На вшанування світлої пам'яті
видатного вченого, ґрунтознавця,
доктора географічних наук, професора,
засновника кафедри
ґрунтознавства і географії ґрунтів
у Львівському національному
університеті імені Івана Франка,
Учителя і Наставника

Позняка Степана Павловича

«Цінуймо ґрунт – життя основу!»

Степан Позняк



Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

ГЕНЕЗА, ГЕОГРАФІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ ҐРУНТІВ

Збірник наукових праць
Всеукраїнської наукової конференції
«Українське ґрунтознавство: традиції, виклики та перспективи»,
присвяченої світлій пам’яті професора Степана Позняка
(Львів, 3-4 жовтня 2025 року)

Львів
Львівський національний університет імені Івана Франка
2025

УДК 631.4:502.521:911.3(06)(470+571-651.1:477)"20"

Друкується за ухвалою Вченої Ради географічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка (протокол № 8 від 22 жовтня 2025 року).

Г33 Генеза, географія та екологія ґрунтів. Збірник наукових праць Всеукраїнської наукової конференції «Українське ґрунтознавство: традиції, виклики та перспективи», присвяченої світлій пам'яті професора Степана Позняка (м. Львів, 3-4 жовтня 2025 року). Львів. 2025. Вип. 7. 252 с.

У збірнику опубліковані наукові праці, в яких висвітлено різні аспекти ґенези та географії ґрунтів, прикладного ґрунтознавства й охорони ґрунтів, воєнної деградації земель, стану землекористування та продовольчої безпеки в умовах воєнної агресії московії.

Подано статті науковців закладів вищої освіти та наукових установ Києва, Одеси, Ужгорода, Луцька, Івано-Франківська, Тернополя, Кам'янця-Подільського, Каунаса (Литва), Львова.

Відповідальний редактор: професор Зіновій Паньків.

Редакційна колегія: Паньків З. П., д-р геогр. наук, проф. (голова); Ямелинець Т. С., д-р геогр. наук, проф. (відповідальний секретар); Біланюк В. І., декан геогр. ф-ту; Яворська В. В., декан геол.-геогр. ф-ту ОНУ ім. І. І. Мечникова; Гончаренко Л. В., директор Департаменту агропром. розвитку ЛОВА; Стасів О. Ф., член-кор. НААН України, директор Ін-ту с.-г. Карпатського регіону України НААН; Демчишин А. М., директор Львівської філії ДУ «Інститут охорони ґрунтів України»; Кривульченко А. І., д-р геогр. наук, проф.; Кирильчук А. А., д-р геогр. наук, проф.; Папіш І. Я., д-р геогр. наук, проф.; Наконечний Ю. І., к. геогр. н., доц.; Телегуз О. Г., к. геогр. н., доц.

Тексти публікуються в авторській редакції. За науковий зміст і якість поданих матеріалів відповідають автори.

© Львівський національний університет імені Івана Франка, 2025
© Автори статей, 2025

УДК 631.459/.452:355.01(477)

БОМБОВА ЕРОЗІЯ ҐРУНТУ: ПРОСТОРОВІ ТА ГЛИБИННІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФІЗИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ

Віктор Михайлюк

Одеський державний аграрний університет;
факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Анотація. Проведені нами дослідження впливу детонації мін і снарядів на ґрунти виявили значну фізичну деградацію. Основний наслідок – глибока структурна деградація, що призводить до утворення щільних брил і «спікання» агрегатів. Вплив має чіткий просторовий градієнт і складний нелінійний глибинний характер, зумовлений бомботурбацією, сепарацією частинок та ущільненням. Запропонований індекс структурного спікання (ICC) виявився високоінформативним для оцінки цих змін. Результати важливі для оцінки масштабів пошкоджень і розробки ефективних проектів рекультивації земель в Україні.

Ключові слова: бомбова ерозія ґрунту, бомботурбація, фізична деградація ґрунтів, структура ґрунту, спікання ґрунту, рекультивація земель.

SOIL BOMB EROSION: SPATIAL AND DEPTH-DEPENDENT PATTERNS OF PHYSICAL DEGRADATION

Viktor Mikhaylyuk

Odesa State Agrarian University; Faculty of Geodesy,
Land Management and Agroengineering

Summary. Research on the impact of mine/shell detonation on soils revealed significant physical degradation. The primary effect is deep structural degradation, leading to the formation of dense clods and aggregate "sintering." The impact exhibits a clear spatial gradient and complex non-linear depth-dependent behavior, driven by bomboturbation, particle segregation, and compaction. The proposed aggregate sintering indices (ASI) proved highly informative for assessing these changes. The results are crucial for evaluating damage scale and developing effective land reclamation strategies in Ukraine.

Keywords: soil bomb erosion, bomboturbation, soil physical degradation, soil structure, soil sintering, land reclamation.

Актуальність теми дослідження. Детонація мін і снарядів спричиняє формування вирв і супроводжується руйнуванням ґрунтової структури, зміною щільності, пористості й агрегатного стану. Детальний аналіз впливу вибуху на фізичні властивості ґрунту дає змогу оцінити масштаби пошкоджень, спрогнозувати довгострокові екологічні наслідки та розробити цільові методи відновлення. Метою цього дослідження є з’ясування особливостей зміни гранулометричного

складу і структурного стану ґрунтів у випадку вибухів протитанкових (ТМ-62) і протипіхотних мін (ПМН-2) та артилерійських снарядів калібру 122/156 мм.

Стан вивчення питання. Вибухи мін і снарядів спричиняють значне руйнування та перерозподіл ґрунтового матеріалу, формуючи так званий «воєнний тип» деградації ґрунтів [1]. Цей процес, раніше названий «бомботурбацією», вилучає об'єм ґрунту з місця вибуху, формуючи вирву та розкидаючи більшість викинутого матеріалу у вигляді навколишнього валу, що складається зі змішаних, а іноді й частково відсортованих уламків [4]. Розмір і форма вирви залежать від низки факторів, зокрема маси вибухової речовини, глибини детонації, щільності ґрунту та його міцнісних характеристик. Бомботурбація передбачає змішування наявних ґрунтових горизонтів, що створює принципово новий ґрунтовий профіль на місці вибуху боєприпасу.

Наші дослідження виявили, що бомботурбація є другорядним наслідком вибухів. Основним є так звана «бомбова ерозія» – вибухове зрізання певного об'єму ґрунту з утворенням каверни (кавернозного рельєфу) з переміщенням і розсіюванням ґрунтової маси [2]. У вирвах відслонюються глибші ґрунтові горизонти з меншим вмістом органічної речовини і рухомого фосфору й обмінного калію, нижчою нітрифікаційною здатністю. Вирви і кільцевий вал навколо з викинути ґрунтом мають ознаки так званих «гранично-структурних елементів», перетворюючи гомогенні елементарні ґрунтові ареали в спорадично-плямисті.

Вибухи внаслідок механічного удару, різких змін тиску та термічного впливу є потужним чинником руйнування ґрунтових агрегатів. Детонація мін і снарядів генерує надзвичайно високі температури, що може призвести до мінералогічних змін у ґрунті, зокрема розкладання глинистих мінералів за температур понад 550°C, і вплинути на агрегацію й цементацію глинистих та інших частинок [6]. Помітні зміни агрегатного стану, в тім числі плавлення органо-мінеральних частинок і формування кірок, простежуються при дослідженні ґрунтів після пожеж [5]. Механічні моделювання вибухів, проведені у лабораторних умовах, засвідчують, що вибух формує брили з грубших фракцій; інтенсивність і характер цих змін залежать від початкового гранулометричного складу ґрунту

[3]. Зокрема, суглинкові ґрунти формують вузькі, глибокі кратери з крутими стінками та великою периферією, тоді як піщані – широкі та малогорбисті.

Методика дослідження. Гранулометричний і структурний склад (методом сухого просіювання) ми визначили у ґрунтах вирв, утворених вибухами артилерійських снарядів калібру 122/152 мм, а також протитанкових (ТМ-62) і протипіхотних (ПМН-2) мін під час бойових дій в осінній період 2022 року (локації 2, 8) і розмінування території шляхом підриву мін (локації 1, 3, 6) у літній період 2023 року. Зразки ґрунту відбирали в центрі вирви, а також на відстані 1, 2 і 3,5 м від центру вирви. На локації 3 через великий діаметр вирви відбір здійснювали на відстані 1, 2, і 5-6 м від центру. У центрі кожної вирви відбирали одиничний зразок із шару ґрунту 0-15 см, а інші зразки, які відбирали в шарі 0-15, 15-30 і 30-45 см, складалися із 6-8 одиничних зразків; їх відбирали по колу на відповідній відстані. Окремо на відстані 50-750 м від вирв відбирали змішані зразки ґрунту на контрольних ділянках, які не зазнали впливу бойових засобів.

Таблиця 1

Характеристика локацій відбору зразків ґрунту

№ вирви	UTM: пн.ш.; сх.д.	Розміри вирви (діаметр × глибина, м); вид боєприпасу; строк відбору зразків – серпень 2023 р.
1*	46º44′38,41″; 32º11′59,59″	2,5×0,35; ТМ-62; біля 1-2 місяців після підриву
2	46º44′34,91″; 32º12′51,48″	5×0,9; декілька ТМ-62; біля 10 місяців після підриву
3	46º42′54,45″; 32º24′27,30″	7×2; декілька ТМ-62; біля 1-2 місяців після підриву
6	47º13′06,77″; 33º27′05,82″	0,7×0,25; декілька ПМН-2; біля 1 місяця після підриву
8	46º45′03,13″; 32º12′42,43″	3,5×1,1; артилерійський снаряд, калібру 122 чи 156 мм; біля 10 місяців після вибуху

*№ 1, 2, 8: Рівнинне слабостічне плато. Переліг у межах нефункціонуючої зрошувальної системи. Ґрунт – темно-каштановий залишково-солонцюватий слабогумусний важкосуглинковий на лесі. Вирва № 2 розташована на відстані 14 м від зрошувального каналу, у зоні з ознаками порушення будови ґрунтів;
№ 3: Днище балки Білозерки, рілля. Ґрунт – каштаново-лучний малогумусний важкосуглинковий на делювіальному суглинку;
№ 6: Рівнинне плато. Ґрунт – чорнозем південний малогумусний важкосуглинковий на лесі.

Для кількісної оцінки впливу вибуху на структуру ґрунту ми використали та проаналізували такі стандартні індекси: коефіцієнт структурної деструкції (КСД), як співвідношення брилуватих (>10 мм) і пилуватих агрегатів (≤0,25 мм) до агрономічно цінних (0,25–10 мм); коефіцієнт грудкуватості (Кгруд), як

відношення брилуватої фракції (>10 мм) до всієї маси ґрунту; структурність, як відсоток агрономічно-цінних агрегатів (0,25–10 мм) до усіх фракцій.

З огляду на різке збільшення брилуватої фракції та зменшення фракції <0,25 мм, агрономічні індекси можуть бути малоінформативними для повного розуміння змін. Ми запропонували індекс для кількісної оцінки «укрупнення» структури ґрунту, яке може бути спричинене термічним спіканням і тиском, – індекс структурного спікання агрегатів (ІСС), який був розрахований у двох варіантах: індекс структурного спікання агрегатів <3 мм ($ІСС_{<3}$), що вимірює відношення дуже великих агрегатів (>10 мм) до суми агрегатів, менших за 3 мм: ІСС<3 = (А>10 / А<3) × 100%; індекс структурного спікання агрегатів <0,25 мм ($ІСС_{<0,25}$), що вимірює відношення дуже великих агрегатів (>10 мм) до суми дуже дрібних агрегатів (<0,25 мм): ІСС<0,25 = (А>10 / А<0,25) × 100%.

Виклад основного матеріалу. Отримані дані засвідчують, що вибухи протитанкових мін можуть спричиняти зміни в гранулометричному складі ґрунту, хоча ці зміни є локалізованими та залежать від початкових умов ґрунту. Загалом отримані дані свідчать, що вибухи мін не мають суттєвого впливу на гранулометричний склад ґрунтів, хоча й зумовлюють певні зміни у співвідношенні фракцій піску, пилу та глини. Характер цих змін може варіювати залежно від початкового стану ґрунту, зокрема за наявності попередніх антропогенних порушень. Так, на ділянці, де будівництво зрошувального каналу істотно трансформувало гранулометричний склад (вирва № 2), зафіксовані відмінності були зумовлені саме цими попередніми змінами.

Основний вплив детонації мін і снарядів проявляється у зміні агрегації та зв’язуванні наявних частинок ґрунту. При цьому цей вплив на фізичні властивості ґрунту демонструє чіткий просторовий градієнт, що проявляється у зміні фракційного складу агрегатів та інтегральних структурних показників.

Аналіз даних виявляє різноманітні та складні зміни в структурі ґрунту залежно від локації і відстані від епіцентру вибуху: у центрі вирв № 1, 3, 6 (ТМ-62 і ПМН-2) простежується різке збільшення частки найбільших агрегатів (>10 мм) і водночас значне зменшення частки дрібних агрегатів (≤0,25 мм); у вирві № 3

(лучно-каштановий ґрунт, ТМ-62) частка фракції >10 мм у центрі становить 82,7% (порівняно з 19,8% у контролі), а фракція ≤0,25 мм зменшується до 0,8% (з 16,4% у контролі). Це найяскравіший прояв процесу «спікання» або агломерації дрібних частинок у більші структури; аналогічні, але дещо менш виражені тенденції простежуються у вирві № 1 (темно-каштановий ґрунт, ТМ-62), де фракція >10 мм у центрі зростає до 59,7% (з 22,9% у контролі), а ≤0,25 мм зменшується до 1,3% (з 11,0%); у вирві № 6 (чорнозем південний, ПМН-2) також фіксується значне зростання фракції >10 мм до 79,0% у центрі (з 32,8% на контролі) та зменшення ≤0,25 мм до 0,7% (з 5,5%) – рис. 2, 3.

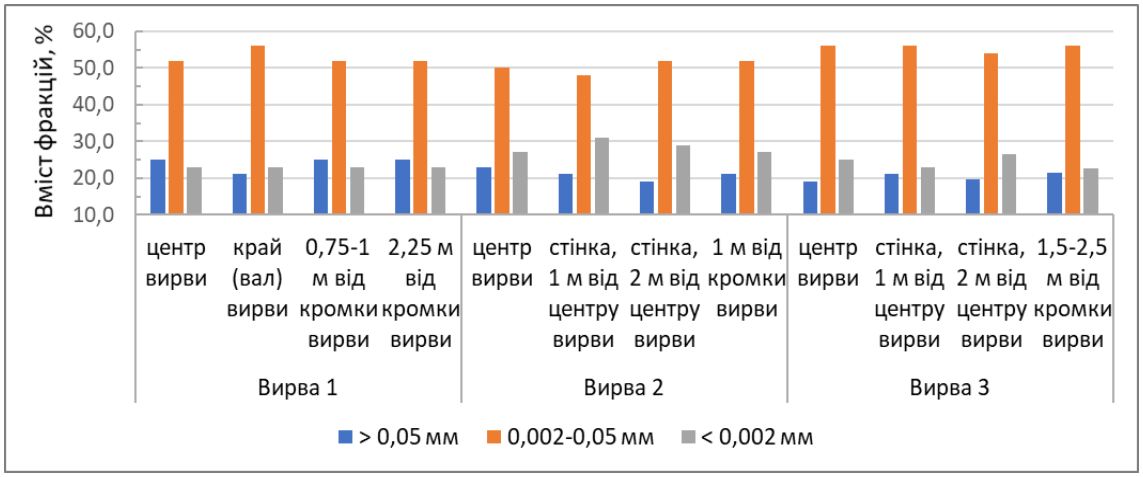


Рис. 1. Гранулометричний склад ґрунтів у вирвах, утворених підривом протитанкових мін ТМ-62.

У центрі вирви № 8 (артилерійський снаряд, темно-каштановий ґрунт) частка фракції >10 мм (32,9%) практично відповідає контролю (33,9%), а фракція ≤0,25 мм (2,7%) є помітно меншою (5,1% у контролі). Натомість на стінці цієї вирви (1 м від центру) зафіксовано суттєве зростання частки >10 мм до 58,1% (у контролі – 33,9%) та різке зменшення ≤0,25 мм до 1,0%. Ці дані підтверджують, що детонація мін призводить до утворення великих щільних брил і втрати дрібних агрономічно цінних агрегатів. Виявлене спікання ґрунту є нестійким, що підтверджує структурний стан ґрунту у вирвах № 2 і №8, утворених до початку вегетаційного періоду 2023 р. і зарослих бур'янами як і прилегла територія.

У центрі вирви № 2 частка фракції >10 мм (29,6%) є нижчою, ніж у контролі (35,9%). Водночас вміст агрономічно цінних фракцій, зокрема 2–1 мм (17,5% проти 9,6% у контролі) та 1-0,5 мм (6,7% проти 5,8%), є вищим. Такі

співвідношення свідчать про виразну фрагментацію ґрунту на дрібніші, але все ще агрономічно цінні агрегати.

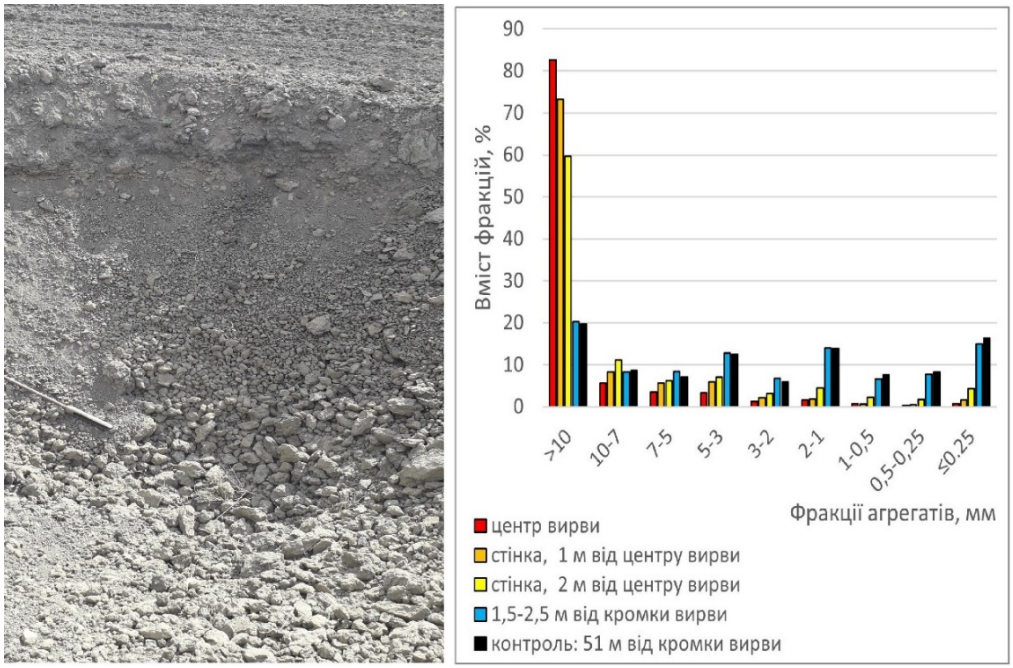


Рис. 2. Вміст фракцій повітряно-сухих агрегатів у поверхневому шарі (0-15 см) ґрунту вирви № 3 порівняно з контрольною ділянкою.

Детальний аналіз фракційного складу агрегатів підтверджує, що вплив вибуху на структуру ґрунту є багатогранним і залежить від типу боєприпасу, часу утворення вирви та погодних умов, властивостей ґрунту та попередніх антропогенних порушень. Основним механізмом у випадку підриву боєприпасу є утворення великих брил і «спікання» дрібних частинок, однак надалі простежується фрагментація на менші агрегати. Найбільші зміни від детонації боєприпасу відбуваються в центрі вирви, де показники структурної деструкції (КСД, Кгруд) зростають у 8,3 та 24 рази, відповідно, а структурність знижується на 74 % порівняно з контрольною ділянкою (табл. 2). Одночасне різке зростання КСД та Кгруд поряд із різким зниженням структурності в центрі вирви та на її стінці свідчить про серйозну деградацію структури ґрунту.

Особливо вираженим є зміщення від агрономічно цінних агрегатів до великих грудок і «спечених» структур, що підтверджується надзвичайно високими значеннями $ICC_{<3}$ та $ICC_{<0,25}$ у центрі вирви. Ґрунт перетворюється з добре агрегованого стану на грубобрилуватий, фрагментований і водночас на

масу з практично відсутніми мікроагрегатами. З віддаленням від центру вирви вплив поступово зменшується. На відстані 1 м від центру зміни менш виражені, ніж у самому центрі. На відстані 1,5–2,5 м від кромки вирви показники ґрунту наближаються до контрольних значень, що свідчить про обмежений радіус безпосереднього впливу вибуху на макроструктуру ґрунту.

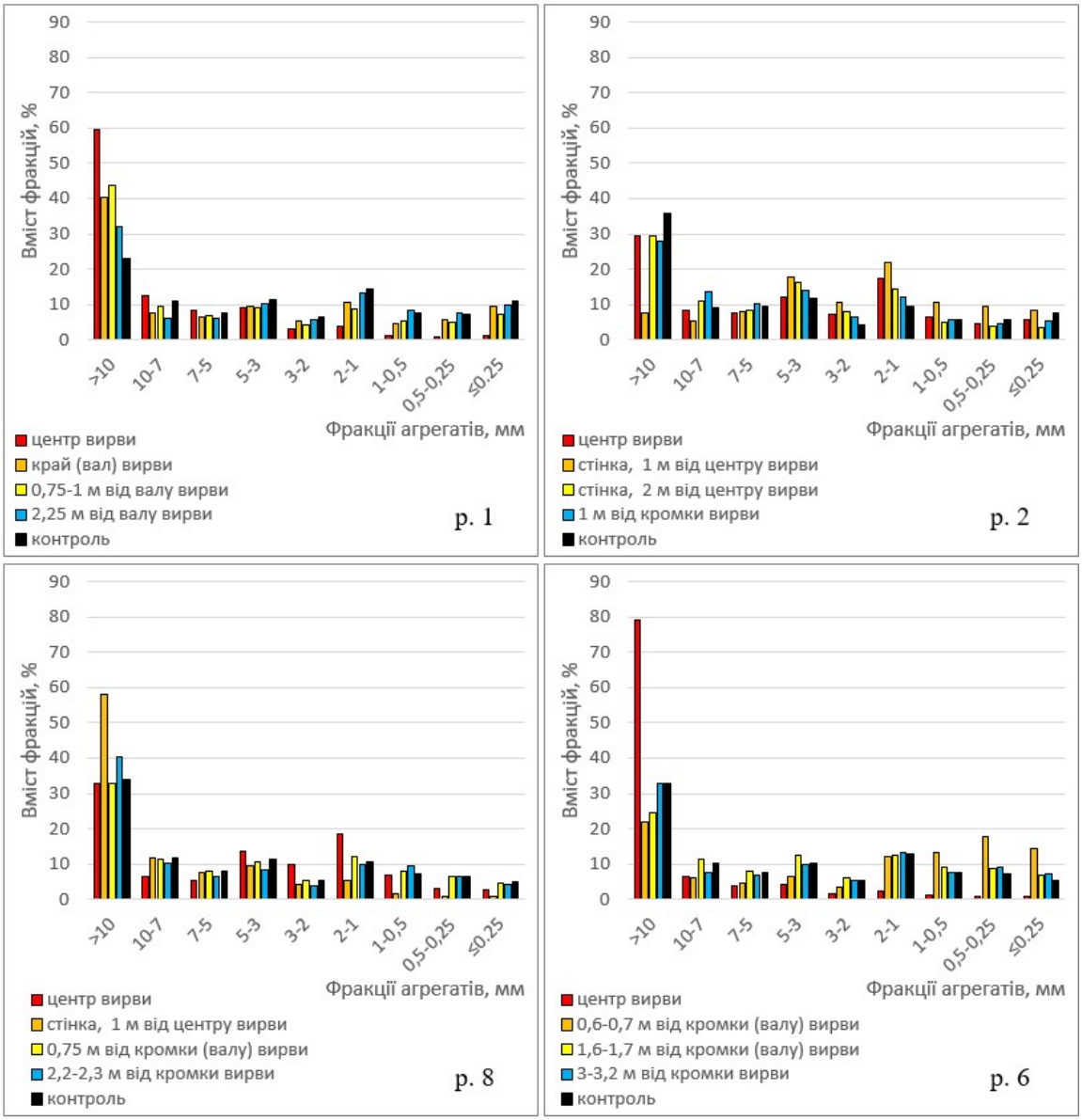


Рис. 3. Вміст фракцій повітряно-сухих агрегатів у поверхневому шарі (0-15 см) ґрунту вирв № 1, 2, 6, 8 порівняно з контрольними ділянками.

Аналіз розподілу фракцій повітряно-сухих агрегатів за глибиною виявляє складні нелінійні закономірності поширення вибухової енергії, що відрізняються від простого загасання з глибиною. Це вказує на те, що підповерхневий вплив є дуже неоднорідним і залежить від конкретного профілю. Так, у «свіжій» вирві

№ 3 на відстані 1 м від центру вирви фракція >10 мм становить 73,2% у шарі 0–15 см, що є дуже високим показником. Вона зменшується до 34,3% у шарі 15–30 см, а потім знову зростає до 65,7% у шарі 30–45 см. На відстані 2 м від центру вирви фракція >10 мм становить 59,7% у шарі 0–15 см, зменшується до 41,4% у шарі 15–30 см і значно знижується до 18,2% у шарі 30–45 см, наближаючись до контрольних значень (19,8% у контролі 0-15 см). Частка дрібних агрегатів (≤0,25 мм) також зростає з глибиною (з 4,3% у 0–15 см до 11,5% у 30–45 см), що вказує на зменшення ефекту «спікання» та наближення до природного розподілу. Для порівняння, на контрольній ділянці вирви № 3 (51 м від кромки вирви) розподіл агрегатів все ще відносно стабільний за глибиною, без таких різких коливань.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз впливу підриву міни на основні структурні показники ґрунту у вирві № 3 (шар 0-15 см, порівняно з контролем)

Показник	Центр вирви	Стінка вирви, 1 м від центру	Стінка вирви, 2 м від центру	1,5–2,5 м від кромки вирви
КСД	Збільшення у 8,3 раза	Збільшення у 5,0 разів	Збільшення у 3,0 рази	Зменшення у 1,2 раза
Кгруд	Збільшення у 24,0 рази	Збільшення у 13,5 раза	Збільшення у 7,5 раза	Збільшення у 1,5 раза
Структурність	Зменшення на 74,0%	Зменшення на 60,7%	Зменшення на 43,8%	Збільшення на 1,4%
$ICC_{<3}$	Збільшення у 43,0 рази	Збільшення у 27,3 раза	Збільшення у 9,5 раза	Без змін
$ICC_{<0,25}$	Збільшення у 86,2 раза	Збільшення у 38,2 раза	Збільшення у 11,6 раза	Збільшення у 1,2 раза

Нелінійні глибинні профілі розподілу агрегатів у великих вирвах (зокрема у вирві № 3), які найвиразніше демонструють негативний вплив на фізичні властивості ґрунтів, можуть бути зумовлені кількома взаємодіючими механізмами.

1. Вертикальне перемішування й інверсія ґрунтових горизонтів (бомботурбація): одночасний вибух кількох мін ТМ-62, що утворив вирву діаметром 7 м і глибиною 2 м, призвів до значного викиду та перемішування ґрунтового матеріалу; процес супроводжується винесенням на поверхню матеріалу з нижніх слабогумусованих горизонтів, що містять гловно великі та щільні агрегати, а також частин материнської породи з подальшим перерозподілом їх у вирві та прилеглій зоні. Отож крупні агрегати на поверхні та на глибині 30-45 см можуть бути результатом підняття та перевідкладення матеріалу з глибших шарів (табл.3).

Таблиця 3

Вміст фракцій повітряно-сухих агрегатів на різних глибинах і відстанях від центру вирви № 3

Відстань від центру вирви	Глибина, см	Вміст фракцій агрегатів, % за відповідним розміром, мм								
		>10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	≤0,25
Стінка вирви, 1 м від центру	0–15	73,2	8,3	5,7	6,0	2,1	1,9	0,6	0,5	1,6
	15–30	34,3	10,4	8,6	12,4	5,3	11,4	5,1	4,8	7,7
	30–45	65,7	9,8	6,8	3,2	7,4	3,9	1,3	0,9	1,0
Стінка вирви, 2 м від центру	0–15	59,7	11,1	6,2	7,1	3,2	4,4	2,2	1,7	4,3
	15–30	41,4	11,2	7,2	9,5	5,6	9,5	4,8	4,0	6,8
	30–45	18,2	10,7	8,2	13,4	7,2	15,4	7,0	8,4	11,5
1,5–2,5 м від кромки вирви	0–15	20,3	8,3	8,4	12,8	6,8	14,0	6,7	7,7	15,0
	15–30	20,6	7,1	6,9	14,2	7,4	16,3	8,7	8,1	10,7
	30–45	19,7	6,0	7,2	15,1	8,3	16,9	9,0	7,8	10,0
Контроль, 51 м від кромки вирви	0–15	19,8	8,7	7,0	12,5	5,9	13,9	7,6	8,3	16,4
	15–30	16,0	8,7	6,0	12,9	7,7	15,6	9,7	9,2	14,1
	30–45	20,8	9,5	9,6	17,0	8,4	14,0	5,8	6,1	8,7

2. Під час формування вирви та подальшого осипання ґрунту по її стінках відбувається природна сепарація частинок, їх гравітаційна диференціація. Більші, важчі фракції (крупні агрегати) можуть осипатися та накопичуватися в центрі або в нижніх частинах вирви, водночас дрібніші агрегати можуть просіюватися вниз чи виноситися з зони відбору проб. Це може пояснити зменшення дрібних агрегатів у центрі вирви та їхній відносно низький вміст на певних глибинах.

3. Ущільнення або агломерація, зумовлена тиском: концентровані хвилі напруги від вибуху можуть спричинити ущільнення чи агломерацію частинок на цих конкретних глибинах. Вибухова дія може спричинити значне ущільнення у вологих ґрунтах, що зумовлює збільшення щільності. Хоча ґрунт був сухим під час відбору проб, початкова висока вологість нижніх горизонтів лучного ґрунту (внаслідок капілярного підняття) могла сприяти ефективнішій передачі ударної хвилі й ущільненню.

4. Швидке температурне висихання й агломерація: спостереження сухих крупних агрегатів у центрі вирви та по валу, незважаючи на ймовірне початкове зволоження ґрунту, підтверджує, що інтенсивне тепло від вибуху спричинило швидке випаровування вологи та подальше зв’язування частинок.

5. Походження крупних агрегатів з нижніх горизонтів: той факт, що крупні агрегати є ґрунтовим матеріалом з нижніх, менш гумусованих горизонтів , вказує на інтенсивне вертикальне перемішування (бомботурбацію) ґрунту внаслідок вибуху. Це зумовлює інверсію ґрунтових шарів і винесення на поверхню матеріалу з глибин, що має інший агрегатний склад та властивості.

Отже, збереження відносно стабільного гранулометричного складу в ґрунтах, непорушених до початку воєнних дій, попри істотні зміни в агрегатній структурі, є одним із ключових висновків дослідження. Це свідчить, що детонація протитанкових мін і артилерійських снарядів впливає насамперед на просторове розташування і зв'язування наявних частинок ґрунту, тобто на процеси агрегації і підтримання структурної цілісності, а не на їх розпад на дрібніші компоненти.

Висновки. Проведене дослідження впливу підриву мін на фізичні властивості ґрунтів виявило значні та багатогранні зміни, що мають серйозні наслідки для функціональності ґрунту.

1. Основний вплив вибуху полягає у глибокій фізичній деградації ґрунту, що проявляється у руйнуванні його структури, а саме в значному збільшенні грубобрилуватої фракції (>10 мм) та зменшенні мікроструктури (≤0,25 мм), що свідчить про інтенсивну агломерацію ґрунтової маси. Вона може бути зумовлена швидким температурним висиханням ґрунту (спіканням), ущільненням під впливом ударної хвилі детонації, а також результатом підняття та перемішування ґрунту з глибших горизонтів (бомботурбацією). Структурні зміни у вирвах, що сформувалися в осінньо-зимовий період, характеризуються складнішою динамікою, зумовленою поєднанням первинного впливу вибуху та подальших трансформацій ґрунтової структури. Зокрема, упродовж тривалого часу відбувався розпад грубобрилуватої структури на агрономічно цінні агрегати. Гранулометричний склад ґрунту (вміст піску, пилу, мулу) залишається відносно стабільним, що підтверджує, що вибух переважно впливає на агрегацію та зв'язування частинок, а не на їхній розмір чи мінеральний склад.

2. Вплив вибуху має виражений просторовий градієнт: від повного руйнування структури в центрі вирви до поступового наближення до контрольних значень на відстані 1,5–2,5 м від її кромки. Це проявляється в різкому збільшенні брилуватої фракції (>10 мм) і водночас зниженні вмісту дрібних агрегатів (≤0,25 мм) у центрі вирви, що підтверджується як прямими вимірами фракцій, так і інтегральними показниками.

3. Запропоновані індекси структурного спікання агрегатів ($ICC_{<3}$, $ICC_{<0,25}$) виявилися надзвичайно інформативними. Їхні високі значення у центрі вирви вказують на швидке температурне висихання (спікання) та подальшу агломерацію дрібних ґрунтових частинок у більші агрегати під впливом інтенсивного тиску та високих температур вибуху.

4. Вплив вибуху не є простим лінійним загасанням з глибиною, а має складний нелінійний характер. Це пояснюється комбінацією чинників: вертикальним перемішуванням та інверсією ґрунтових горизонтів (винесення матеріалу з нижніх менш гумусованих), сепарацією ґрунту та просіюванням дрібніших агрегатів по стінках вирви, а також складними фізичними процесами, пов’язаними з поширенням і взаємодією вибухової енергії з неоднорідним ґрунтовим середовищем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О., Соловей В. Б. Оцінювання впливу збройної агресії РФ на ґрунтовий покрив України. *Український географічний журнал*. 2024. № 1. С. 7-18. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007

2. Михайлюк В. Особливості розподілу органічної речовини і елементів живлення при бомбовій ерозії ґрунтів. *Зб. матеріалів Міжнар. наук.-пр. конф. «Сучасні тенденції розвитку геодезії, землеустрою та природокористування»*. 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

3. Ambrosini, Daniel & Luccioni, Bibiana. (2019). Effects of underground explosions on soil and structures. Underground Space. 5. DOI: https://doi.org10.1016/j.undsp.2019.09.002

4. Hupy, Joseph & Schaetzl, Randall. Introducing "Bombturbation," A Singular Type of Soil Disturbance and Mixing. Soil Science, 2006. 171. 823-836. DOI: https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228053.08087.19

5. Mataix-Solera, Jorge & Cerdà, Artemi & Arcenegui, Vicky & Jordán, Antonio & Zavala, Lorena. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. Earth-Science Reviews. 109. 44-60. DOI: https://doi.org10.1016/j.earscirev.2011.08.002

6. Zihms S. G., Switzer C., Karstunen M., Tarantino A. (2013). Understanding the Effects of High Temperature Processes on the Engineering Properties of Soils. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013. URL: https://www.cfms-sols.org/sites/default/files/Actes/3427-3430.pdf