

УДК 631.41:504.05(477)

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.2\(47\).344755](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.2(47).344755)

В. І. Михайлюк, д-р геогр. наук, професор
Одеський державний аграрний університет
кафедра геодезії, землеустрою та земельного кадастру,
вул. Пантелеймонівська, 13, м. Одеса, 65012, Україна
mykhailiukv@osau.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8526-0802>

ПРОСТОРОВО-ГЕОХІМІЧНА СТРУКТУРА ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ В ЗОНАХ БОМБОВОЇ ЕРОЗІЇ ЯК РЕЗУЛЬТАТ ПІСЛЯВИБУХОВОГО ҐРУНТОУТВОРЕННЯ

У роботі проаналізовано просторово-геохімічну структуру ґрунтового покриття в зонах бомбової ерозії, утворених вибухами мін різних типів на півдні України. Розглянуто механізми перерозподілу хімічних елементів, взаємодію металів з органічною речовиною та визначено післявибухове ґрунтоутворення як новий тип антропогенно зумовленої трансформації ґрунтів.

Ключові слова: ґрунти зон воєнного впливу; бомбова ерозія ґрунту; післявибухове ґрунтоутворення; просторово-геохімічна неоднорідність; забруднення ґрунтів.

ВСТУП

Аналіз просторово-геохімічного розподілу хімічних елементів у ґрунтах, що зазнали впливу вибухів боєприпасів, потребує урахування не лише абсолютних концентрацій забруднювачів, які були раніше проаналізовані (Михайлюк, 2025), а й особливостей морфологічних та геохімічних трансформацій ґрунтового покриття. Після детонації відбувається формування складної тривимірної просторово-геохімічної структури ґрунту, у якій вертикальна стратифікація поєднується з горизонтальною анізотропією. Це зумовлено не лише хімічним впливом вибуху – привнесенням металів із корпусів боєприпасів і продуктів детонації, – але й бомбовою ерозією ґрунтів, що спричиняє інверсію горизонтів (бомботурбацією), переміщення ґрунтової маси та її розсіювання у просторі (Михайлюк, 2024).

Унаслідок бомбової ерозії формується кавернозний рельєф – система вирв, валів і мікровпадин, яка змінює морфологію поверхні та структуру ґрунтового покриття. Нижчі, менш гумусовані горизонти опиняються на поверхні, тоді як верхні частини профілю відкидаються далі від епіцентру вибуху. Така геометрична перебудова призводить до порушення природного вертикального градієнта концентрацій елементів і створює складну мозаїчну систему локальних аномалій. У центрі вирви зазвичай спостерігається зниження вмісту органічної речовини, тоді як у зоні осадження викинутої маси можуть формуватися ді-

лянки із підвищеним вмістом металів, навіть якщо епіцентр демонструє нижчі показники відносно контрольного фону. Це підкреслює необхідність тривимірного підходу до оцінювання забруднення, який охоплює як вертикальні, так і горизонтальні компоненти просторового розподілу.

Правильна оцінка стану ґрунтового середовища після вибухів боєприпасів можлива лише з урахуванням того, що бомбова ерозія ґрунтів є не лише механічним руйнуванням профілю, але й комплексним процесом просторового перерозподілу речовини та енергії, який формує нову геохімічну архітектуру ґрунтового покриву. Вона поєднує миттєве руйнування, змішування та осадження ґрунтових мас, зміну співвідношення компонентів ґрунту. Унаслідок цього геохімічні «шари» утворюються миттєво, без тривалого етапу ґрунтоутворення, і є продуктом вибухової енергії, а не природних ґрунтоутворюючих процесів.

Польові та лабораторні дослідження, проведені в зонах бойових дій показують виразну геохімічну гетерогенність із наявністю локалізованих аномалій вмісту хімічних елементів (Zn, Pb, Ni, Cd, As), які можуть становити потенційний екологічний ризик у середньо- та довгостроковій перспективі (Обстеження, 2023; Сироватко В. О. та ін., 2022; Сплодитель А. О., 2023; Тонха О. та ін., 2025; Namad et al., 2019). Дослідженнями на території Миколаївської області встановлено, що у вирвах від вибухів снарядів концентрації міді перевищували фоновий рівень у 8–80 разів, а кадмію – у кілька разів (Тонха О. та ін., 2025). Подібні локальні аномалії зафіксовані й у Сумській області, де вміст свинцю та ртуті у вибухових воронках у два–три рази перевищував фонові значення, тоді як кадмій і арсен у поодиноких випадках сягали 4–5-кратного перевищення гранично допустимих концентрацій (Samilyk, M., Synenko, T., 2025). Інші дослідження у цьому регіоні показали перевищення фонового вмісту свинцю і цинку у десятки разів, а міді і нікелю – у кілька разів. Ці спостереження підтверджують, що воєнне забруднення має чітко локалізований характер, формуючи «гарячі точки» у вирвах, на місцях згорілої техніки та вздовж ліній окопів (Сироватко В.О. та ін., 2022).

Особливої уваги заслуговує виявлене у Харківській області просторове зміщення максимумів забруднення: найбільші концентрації рухомих форм важких металів фіксувалися не в центрі вирви від 152-мм снаряда, а на відстані 40–50 м від епіцентру. Це ставить під сумнів поширене припущення про концентрацію забруднення лише у місці вибуху й підтверджує необхідність альтернативної стратегії відбору проб для відтворення реального просторового розподілу забруднювачів (Обстеження, 2023; Сплодитель А.О., 2023).

З огляду на зазначене, актуальним завданням є дослідження просторово-геохімічної структури ґрунтового покриву в зонах бомбової ерозії з урахуванням типу боєприпасів, морфології кратерів та властивостей ґрунтів.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Польовий етап ґрунтових досліджень проведений на правобережній частині Херсонської області у серпні 2023 р. Досліджені зони впливу вибухів протитанкових (ТМ-62) і протипіхотних (ПМН-2) мін – центр вирв, у якому відбирали одиничний зразок, стінки вирв і прилеглу територію на відстанях 1, 2 та 3,5 м (у великій вирві № 3 – на відстані 5–6 м) від центру; відбирали змішані кругові проби, сформовані з 6–8 одиничних зразків. Дослідження проведені: у межах ареалів темно-каштанових ґрунтів – вирви 1 (46°44'38,41"; 32°11'59,59") і № 2 (46°44'34,53"; 32°12'51,24"); лучно-каштанових ґрунтів – вирва № 3 (46°42'54,45"; 32°24'27,30"); чорноземів південних – вирва 6 (47°13'06,77"; 33°27'05,82"). Зразки для визначення контрольних фонових значень (КФЗ) відбирали на віддаленні 50–1185 м від вирв; КФЗ для вирв № 1 і № 2 визначені як середнє з трьох точок, розташованих поміж цими вирвами (табл. 1). Визначення валового вмісту хімічних елементів проведено за допомогою витяжки 1Н НСІ з подальшим аналізом на атомно-абсорбційному спектрофотометрі відповідно до МВВ 31-497058-016-2003.

Таблиця 1

Характеристика локацій відбору зразків ґрунту

Вирва №	Тип ґрунту	Тип боєприпасу	Розмір вирви (м)	Контрольні точки (відстань, м)	Примітка
1	Темно-каштановий слабогумусний важкосуглинковий	Одна міна ТМ-62	2,5Ч0,35	50, 1000, 1185	В зоні непрацюючої зрошувальної системи. Контрольна точка (КТ) 50 м і КТ 1106 м: 46°44'36,99" 32°11'59,48". КТ 1000 м і 120 м: 46°44'36,98" 32°12'46,73". КТ 1185 м і 937 м: 46°45'04,34" 32°12'40,81"
2	Темно-каштановий слабогумусний важкосуглинковий	Декілька мін ТМ-62	5,0Ч0,9	120, 1106, 937	
3	Каштаново-лучний малогумусний важкосуглинковий	Декілька мін ТМ-62	7,0Ч2,0	50	Днище балки Білозерка. КТ: 46°42'53,17" 32°24'25,80"
6	Чорнозем південний мало-гумусний важкосуглинковий	Декілька мін ПМН-2	0,7Ч0,25	778	Рівнинне плато. КТ: 47°13'29,41" 33°27'21,87"

Для кількісної оцінки просторового розподілу було розраховано індекс локалізації забруднення (I_L) як співвідношення між максимальною концентрацією елемента, зафіксованою в зоні вибуху (C_{max}), та контрольним фоновим значенням (КФЗ) для даної вирви.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

Детальний аналіз чотирьох вирв, утворених різними типами мін у межах темно-каштанових, лучно-каштанових ґрунтів і чорноземів південних, показав відсутність універсальної закономірності розподілу хімічних елементів після вибуху мін. У низці випадків спостерігався ефект розсіювання, коли інверсія горизонтів призводила до зниження концентрації елементів у зоні вибуху через відслонення глибинної, менш збагаченої елементами ґрунтової маси. Найбільш виразно цей процес проявився у вирві № 1, сформованій підривом міни ТМ-62 на темно-каштановому важкосуглинковому ґрунті. Концентрації свинцю, цинку, кадмію та арсену в центрі вирви були нижчими, ніж на контрольній ділянці, розташованій за 50 метрів. Це свідчить, що при невеликій кількості вибухових речовин основним механізмом є механічне перемішування без істотного хімічного привнесення (рис. 1, табл. 2).

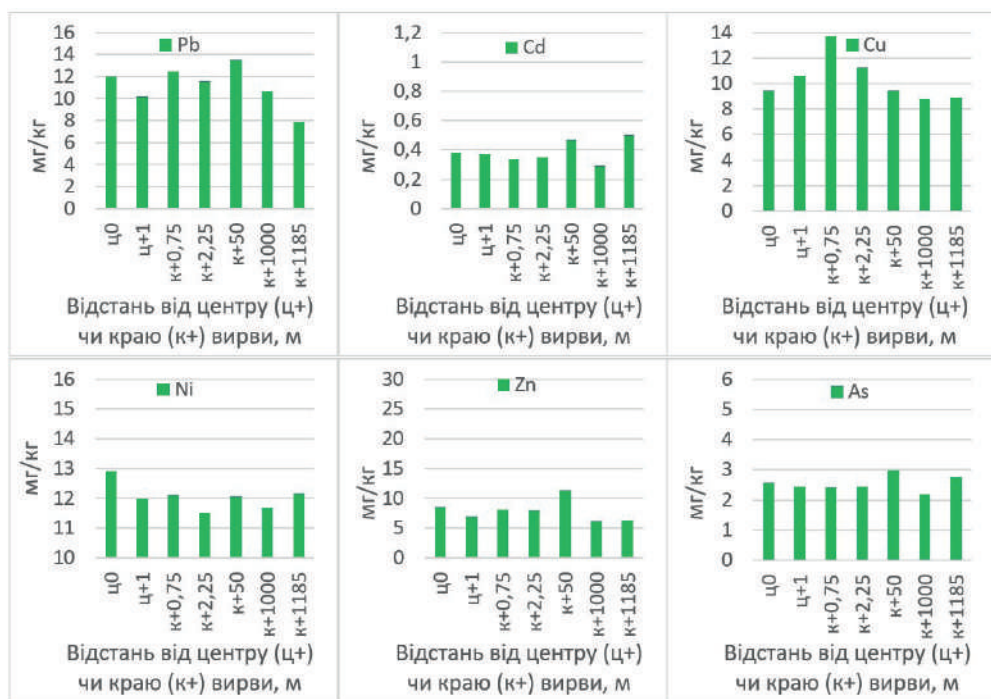


Рис. 1. Вміст хімічних елементів у ґрунті (0–15 см) в зоні вирви №1.

Разом із тим навіть у цій вирві зафіксовано локальні зони осідання продуктів вибуху, де концентрації міді і, в меншій мірі, свинцю були вищими за контрольні (КФЗ) значення. При цьому, максимальний локальний пік вмісту цих елементів зафіксовано не безпосередньо в епіцентрі, а на відстані близько метра від кромки вирви, що підтверджує гіпотезу про кільцеподібний характер осідання металевих частинок з детонаційної хмари.

Таблиця 2

Локалізація хімічних елементів в зоні вирви № 1

Елемент	Контрольне фонове значення (КФЗ), мг/кг	Максимальна концентрація в зоні вибуху (С _{max}), мг/кг	$I_L = C_{max} / \text{КФЗ}$	Точка максимуму у зоні впливу вибуху
Pb	10,68	12,46	1,17	0,75 м від краю вирви
Cd	0,42	0,38	0,90	Центр
Cu	9,04	13,75	1,52	0,75 м від краю вирви
Ni	11,97	12,92	1,08	Центр
Zn	7,91	8,56	1,08	Центр
As	2,64	2,57	0,97	Центр

Протилежна картина спостерігається у вирві № 2, сформованій підривом кількох мін ТМ-62 у приканальній зоні із порушеними ґрунтами і можливим у минулому підтопленням ґрунтів. Тут усі хімічні елементи продемонстрували значну локалізацію забруднення ($I_L > 1,25$). Максимальний індекс локалізації зафіксовано для Zn ($I_L = 3,54$) та Cd ($I_L = 2,71$), що свідчить про перевищення КФЗ у 3,5 та 2,7 рази відповідно (табл. 3). Центр вирви є точкою максимальної концентрації для Pb, Cd, Cu, As та Ni. Це свідчить, що хімічний вплив вибуху був посилений локальними умовами ґрунтоутворення і попередніми гідрологічними змінами. Близькість до зрошувального каналу призвела до формування глеюватих включень і підвищення вологості ґрунту, що могло як сприяти мобілізації металів, так і формувати хімічно активне середовище для їх акумуляції (рис. 2, табл. 3).

Зафіксована аномалія у вирві № 2 демонструє синергетичний вплив: вибух не тільки привніс метали з боєприпасів, але й підняв на поверхню вже існуючий забруднений матеріал з глибших горизонтів, де могли відкладатися метали внаслідок попереднього порушення (перемішування) ґрунтової маси і підтоплення. Цей результат підтверджує, що для коректної оцінки забруднення необхідно враховувати локальну історію землекористування. У багатьох випадках вибух є не первинною, а вторинною причиною, яка активує або виводить у поверхневу зону раніше сформовані геохімічні аномалії.

У вирві № 3, що сформувалася після вибуху кількох мін ТМ-62 на лучно-каштановому ґрунті делювіального походження, концентрації елементів демонстрували менш виразні, порівняно з вирвою № 2, відхилення від фону. Найбільш виражене перевищення КФЗ зафіксовано для Cu ($I_L = 1,32$) та Ni ($I_L = 1,31$). Для Cd, As та Zn максимальні значення у зоні вибуху виявилися нижчими за фонові. Зона найбільшої концентрації (Pb, Cu, Ni) розташована на стінках вирви. Тобто, незважаючи на значний розмір вирви і формування глибокого кавернозного профілю, механізм вибуху призвів до високого ступеня дисперсії

речовини, що запобігло локальній акумуляції металів. Це підтверджує, що потужність вибуху і фізична маса викиду впливають не тільки на морфологію, але й на характер хімічного профілю забруднення. У цьому контексті великі енерговитрати вибуху не обов’язково означають високий ризик забруднення, адже надмірна дисперсія може призвести до розсіювання токсикантів на великій площі без локального накопичення (рис. 3, табл. 4).

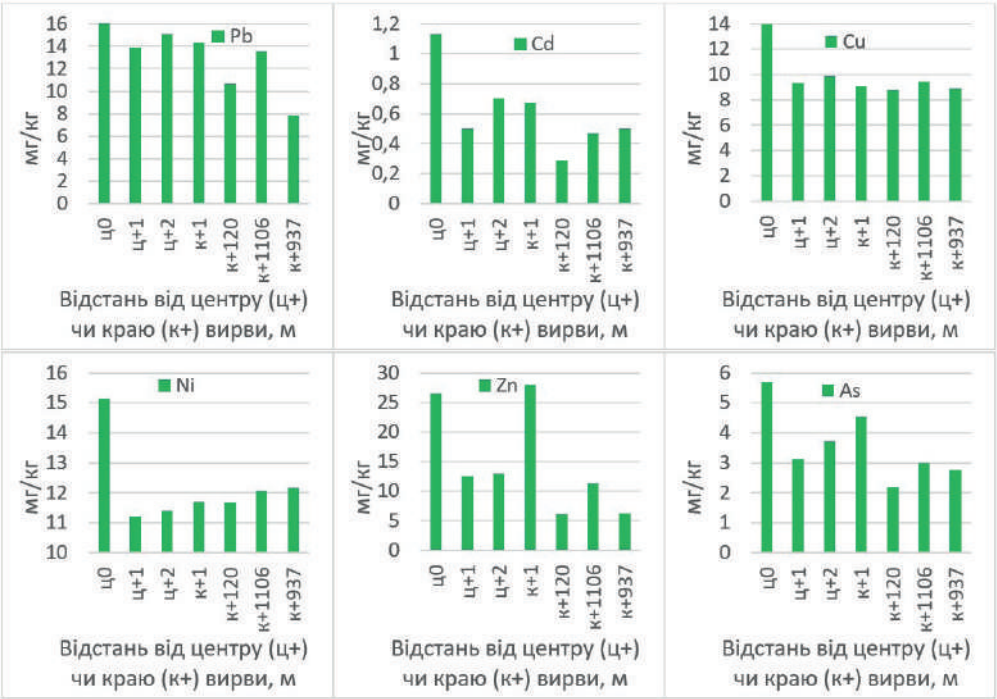


Рис. 2. Вміст хімічних елементів у ґрунті (0–15 см) в зоні вирви № 2.

Таблиця 3

Локалізація хімічних елементів в зоні вирви № 2

Елемент	Контрольне фонове значення (КФЗ), мг/кг	Максимальна концентрація в зоні вибуху (Сmax), мг/кг	$I_L = C_{max} / K_{ФЗ}$	Точка максимуму у зоні впливу вибуху
Pb	10,68	16,25	1,52	Центр
Cd	0,42	1,13	2,71	Центр
Cu	9,04	13,94	1,54	Центр
Ni	11,97	15,13	1,26	Центр
Zn	7,91	27,97	3,54	1 м від кромки
As	2,64	5,71	2,16	Центр

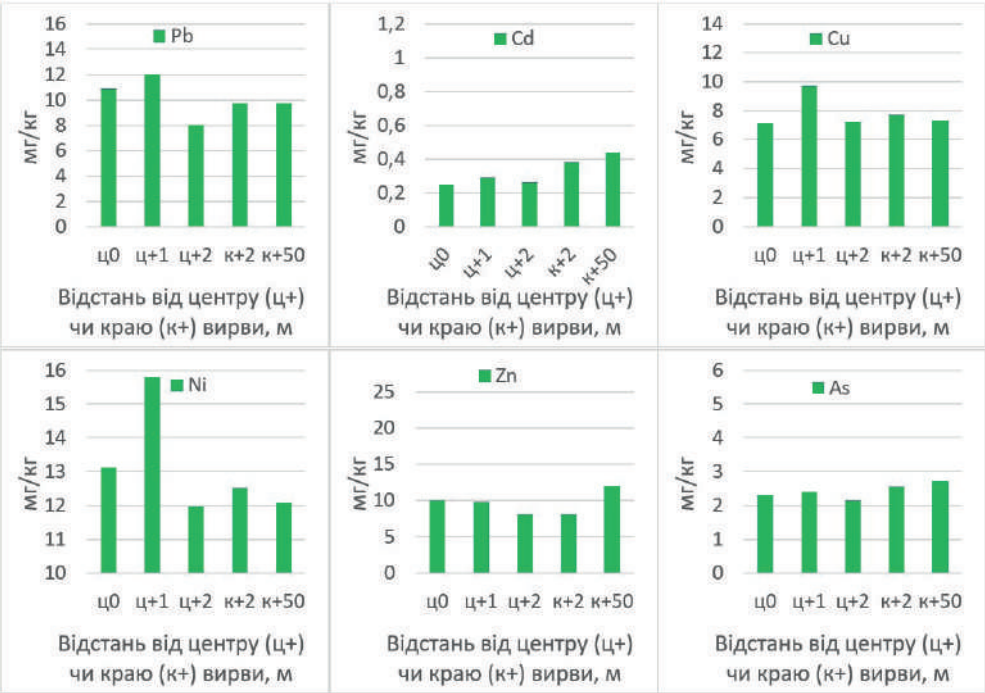


Рис. 3. Вміст хімічних елементів у ґрунті (0–15 см) в зоні вирви № 3.

Таблиця 4

Локалізація хімічних елементів в зоні вирви № 3

Елемент	Контрольне фонове значення (КФЗ), мг/кг	Максимальна концентрація в зоні вибуху (С _{тах}), мг/кг	$I_L = C_{\text{тах}} / \text{КФЗ}$	Точка максимуму у зоні впливу вибуху
Pb	9,72	12,02	1,24	1 м від центру
Cd	0,44	0,38	0,86	2 м від кромки
Cu	7,37	9,72	1,32	1 м від центру
Ni	12,07	15,81	1,31	1 м від центру
Zn	12,07	10,02	0,83	Центр
As	2,71	2,55	0,94	2 м від кромки

У вирві № 6, сформованій вибухом кількох протипіхотних мін ПМН-2, картина розподілу є протилежною: невеликий об’єм перемішаного ґрунту і обмежена дисперсія призвели до виразних локальних піків, зокрема для цинку, концентрація якого у центрі вирви перевищували контрольні значення майже вдвічі. Інші елементи демонструють меншу акумуляцію ($I_L \leq 1,35$). При цьо-

му максимальні концентрації елементів (Pb, Cd, Cu, As, Ni) розподілені між центром та зоною розкидання ґрунтової маси (0,6–3,2 м від кромки). Це демонструє залежність характеру забруднення від енергетики вибуху: чим менша дисперсія ґрунту, тим більша ймовірність локального накопичення металів у зоні вибуху (рис. 4, табл. 5).

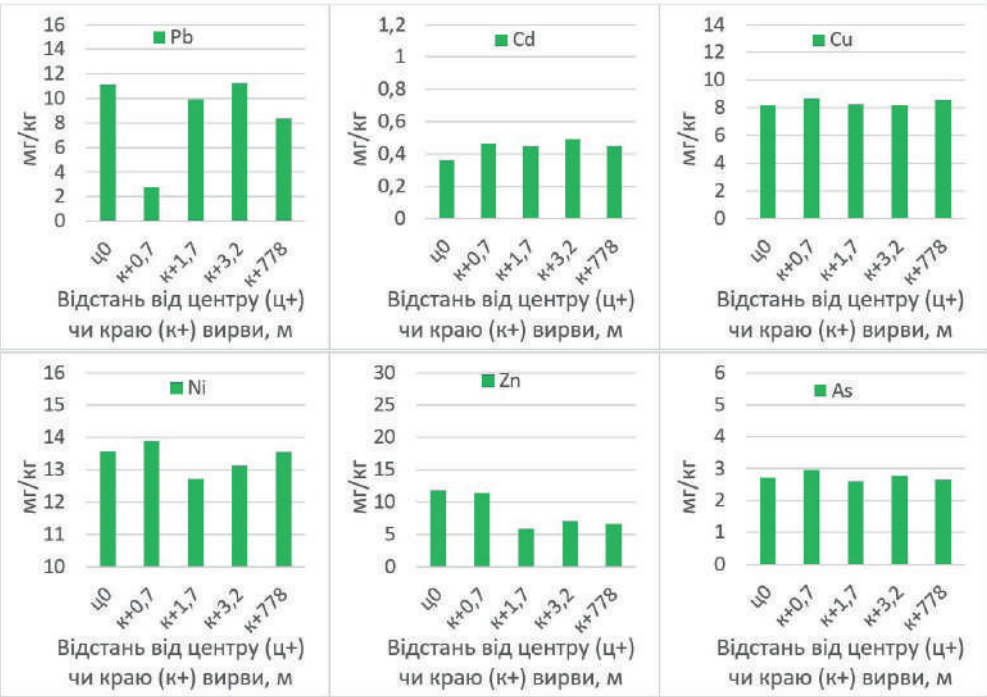


Рис. 4. Вміст хімічних елементів у ґрунті (0–15 см) в зоні вибуху № 6.

Таблиця 5

Локалізація хімічних елементів в зоні вибуху № 6

Елемент	Контрольне фонове значення (КФЗ), мг/кг	Максимальна концен- трація в зоні вибуху (Стах), мг/кг	$I_L = C_{\text{тах}} / \text{КФЗ}$	Точка максимуму у зоні впливу вибуху
Pb	8,35	11,23	1,35	3–3,2 м від кромки
Cd	0,45	0,49	1,09	3–3,2 м від кромки
Cu	8,56	8,70	1,02	0,6–0,7 м від кромки
Ni	13,56	13,88	1,02	0,6–0,7 м від кромки
Zn	6,67	11,84	1,77	Центр
As	2,65	2,96	1,12	0,6–0,7 м від кромки

Для оцінки загального взаємозв’язку між вмістом гумусу та концентрацією хімічних елементів, незалежно від вирви, було розраховано коефіцієнт кореляції Пірсона (r) на всьому масиві з 24 точок. Загальний взаємозв’язок є дуже слабким для всіх елементів (абсолютне значення r не перевищує 0,2). Спостерігається слабка негативна кореляція вмісту гумусу з Cd ($r = -0,19$), Zn ($r = -0,11$) та Pb ($r = -0,05$). Це означає, що, хоча зв’язок слабкий, підвищений вміст цих елементів частіше асоціюється з низьким вмістом гумусу. Також спостерігається слабка позитивна кореляція вмісту гумусу з Cu ($r = 0,19$) та As ($r = 0,15$).

Цей аналіз просторового зв’язку між вмістом органічної речовини та концентрацією хімічних елементів підтвердив, що у зоні вибуху часто спостерігається одночасне зниження органічної речовини ґрунту і підвищення концентрацій металів. Це не є наслідком сорбційної взаємодії, а відображає дію бомботурбації: інверсія горизонтів знижує вміст органічної речовини ґрунту у центрі вирви, тоді як забруднення елементами відбувається завдяки або хімічному привнесенню, або експонуванню геохімічно збагачених шарів. Це підтверджує, що органічна речовина не є домінуючим фактором у формуванні просторової структури забруднення після вибуху – ключову роль відіграє глибинна інверсія профілю (табл. 6, 7).

Таблиця 6

Вміст гумусу в центрі вирв порівняно з контролем

Вирва №	Вміст гумусу (КФЗ, %)	Вміст гумусу (центр вирви, %)	Зниження вмісту гумусу в центрі
1	3,09–3,28	2,32	Суттєве зниження
2	2,88–3,28	2,61	Суттєве зниження
3	3,96	1,93	Значне зниження (майже вдвічі)
6	4,05	4,14	Незначне зростання

Таблиця 7

Коефіцієнти кореляції між вмістом гумусу та концентраціями хімічних елементів у ґрунтах зон вибухів (N = 24)

Кореляція	Гумус / Pb	Гумус / Cd	Гумус / Cu	Гумус / As	Гумус / Ni
r	-0,05	-0,19	0,19	0,15	-0,01

Аналіз даних також демонструє, що органічна речовина ґрунту в окремих зонах вибуху може не виконувати захисної функції сорбційного бар’єра, оскільки її частка у вирві знижується внаслідок викидання ґрунтової маси. Це засвідчує, що бомбова ерозія трансформує саму основу ґрунтової геохімії, створюючи нові механізми взаємодії між горизонтами з різним вмістом органічної речовини ґрунту, різним окисно-відновним потенціалом, карбонатністю, різним мікроелементним складом тощо.

Таким чином, дослідження засвідчує, що хімічний вплив вибухів не може розглядатися у відриві від морфогенезу кавернозного (бомбового) рельєфу, локального перемішування ґрунтових горизонтів (бомботурбації) та розсіювання ґрунтової маси. Ці процеси, названі бомбовою ерозією, є окремою формою антропогенно зумовленої деградації ґрунтів, що поєднує риси ерозії, техногенного забруднення і механічної трансформації профілю.

Просторовий аналіз показує, що забруднення має концентричний або асиметричний характер, зумовлений комплексом факторів – силою вибуху, фізичними властивостями ґрунтів, від яких залежить морфологія вирви, а також особливостями попереднього ґрунтоутворення. У вирвах із вираженим валом викиду вторинний пік концентрацій металів може фіксуватися на відстані 0,5–1,5 м від кромки. У приканальних зонах вибух піднімає гідроморфно змінений матеріал, тому максимальні концентрації металів фіксуються як у зонах осідання, так і на відкритих вибухом поверхнях вирви.

Детонація мін і снарядів є потужним агентом перетворення ґрунтового покриву, що діє одночасно у вертикальному і горизонтальному вимірах. Вибухи формують кавернозний рельєф, створюючи тривимірну просторово-геохімічну структуру ґрунту, де взаємодіють вертикальні й горизонтальні градієнти хімічних елементів і органічної речовини. На відміну від класичної геохімічної стратифікації, що формується поступово, вибух створює локальні мікрозони різного складу – своєрідні імпульсні шари, які можуть виконувати функцію геохімічних бар'єрів, впливаючи на рухливість і доступність металів.

Бомбова ерозія створює нову систему, у межах якої взаємодіють матеріали різного віку й генезису. Формується мережа геохімічних мікродоменів – аралів із різним ступенем гумусованості та фізико-хімічними властивостями. Можна виокремити зони денудації (епіцентр), акумуляції (периферійний вал) і вторинної міграції. Ця тривимірна геохімічна структура є динамічною, процеси міграції та осадження в ній тривають тривалий час після вибуху.

Поствибухове ґрунтоутворення можна розглядати як імпульсний тип техногенного ґрунтоутворення, що супроводжується формуванням кавернозної морфології, тривимірної стратифікації та зміненої функціональної структури ґрунту.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтвердило, що детонація мін і снарядів є потужним фактором трансформації ґрунтового покриву, який діє одночасно у вертикальному й горизонтальному напрямках. У результаті вибухів формується кавернозний тип рельєфу і складна тривимірна просторово-геохімічна структура ґрунту, що визначає подальшу його еволюцію.

Хімічний ефект вибухів не має універсальної закономірності. У різних типах ґрунтів і за різних умов фіксуються як зони розсіювання, так і зони локальної акумуляції металів. У темно-каштанових ґрунтах і чорноземах південних

при незначній потужності вибуху домінує механічне переміщення гумусованої ґрунтової маси і її осідання поблизу вирви, що призводить до формування кількох піків незначного підвищення вмісту хімічних елементів – у центрі вирви і за межами її кромки. Вибухи великої потужності, що формують глибокі вирви з відслоненням слабогумусованих горизонтів, зумовлюють розсіювання токсикантів на значній площі без їх локального накопичення. Натомість у приканальних зонах на масивах зрошення (виведених зі зрошення) виявлено синергетичний ефект вибуху й попереднього техногенного впливу, що призводить до багатократного зростання вмісту Cd, Zn і Pb.

Встановлено, що бомбова ерозія ґрунтів є комплексним процесом, який поєднує механічне руйнування профілю, інверсію горизонтів, перенесення і розсіювання ґрунтових мас і локальне хімічне привнесення. Вона створює нову систему геохімічних «шарів» і мікрозон, які різняться за складом і функціями. Ці структури визначають короткочасну і середньострокову динаміку забруднення.

У зоні вибуху органічна речовина може втрачати функцію сорбційного бар'єра. Спостерігається слабка негативна кореляція між її вмістом і концентраціями Cd, Zn та Pb, що свідчить: підвищений уміст металів частіше відповідає знегумусованим ділянкам.

Післявибухове ґрунтоутворення слід розглядати як імпульсний тип ґрунтоутворення техногенного походження. Воно характеризується миттєвим формуванням нових горизонтів і контактних зон, у яких взаємодіють матеріали різного мінералогічного, сольового та органічного складу. Ці новостворені поверхні стають зонами концентрації або фіксації металів, що визначає подальшу стабільність забруднення. Воєнний вплив запускає довготривалий цикл геохімічних перетворень, що визначатиме якість ґрунтів протягом тривалого часу.

Для адекватної оцінки воєнно-техногенного забруднення ґрунтів необхідно перейти від точкових визначень концентрацій до просторово-динамічної діагностики ґрунтової системи. Вона має враховувати тривимірну просторово-геохімічну структуру ґрунтового покриву, сформовану вибуховим руйнуванням і трансформацією рельєфу, а також передвибухову історію ґрунтоутворення. Такий підхід забезпечить достовірне картування ризикових зон (гарячих точок) і розроблення ефективних стратегій рекультивації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської області / В. О. Сироватко, С. І. Жученко, С. А. Романова, О. М. Грищенко. *Сучасний стан ґрунтового покриву України в умовах збройної агресії російської федерації*: збірник тез Міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 20 жовт. 2022 р.). Харків: ННЦ «ІА імені О. Н. Соколовського», 2022. С. 131–135. URL: <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2024/12/zbirnyk-tez-1.pdf>

Михайлюк В. І. Хімічний склад ґрунтів вирв у зонах вибухів мін і снарядів: оцінка воєнно-техногенного забруднення. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2025. Т. 30, вип. 1(46). С. 107–121. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1\(46\).332359](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332359)

Михайлюк В. І. Особливості розподілу органічної речовини і елементів живлення при бомбовій ерозії ґрунтів. *Сучасні тенденції розвитку геодезії, землеустрою та природокористування*: збірник матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 13–14 черв. 2024 р.) / ОДАУ, Ф-т геодезії, землеустрою та агроінженерії.

Одеса, 2024. С. 13–18. URL: <https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf#page=13>

Обстеження ґрунтового покриття земельних ділянок, які зазнали впливу бойових дій на території Дергачівської територіальної громади Харківського району Харківської області. Технічний звіт з обстеження ґрунтового покриття земельних ділянок, які зазнали впливу бойових дій на території Дергачівської територіальної громади Харківського району Харківської області. Київ : ДУ «Держґрунтохорона», 2023. 79 с. URL: https://www.iogu.gov.ua/literature/tech_zvit/3.pdf

Оцінка рівнів забруднення ґрунтів півдня України, пошкоджених воєнними діями / О. Тонха, О. Меньшов, Д. Літвінов, К. Бондар, О. Глазунова, О. Літвінова, О. Піковська, В. Забалуєв. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2025. Вип. 1(108). С. 30–38. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04>

Сплодитель А. О. Методичні рекомендації з відбору проб ґрунту в зонах бойових дій. Київ – Чернівці : Друк Арт, 2023. 40 с.

Hamad R., Balzter H., Kolo K. Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. *Environ Sci Pollut Res*. 2019. Vol. 26. P. 1517–1536. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3597-3>

Samilyk M., Synenko T. Assessment of the impact of military actions on the safety of soil and agricultural products. *EUREKA: Life Sciences*. 2025. Vol. 2. P. 60–67. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2025.003879>

REFERENCES

Syrovatko, V. O., Zhuchenko, S. I., Romanova, S. A., & Hryshchenko, O. M. (2022). Vplyv boiovykh dii na vmist valovyykh form vazhkykh metaliv u gruntakh Sums'koho ta Okhtyrskoho raioniv Sums'koi oblasti [Influence of hostilities on the content of total forms of heavy metals in soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region]. *Suchasnyi stan ґruntovoho pokryvu Ukrainy v umovakh zbroinoi ahresii rosiiskoi federatsii* : zbirnyk tez Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Kharkiv, 20 zhovtnia 2022 r.) [Current state of the soil cover of Ukraine under the conditions of armed aggression of the Russian Federation: abstracts of the international scientific and practical conference (Kharkiv, October 20, 2022) (pp. 131–135). Kharkiv: NNTs “IHA imeni O. N. Sokolovskoho”. <https://zemlerobstvo.com/wp-content/uploads/2024/12/zbirnyk-tez-1.pdf> [in Ukrainian].

Mykhailiuk, V. I. (2025). Khimichniy sklad ґruntiv vyrv u zonakh vybukhiv min i snariadiv: otsinka voienno-tekhnogennoho zabrudnennia [Chemical composition of crater soils in mine and shell explosion zones: assessment of military-technogenic contamination]. *Odesa National University Herald. Geography and Geology*, 30(1(46)), 107–121. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1\(46\).332359](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332359) [in Ukrainian].

Mikhaiyliuk, V. I. (2024). Osoblyvosti rozpodilu orhanichnoi rechovyny i elementiv zhyvlyennia pry bombovii erozii ґruntiv [Distribution features of soil organic matter and nutrients under bomb-induced soil erosion]. *Suchasni tendentsii rozvytku heodezii, zemleustroi ta prurudokorystuvannia* : zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Odesa, 13–14 chervnia 2024 r.) [Modern trends in the development of geodesy, land management and nature use: proceedings of the international scientific and practical conference (Odesa, June 13–14, 2024) (pp. 13–18). Odesa. <https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf#page=13> [in Ukrainian].

Obstezhennia ґruntovoho pokryvu zemelnykh dilianok, yaki zaznali vplyvu boiovykh dii na terytorii Derhachivskoi terytorialnoi hromady Kharkivskoho raionu Kharkivskoi oblasti [Survey of soil cover of land plots affected by hostilities in the territory of Derhachi Territorial Community, Kharkiv District, Kharkiv Region]. (2023). *Tekhnichniy zvit z obstezhennia ґruntovoho pokryvu zemelnykh dilianok, yaki zaznali vplyvu boiovykh dii na terytorii Derhachivskoi terytorialnoi hromady Kharkivskoho raionu Kharkivskoi oblasti* (79 p.). Kyiv: DU “Derzhgruntookhorona”. https://www.iogu.gov.ua/literature/tech_zvit/3.pdf [in Ukrainian].

Tonkha, O., Menshov, O., Litvinov, D., Bondar, K., Hlazunova, O., Litvinova, O., Pikovska, O., & Zabaluiev, V. (2025). Otsinka rivniv zabrudnennia ґruntiv pivdnia Ukrainy, poshkodzhennykh voiennymi diiamy [Assessment of soil contamination levels in war-affected areas of southern Ukraine]. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, (1(108)), 30–38. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04> [in Ukrainian].

Splodytel, A. O. (2023). Metodychni rekomendatsii z vidboru prob ґruntu v zonakh boiovykh dii [Methodological recommendations for soil sampling in combat zones] (40 p.). Kyiv–Chernivtsi: Druk Art. [in Ukrainian].

Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2019). Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. *Environ Sci Pollut Res.*, 26, 1517–1536. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3597-3>

Samilyk, M., & Synenko, T. (2025). Assessment of the impact of military actions on the safety of soil and agricultural products. *EUREKA: Life Sciences*, 2, 60–67. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2025.003879>

Стаття надійшла 12.09.2025 р.

V. I. Mikhaylyuk

Odesa State Agrarian University

Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre

13 Panteleimonivska St, Odesa, 65012, Ukraine

mykhailiukv@osau.edu.ua

SPATIAL-GEOCHEMICAL STRUCTURE OF THE SOIL COVER IN BOMB EROSION ZONES AS A RESULT OF POST-BLAST PEDOGENESIS

Abstract

Problem Statement and Purpose. The full-scale war in Ukraine has led to extensive soil disturbance caused by explosions of mines and artillery shells, forming cratered landscapes that serve as unique microenvironments of geochemical transformation. Despite growing attention to war-induced soil contamination, the spatial organization and post-blast transformation of the soil profile remain poorly understood. Explosions act simultaneously as sources of chemical inputs from munitions and as powerful agents of mechanical disturbance that reshape soil morphology and redistribute its components. This interaction produces a phenomenon identified as bomb-induced soil erosion, which generates a complex three-dimensional spatial–geochemical structure characterized by vertical inversion of horizons, local metal enrichment, and heterogeneous distribution of soil organic matter (SOM). The purpose of this study is to analyze the spatial and geochemical structure of soils within mine craters formed by different types of explosives, to identify mechanisms of element redistribution under conditions of bomb-induced soil erosion, and to define the features of post-blast pedogenesis as a distinct anthropogenic process of soil transformation and secondary geochemical stratification.

Data & Methods. Field investigations were conducted in August 2023 in the right-bank part of the Kherson region, Ukraine, within areas affected by explosions of anti-tank (TM-62) and anti-personnel (PMN-2) mines. Soil samples were collected from crater centers (single samples) and from crater walls and adjacent areas at distances of 1, 2, and 3.5 m (up to 6 m for the large crater No. 3). Composite samples were formed by mixing 6–8 subsamples. Control (background) samples were taken 50–1185 m from the explosion sites. The study covered Calcic Kastanozems (craters 1 and 2), Gleyic Kastanozems (crater 3), and Calcic Chernozems (crater 6). Total concentrations of chemical elements were determined using 1 N HCl extraction followed by atomic absorption spectrophotometry in accordance with Ukrainian method MBB 31-497058-016-2003. The contamination localization index (I_L) was calculated as the ratio between the maximum element concentration in the impact zone (C_{max}) and the average background concentration (ABC) for each crater.

Results. Explosions of mines and shells act as powerful agents of soil transformation, producing a spatially complex and dynamically evolving geochemical system. The observed distributions of heavy metals demonstrate that even when total concentrations remain below regulatory limits, soils exhibit pronounced local heterogeneity caused by the interplay of mechanical disruption (bomboturbation), chemical inputs from detonation products, and pre-existing geochemical conditions. The immediate result of detonation is the formation of a cavernous microrelief – a system of craters, ejecta mounds, and microdepressions – that defines the new three-dimensional spatial – geochemical structure of the soil cover. Vertical inversion exposes deeper, less humified material, while lateral displacement forms concentric

or asymmetric patterns of enrichment and depletion. Consequently, metal maxima often occur not in the crater center but along the rim or in sedimentation zones, reflecting post-blast redistribution rather than direct contamination. Bomb-induced erosion creates an environment in which classical pedogenic organization is disrupted. Newly formed layers and lenses within the crater and ejecta contain materials of contrasting origin—mineral fragments, thermally altered aggregates, and partially combusted organic residues. These transient geochemical layers function as local geochemical barriers or traps that regulate the retention and mobility of pollutants. A weak negative correlation between SOM and Cd, Zn, and Pb concentrations indicates that organic matter is not the dominant sorption factor in post-blast soils. Its loss due to horizon inversion reduces the soil's buffering capacity, enhancing the potential for vertical or lateral metal migration. The highest ecological risk is therefore associated not with crater centers but with peripheral zones, where fine, metal-enriched material overlaps organic fragments, increasing bioavailability and mobility. Overall, bomb erosion generates a new type of three-dimensional spatial-geochemical organization – a heterogeneous system where vertical stratification and horizontal anisotropy interact. This post-blast pedogenesis produces dynamic microzones of enrichment and depletion that evolve over time, influencing the long-term ecological stability of war-affected landscapes.

Keywords: soils of war-affected areas, bomb erosion, post-blast pedogenesis, spatial-geochemical heterogeneity, soil contamination.