порушення геоморфологічних процесів, переміщення ґрунту, зсуви, осідання ґрунту
Хімічне забруднення	Забруднення нафтопродуктами, важкими металами та іншими токсичними речовинами	Забруднення від вибухів (важкі метали, вибухові речовини, поліциклічні ароматичні вуглеводні, нітроароматичні вибухові речовини, органофосфорні нервово-паралітичні агенти [9])	Тривале забруднення ґрунту, зниження його родючості, вплив на рослини та тварин, потенційна необхідність повної заміни ґрунту на забруднених територіях [7]
	Утворення воєнно-техногенних геохімічних аномалій через накопичення вибухових та інших токсичних речовин		
	Осадження продуктів горіння боєприпасів, що містять азот, сажу, вуглеводні, марганець, свинець.	Площа потенційно замінованої території в Україні складає 250 000 км ² [2].	Високі ризики для здоров'я людей через контакт із забрудненими ґрунтами та вдихання токсичних сполук.
	Радіоактивне забруднення	Використання боєприпасів зі збідненим ураном	Тривале радіоактивне забруднення, ризики для здоров'я людей та довкілля
Біологічний вплив	Втрата родючості	Забруднення хімічними речовинами, ущільнення ґрунту	Зниження врожайності сільськогосподарських культур
	Втрата біорізноманіття	Руйнування природних середовищ проживання	Зменшення чисельності видів, знищення ендемічних рослин і тварин

Продовження таблиці 2

Аспекти впливу	Деталі	Приклади	Наслідки
	Вплив на ґрунтові мікроорганізми	Зменшення чисельності корисних ґрунтових мікроорганізмів, порушення біологічної активності ґрунту	Зниження ефективності природного самоочищення ґрунтів, погіршення родючості
	Інтродукція небезпечних мікроорганізмів	Навмисне або випадкове внесення мікроорганізмів, які можуть зберігати свою вірулентність в ґрунті [7]	Довготривала небезпека для екосистеми та людей, ускладнення реабілітації ґрунтів
Механічна ерозія	Вітрова ерозія	Руйнування поверхневого покриву ґрунту	Втрата верхнього родючого шару ґрунту, деградація земель, процес дефляції, розповсюдження пилових бурь
	Водна ерозія	Знищення рослинного покриву	Підвищення ризику змивання ґрунту, погіршення якості ґрунтів
Порушення гідрологічного режиму	Ущільнення ґрунту	Пересування важкої техніки, вибухи	Зменшення водопроникності, збільшення поверхневого стоку
	Пошкодження дренажних систем	Руйнування каналів, водовідводів	Затоплення полів, застій води, заболочування, вторинне засолення
	Зміна русел річок і водойм	Вибухи, переміщення ґрунту	Зміна напрямку стоку води, затоплення або висушення територій
	Забруднення водних об'єктів	Хімічні речовини, важкі метали	Погіршення якості води, забруднення ґрунтових вод
Порушення екосистем	Зміна екологічного балансу	Бойові дії змінюють енергообмін та інші природні процеси	Порушення стабільності екосистем, зниження продуктивності
	Втрата природних ресурсів	Руйнування природних ландшафтів	Зниження доступності та якості природних ресурсів
Соціально-економічні наслідки	Зниження продуктивності сільського господарства	Суттєва площа замінованих земель	Погіршення продовольчої безпеки, економічні втрати
	Вимушена міграція населення	Забруднені та деградовані ґрунти	Вимушене переселення, соціальні проблеми
Позитивний вплив [9]	Фертилізація ґрунту	Внесення N та P через вибухи, використання вибухових речовин в якості добрив	Покращення деяких фізичних властивостей ґрунту, сприяння зростанню деяких рослин
	Сформування природних резервуарів біорізноманіття	Демілітаризована зона (території з низьким рівнем людської діяльності)	Збереження біорізноманіття, відновлення природних екосистем

Отже, серед хімічних забруднювачів слід виділити:

– важкі метали (свинець, мідь, цинк): вони є токсичними для рослин і тварин та можуть акумулюватися в організмах і призводити до різних захворювань, включаючи порушення функцій нервової системи та нирок;

– органічні забруднювачі: поліароматичні вуглеводні (PAHs), що можуть утворюються під час горіння нафти та вугілля. Ці сполуки є канцерогенними і можуть забруднювати ґрунт на тривалий час;

– хімічні вибухові залишки, наприклад нітроароматичні сполуки, що є токсичними для живих організмів;

– нафтопродукти, які знижують родючість ґрунтів та знищують локальну флору і фауну.

Отже, вплив хімічного забруднення на екосистему полягає у порушенні росту рослин, зменшенні родючості ґрунтів, деградації екосистем; загибелі мікроорганізмів, що впливає на самоочищення ґрунту; акумулювання токсичних речовин у харчовому ланцюзі і як наслідок негативно позначається на здоров'ї людей. Таким чином, нами з'ясовано, що під час бойових дій відбувається викид значної кількості ВМ та токсичних речовин у довкілля. Це забруднення виникає через вибухи, руйнування боєприпасів, згоряння військової техніки та інших небезпечних об'єктів тощо. ВМ, такі як свинець (Pb), ртуть (Hg), арсен (As), кадмій (Cd), мідь (Cu), нікель (Ni) та цинк (Zn), потрапляють у ґрунт, підвищуючи концентрацію до токсичних рівнів.

Дослідження, проведені нами у Харківському регіоні, вказують на підвищені рівні ВМ у ґрунтах у

зонах бойових дій. Зокрема, вміст свинцю, купрум та цинку в ґрунтах суттєво перевищує фонові рівні, що свідчить про значне забруднення, спричинене бойовими діями (рис. 1–3).

Валовий вміст сполук Pb у точках відбору ґрунтів у зоні бойових дій варіював від 26 до 212 мг/кг ґрунту, фонові значення – від 9 до 30 мг/кг ґрунту (рис. 1). Перевищення фону відмічається для всіх зразків, а середній вміст Pb у ділянках бойових дій становить 90,3 мг/кг, що у 2,8 рази перевищував ГДК для валової форми.

Коефіцієнт варіації за вмістом Pb у зразках, відібраних у зоні бойових дій, становив 139,1 % та 242,8 % – поза зоною впливу (фонові значення).

Валовий вміст сполук Cu у точках відбору ґрунтів у зоні бойових дій варіював від 56 до 288 мг/кг ґрунту, фонові значення – від 9 до 44 мг/кг ґрунту (рис. 2). Перевищення ГДК у зонах бойових дій відмічається у 7 з 10 ділянок, а середній вміст Cu в 1,45 рази перевищує ГДК.

Валовий вміст Zn у досліджених ґрунтах, пошкоджених внаслідок бойових дій становить від 96 до 418 мг/кг ґрунту, фонові значення – від 38 до 176 мг/кг ґрунту (рис. 3). Перевищення фонових показників спостерігається для всіх 10 досліджених зразків. Середній вміст Zn у зразках становить 207 мг/кг, що у 3 перевищує фонові значення; дві проби мають значення в 1,2 та 1,4 рази вище за ГДК. Коефіцієнт варіації за вмістом Zn становить 197 % у зразках із зони бойових дій, та 159 % – фонові значення.

Аналізуючи отримані результати, можна зробити декілька важливих узагальнень про вплив бойових дій на забруднення ґрунту.

Загальні тенденції (табл. 3). У місцях згорілої техніки (ділянки 1, 3, 5, 6, 7) концентрації ВМ зазвичай вищі, ніж у місцях вирв після артобстрілів (ділянки 2, 4, 8, 9, 10). Аналогічні результати демонструються у роботі [7]. Для Pb концентрація у ґрунті перевищує ГДК у 4-7 разів, особливо у точках 1 та 3, що пов'язані зі згорілою технікою. Балюк із співавторами (2024) спостерігає ще значно більший вміст Pb (78,8 ГДК) [8]. Для Cu перевищення ГДК спостерігається майже у всіх точках згорілої техніки. Для Zn загальний рівень у місцях згорілої техніки також вище, хоча спостерігається більший діапазон значень. У зразках, що проаналізовано [7], вміст Zn досягає 8,7 ГДК.

У точках 1, 3, 5, 6, 7 (згоріла техніка) концентрація Cu на 40 % вища, ніж у вирвах. Це може пояснюватися тим, що Cu використовується у проводці, броні техніки та мастилах, які при згорянні вивільняють Cu у довкілля.

Наші результати співпадають із дослідженнями [7], у якому також зазначено, що у місцях горіння техніки спостерігається більше забруднення Cu, ніж у кратерах. Науковці вказують на вищий вміст Cu саме у кратерах від вибухів, особливо у місцях детонації снарядів калібру 152 мм та падіння ракет. Але найвищі рівні Cu (65,0...71,5 мг/кг) зафіксовані у місці падіння бойового гелікоптера [7].

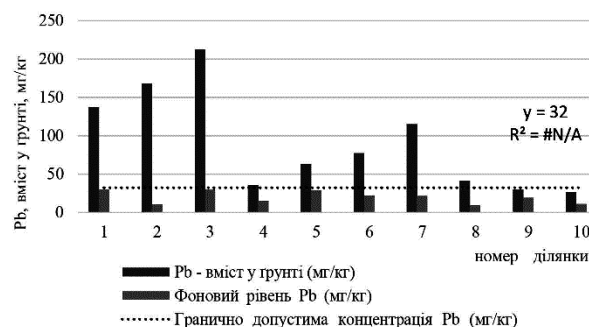


Рисунок 1 – Вміст валових форм Pb у ґрунтах сільськогосподарського призначення Харківського регіону, що постраждали внаслідок бойових дій

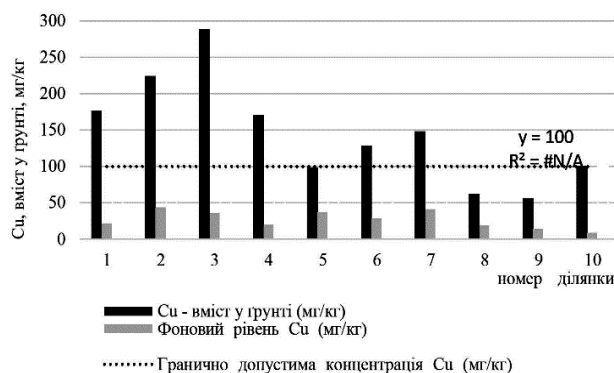


Рисунок 2 – Вміст валових форм Cu у ґрунтах сільськогосподарського призначення Харківського регіону, що постраждали внаслідок бойових дій

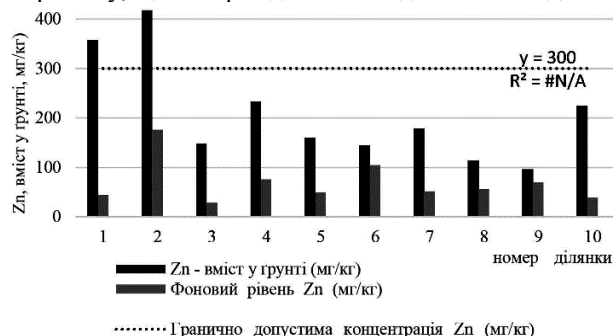


Рисунок 3 – Вміст валових форм Zn у ґрунтах сільськогосподарського призначення Харківського регіону, що постраждали внаслідок бойових дій

Таблиця 3 – Порівняння між місцями згорілої техніки та вирвами від артобстрілів

Середній вміст, мг/кг	Місця згорілої техніки (1, 3, 5, 6, 7)	Вирви від обстрілів (2, 4, 8, 9, 10)	Різниця
Pb	120,8	59,8	у 2 рази більше у місцях згорілої техніки
Cu	168,2	120,4	на 40 % вище у місцях згорілої техніки
Zn	197,4	181	на 9 % вище у місцях згорілої техніки

Хоча загальні рівні Zn перевищують фонові значення, різниця між місцями згорілої техніки та вирвами менш виражена (9 % вище у згорілій техніці). Це може пояснюватися тим, що Zn є частиною оболонки боєприпасів, але також використовується у сплавах металів, що горять у військовій техніці. Балюк та ін. (2024) виявили найвищі рівні Zn (107,4...114,2 мг/кг) саме у місці падіння гелікоптера [8].

Горіння військової техніки – значне джерело забруднення ВМ, особливо Pb та Cu. Обстріли (вирви) також вносять забруднення, але їх вплив слабший, оскільки головні складові боєприпасів – це вибухові речовини та ВМ, що менше залишаються в ґрунті після вибуху. Найбільшу загрозу становить Pb у місцях згорілої техніки, оскільки він є токсичним для біосфери та може накопичуватися у рослинах і воді.

Таким чином, забруднення ґрунтів ВМ під час бойових дій протягом 2022–2024 років є досить суттєвим і пов'язано це із руйнуванням боєприпасів, згорянням військової техніки та вибухами снарядів і ракет. Серед основних забруднювачів: свинець, мідь, цинк. У нашому дослідженні ми не проводили радіальний аналіз ґрунту із центра кратера до його периферії, але інтерес представляє результати [8], у яких відмічається, що концентрація ВМ у більшості кратерів зменшується від епіцентру вибуху до периферії, проте у місцях падіння вертольота та ракети це зниження відбувається більш різко.

Слід відмітити, що крім поширених ВМ, що досліджені у цій статті, у ґрунтах зон бойових дій фіксуються також інші забруднювачі, наприклад Se, Sr, V, As [7, 8].

Подальше збереження високих рівнів ВМ у ґрунтах досліджених земель може призвести до довготривалих екологічних ризиків:

- зниження родючості ґрунтів через накопичення токсичних ВМ, що вплине на врожайність сільськогосподарських культур;
- поширення токсичних елементів у харчовій ланцюг, що може негативно впливати на здоров'я людей та тварин;
- міграція забруднюючих речовин у ґрунті та поверхневі води, що підвищує ризики для водних екосистем та питного водопостачання;
- уповільнене природне відновлення ґрунтів, особливо на територіях із значним фізичним та хімічним забрудненням.

Рекомендаціями щодо зниження негативних наслідків можуть бути наступні:

- моніторинг та картографування забруднених територій для визначення найбільш уражених зон та подальшої пріоритизації заходів з очищення;

- застосування технологій рекультивації ґрунтів, включаючи фіторе mediaцію (використання рослин для вилучення токсичних ВМ), біоре mediaцію (мікроорганізмами), механічне видалення забрудненого шару ґрунту;

- обмеження використання забруднених земель для сільськогосподарських потреб до моменту очищення та відновлення;

- створення захисних лісосмуг та відновлення рослинного покриву для мінімізації ризиків розповсюдження токсичних речовин та покращення стану ґрунтів;

- подальші дослідження міграції забруднюючих речовин та їхнього впливу на екосистеми, що допоможе адаптувати стратегії відновлення.

Висновки

Техногенно-екологічна небезпека військових дій в Україні полягає у серйозному і тривалому впливі на ґрунти, що виражається у декількох аспектах. Забруднення родючого шару ґрунтів, руйнування їх структури та зміна гідрологічного режиму негативно впливають на довкілля, сільське господарство та соціально-економічну сферу. Військова техніка та бойові дії призводять до ущільнення ґрунту, зниження його вологості та руйнування його структури, що обмежує здатність рослин до адаптації та знижує родючість. Потужні пожежі, спричинені війною, також змінюють гідрологічний режим ґрунту, що негативно впливає на його родючість і екосистеми.

Отже основними джерелами саме ВМ у зонах бойових дій є:

- руйнування боєприпасів (Pb, Cu, Zn), оскільки набої та артилерійські снаряди виготовляються з використанням свинцю та міді, які додаються для підвищення маси та покращення аеродинамічних властивостей;
- згоряння військової техніки (Hg, Cd), за рахунок того, що техніка містить ртуть та кадмій у складі електронних компонентів, акумуляторів та інших пристроїв;
- вибухи снарядів і ракет (Ni, As), оскільки нікель та арсен використовують як стабілізатори та добавки для підвищення вибухової потужності.

Дослідження свідчать, що концентрація Pb у ґрунтах у зоні бойових дій в Харківському регіоні у 2,8 рази перевищує ГДК. Вміст Cu у зонах бойових дій у 7 з 10 ділянок перевищує ГДК, а середній вміст Cu становить 1,45 ГДК.

У своїх подальших дослідженнях ґрунтів Харківщини ми розширимо спектр проаналізованих ВМ, включаючи Fe, Cr, Ni, Mn та інші.

ЛІТЕРАТУРА

1. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region / O. Krainiuk et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. Vol. 34(2). P. 304–317. DOI: 10.15421/112526.
2. Degradation of ecosystems in the Kharkiv region during the war: satellite analysis / O. Krainiuk et al. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2024. Vol. 61. P. 329–343. DOI: 10.26565/2410-7360-2024-61-26.
3. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change / O. Bonchkovskiy, P. Ostapenko, A. Bonchkovskiy, V. Shvaiko. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 964. Art. 178594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178594.

4. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review / P. Broomandi, M. Guney, J. R. Kim, F. Karaca. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(21). Art. 9002. DOI: 10.3390/su12219002.
5. Dynamics of migration property of some heavy metals in soils in Kharkiv region under the influence of the pyrogenic factor / Y. Buts et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2019. Vol. 28(3). P. 409–416. DOI: 10.15421/111938.
6. Ecological Consequences of Environmental Pollution with Heavy Metals as a Result of the War in Ukraine / O. V. Krainiuk, Y. V. Buts, N. V. Didenko, V. V. Barbashyn. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2023. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520013.
7. Bai J., Zhao X. Ecological and human health risks of heavy metals in shooting range soils: A meta assessment from China. *Toxics*. 2020. Vol. 8(2). Art. 32. DOI: 10.3390/toxics8020032.
8. Assessment of the impact of armed aggression of the rf on the soil cover of Ukraine / S. A. Baliuk, A. V. Kucher, M. O. Solokha, V. B. Solovei. *Ukrainian Geographical Journal*. 2024. Vol. 1. P. 7–18. DOI: 10.15407/ugz2024.01.007.
9. Influence of technogenic loading of pyrogenic origin on the geochemical migration of heavy metal / Y. Buts, V. Asotskiy, O. Kraynyuk, R. Ponomarenko. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. Vol. 27(1). P. 43–50. DOI: 10.15421/111829.
10. Certini G., Scalenghe R., Woods W. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 127. P. 1–15. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2013.08.009.
11. Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils / O. Datsko et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25(11). P. 100–108. DOI: 10.12911/22998993/192669.
12. Belligerent landscape boundaries of Ukraine / H. Denysyk et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2025. Vol. 34(1). P. 32–40. DOI: 10.15421/112504.
13. Experience of developed countries in environmental safety policy Ukrainian / A. I. Krukov et al. *Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10(2). P. 190–194. DOI: 10.15421/2020_84.
14. Risks of Soil Pollution with Toxic Elements During Military Actions in Lviv / K. Petrushka et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25(1). P. 195–208. DOI: 10.12911/22998993/175136.
15. Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: A case study of the Chkalovsk territorial community / K. Smirnova et al. *Scientific Horizons*. 2024. Vol. 27(11). P. 90–104. DOI: 10.48077/scihor11.2024.90.
16. Yakymchuk A., Balanda O., Bzowska-Bakalarz M. Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management*. 2024. Vol. 196. P. 667–685. DOI: 10.29119/1641-3466.2024.196.45.

Buts Y., Krayniuk O., Ponomarenko R., Kahramanyan A., Barbashyn V.

TECHNOGENIC-ECOLOGICAL HAZARD OF THE IMPACT OF MILITARY ACTIONS ON THE LAND COVER OF THE KHARKIV REGION

The main aspects of the impact of hostilities on soils, including changes in the hydrological regime, pollution and destruction of soil structure, are considered. The article highlights the environmental hazards of military operations on the territory of Ukraine, analyzes the results of laboratory studies of soil samples taken in the Kharkiv region, which were affected by military operations, namely areas with burnt military equipment or areas after bombing and artillery shelling.

It has been confirmed that military operations lead to significant chemical contamination of soils with heavy metals due to explosions, combustion of military equipment, and leaks of industrial chemicals. This contamination negatively affects ecosystems by reducing soil fertility, disrupting plant growth, and accumulating toxic substances in the food chain, which poses risks to human health. The author emphasizes the need for further research and measures to clean up and restore contaminated soils to minimize the environmental consequences of the war.

The article examines the impact of hostilities in Ukraine in the period from 2022 to 2024 on chemical contamination of soils with heavy metals. The main sources of pollution are analyzed, including the destruction of ammunition, the combustion of military equipment, and the explosions of shells and missiles. The results of studies conducted in the Kharkiv region show that the content of lead, copper, and zinc in soils significantly exceeds background levels and maximum permissible concentrations. In particular, the average lead content in the areas of hostilities is 2.8 times higher than the MPC. The concentration of zinc is three times higher than background levels and 1.2...1.4 times higher than the MPC. The average content of copper is 1.45 MPC, exceeding the MPC in 7 out of 10 sites.

The article highlights the negative impact of chemical pollution on biodiversity, plant and animal health, as well as risks to human health due to bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in the food chain. The high coefficient of variation of heavy metal content in the soil samples indicates a significant unevenness of contamination, which requires further research to develop effective measures for cleaning and restoring contaminated soils.

Key words: technogenic and ecological hazard, military operations, Kharkiv region, soil cover, heavy metals.

REFERENCES

1. 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. DOI: 10.15421/112526.
2. Krainiuk, O., Buts, Y., Barbashyn, V., Nikitchenko, O., & Sukhov, V. (2024). Degradation of ecosystems in the Kharkiv region during the war: satellite analysis. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 61, 329–343. DOI: 10.26565/2410-7360-2024-61-26.
3. Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178594.
4. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: A Critical Review. *Sustainability*, 12(21), 9002. DOI: 10.3390/su12219002.
5. Buts, Y., Asotskiy, V., Kraynyuk, O., Ponomarenko, R., & Kovalev, P. (2019). Dynamics of migration property of some heavy metals in soils in Kharkiv region under the influence of the pyrogenic factor. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 409–416. DOI: 10.15421/111938.
6. 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. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520013.
7. Bai, J., & Zhao, X. (2020). Ecological and human health risks of heavy metals in shooting range soils: A meta assessment from China. *Toxics*, 8(2), 32. DOI: 10.3390/toxics8020032.
8. Baliuk, S. A., Kucher, A. V., Solokha, M. O., & Solovei, V. B. (2024). Assessment of the impact of armed aggression of the rf on the soil cover of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 7–18. DOI: 10.15407/ugz2024.01.007.

9. Buts, Y., Asotskyi, V., Kraynyuk, O., & Ponomarenko, R. (2018). Influence of technogenic loading of pyrogenic origin on the geochemical migration of heavy metal. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(1), 43–50. DOI: 10.15421/111829.
10. Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1–15. DOI: 10.1016/J.EARSCIREV.2013.08.009.
11. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., Ilchenko, V., & Solokha, M. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. DOI: 10.12911/22998993/192669.
12. Denysyk, H., Kanskyi, V., Ataman, L., Volovyk, V., & Denysyk, B. (2025). Belligerent landscape boundaries of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(1), 32–40. DOI: 10.15421/112504.
13. Krukov, A. I., Radchenko, O. V., Radchenko, O. O., Garmash, B. K., Biletska, Ye. S., Sysoieva, S. I., Stankevych, S. V., & Vynohradenko, S. O. (2020). Experience of developed countries in environmental safety policy Ukrainian. *Journal of Ecology*, 10(2), 190–194. DOI: 10.15421/2020_84.
14. Petrushka, K., Malovanyy, M., Skrzypczak, D., Chojnacka, K., & Warchol, J. (2024). Risks of Soil Pollution with Toxic Elements During Military Actions in Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 25(1), 195–208. DOI: 10.12911/22998993/175136.
15. Smirnova, K., Baliuk, S., Kucher, A., Vorotyntseva, L., & Honcharova, A. (2024). Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: A case study of the Chkalovsk territorial community. *Scientific Horizons*, 27(11), 90–104. DOI: 10.48077/scihor11.2024.90.
16. Yakymchuk, A., Balanda, O., & Bzowska-Bakalarz, M. (2024). Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management*, 196, 667–685. DOI: 10.29119/1641-3466.2024.196.45.