

УДК 631.459:631.43:355.01(477)

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.1\(48\).363280](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.1(48).363280)

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>

БОМБОВА ЕРОЗІЯ ҐРУНТІВ: МЕХАНІЗМИ ПРОЦЕСУ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі отримало подальший розвиток авторське поняття «бомбова ерозія ґрунту», яке розкрито через формування специфічних «гранично-структурних елементів». Ці елементи включають еродоване ядро (вибуховий кратер) та еджект із властивою їм зональною структурою. Досліджено внутрішню будову кратера, утвореного вибухом БпЛА «Shahed», що складається з бомботурбованого та розрихленого шарів, а також просторову структуру еджекта. Встановлено кількісні параметри зміни структурно-агрегатного складу ґрунтів у різних зонах порівняно з контролем. Зафіксовано різке зростання частки брилуватої фракції (>10 мм) до 71–79% у бомботурбованому шарі вирви і відносне зростання частки пилу у дальній зоні розсіювання. Методично опрацьовано підходи до визначення площ, об'ємів і маси окремих зон асиметричних кратерів та їхнього еджекта за допомогою математичного моделювання асиметричних параболоїдів та секторних розрахунків. Виявлений дефіцит маси еджекта в 2-х метровій зоні (31% від об'єму вирви) підтверджує вибухове розсіювання дрібнозему. Запропоновані підходи дозволяють системно оцінювати масштаби техногенного пошкодження ґрунтів у зонах бойових дій.

Ключові слова: бомбова ерозія ґрунту, бомботурбація, вибуховий кратер, еджект, структура ґрунту, деградація ґрунтів, ударний БпЛА «Shahed».

ВСТУП

Процеси антропогенної трансформації ґрунтів у сучасних умовах набувають екстремального характеру, серед яких воєнний вплив є одним із найпотужніших чинників деградації. Численні дослідження засвідчили значний вплив воєнних дій на ґрунти, головним чином через порушення, ущільнення, вигорання, засмічення рештками бойових засобів, забруднення токсичними речовинами тощо (Балюк та ін., 2025). Найбільш вираженим проявом негативного впливу є формування вибухових кратерів, що супроводжується миттєвим руйнуванням природного профілю ґрунту та його фізичного стану.

Для опису процесу вибухового руйнування ґрунту у науковій літературі використовують поняття «бомботурбація» (bombturbation), що розглядається як специфічна форма педотурбації, пов'язана з вилученням ґрунту в місці детонації та накопиченням валу з викинутого матеріалу (Ніру et al., 2006). Нами запропоновано ширше поняття — «бомбова ерозія ґрунту», що характеризує



деградацію ґрунтового покриву; вибух зумовлює локальне механічне видалення верхніх, найбільш родючих шарів ґрунту із оголенням глибинних горизонтів або материнської породи, безповоротне винесення ґрунтової маси, формування кавернозного рельєфу тощо. На відміну від поступової водної чи вітрової ерозії, бомбова ерозія діє миттєво і об'ємно. У результаті відносно однорідний ґрунтовий покрив трансформується у спорадично-плямистий із різко вираженою гетерогенністю фізичних і хімічних властивостей ґрунтів (Михайлюк, 2024).

Дослідження механіки вибуху, морфології кратерів та просторового розподілу викинутого матеріалу (еджекти) має ключове значення для оцінювання екологічних збитків та прогнозування відновлення земель. Фундаментальним принципом тут є закон масштабування (правило кубічного кореня), який дозволяє прогнозувати лінійні розміри кратера (L — радіус або глибину) в залежності від маси заряду (W): $L = K \times W^{1/3}$, де K — емпіричний коефіцієнт, що визначається фізико-механічними властивостями ґрунту та глибиною закладання боєприпасу (Ambrosini & Luccioni, 2006; Holsapple, 2003; Housen et al., 1983). Експериментальні дані свідчать, що зв'язні суглинисті ґрунти формують глибші та стійкіші кратери, ніж піщані, завдяки когезії, яка запобігає швидкому осипанню стінок (Ambrosini & Luccioni, 2006).

Визначальним фактором геометрії вирви є умови детонації. При поверхневому підриві значна частка енергії витрачається на ударну хвилю в повітрі, що зумовлює утворення мілких кратерів, глибина яких становить близько 25% від діаметра (Ambrosini & Luccioni, 2006). У разі заглибленого (фугасного) вибуху ґрунт сам бере участь в передачі енергії, що веде до максимальної екскавації.

На основі аналізу механіки вибуху виділяють чотири ключові зони вирви: 1) пластичну (найглибшу) зону, у якій ґрунт деформований і ущільнений вище норми; 2) область розриву, в якій міститься подрібнений і пошкоджений вибухом субстрат; 3) зону відступу, в якій міститься та частина ґрунту, що повернулася в порожнину. Саме ця зона формує профіль видимого кратера; 4) область викиду (еджект) — це зовнішній насипний вал навколо кратера (Ambrosini & Luccioni, 2006; Nagy, 2015).

Об'єм еджекта становить у середньому 80% від об'єму екскавації; решта компенсується ущільненням дна та стінок кратера (Holsapple, 2003). Просторовий розподіл викинутого матеріалу є неоднорідним і поділяється на фації: 1) проксимальна (вал), де акумулюється 60–90% маси; вона зазвичай обмежується відстанню до 2 радіусів кратера і характеризується найбільшою потужністю наносів; 2) медіальна (10–30%), яка поширюється до 4–6 радіусів. Тут спостерігається інтенсивне перемішування горизонтів, що часто призводить до інверсійної будови (нижні шари опиняються зверху); 3) дистальна (<10%), яка представлена дрібними фракціями, що можуть розлітатися на відстань до 20–24 радіусів кратера (Graettinger, 2015).

Товщина шару еджекта стрімко зменшується з віддаленням від епіцентру за степеневим законом: при подвоєнні відстані потужність наносу може знижу-

ватися у 6–11 разів (Housen et al., 1983). Фізико-механічні властивості ґрунту суттєво корегують цей процес. У суглинках завдяки когезії утворюються великі агрегати, що мають вищу балістичну стійкість. Вологість також підвищує енергоефективність: заповнення пор водою зменшує втрати енергії на стиснення повітря, збільшуючи радіус кратера та дальність викиду на 15–20% порівняно з сухим станом (Holsapple, 2003).

Узагальнена модель зонування порушень для зв'язних ґрунтів передбачає певне співвідношення меж окремих фацій (відносно радіуса кратера) (Housen et al., 1983). Такий підхід дозволяє використовувати радіус вирви як універсальний параметр для польового аналізу та картографування трансформації ґрунтового покриву в зонах бойових дій.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дане дослідження є логічним продовженням попередніх робіт, присвячених оцінюванню впливу підривів боєприпасів на склад і властивості ґрунтів, зокрема їх фізичну трансформацію, геохімічні особливості та просторову неоднорідність. У даній роботі акцент зроблено на детальному аналізі морфоструктурної організації вибухового кратера та диференціації ґрунтового матеріалу в межах зон викиду.

Об'єктом дослідження є вибуховий кратер (рис. 1а), утворений у березні 2026 року унаслідок детонації БпЛА «Shahed» і розташований на околиці с. Молодіжне Великодолинської селищної громади Одеського району (координати: 46,30213N; 30,61237E). Ґрунтовий покрив представлений чорноземом південним малогумусним важкосуглинковим на лесі. Також було проведене дослідження морфометричних характеристик вирви від вибуху БпЛА «Shahed» в межах м. Одеси (рис. 1б).



Рис. 1. Вирви від вибуху БпЛА «Shahed»: вирва в чорноземі південному з виразним дальнім еджектом (а); вирва в межах м. Одеси з малооб'ємним ближнім еджектом (б)

Методологічною основою дослідження є поєднання морфометричного, порівняльно-аналітичного та профільно-генетичного підходів. Такий підхід передбачає розгляд області вибухового кратера як техногенно-трансформований ґрунтовий ареал (гранично-структурний елемент), у межах якого взаємодіють процеси механічної і термічної трансформації, переміщення, повторного осадження ґрунтового матеріалу. Особлива увага приділялася просторовій диференціації властивостей ґрунту залежно від положення в структурі кратера.

У польових умовах 18.04.2026 р. виконано морфометричний опис кратера з виділенням зон акумуляції. Для кожної з виділених зон визначено масу переміщеного ґрунтового матеріалу, що дозволило оцінити співвідношення об'ємів перерозподілу ґрунтової маси в межах кратера та навколишньої території. Відбір ґрунтових зразків здійснювався диференційовано за морфологічними зонами кратера та еджекту з урахуванням їх просторового положення. Для забезпечення порівняльного аналізу додатково відібрано контрольні зразки на ділянці непорушеного ґрунту, розташованій на відстані 20 м від кратера, що репрезентує фонові умови ґрунтового покриття.

Лабораторні дослідження включали визначення структурно-агрегатного складу ґрунтів методом сухого просіювання.

Математична обробка експериментальних даних, порівняльний аналіз точності методів морфометричних розрахунків та перевірка достовірності моделей анізотропного масштабування була виконана з використанням великої мовної моделі (Gemini 1.5 Pro (Google)).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

Польові дослідження морфометричних характеристик вирви засвідчили її виразну асиметрію вздовж осі Схід-Захід (рис. 2), що зумовлено падінням БпЛА під гострим кутом. Водночас за віссю Північ-Південь, перпендикулярною до траєкторії удару, кратер зберігає відносну геометричну симетрію. Спільно з фахівцями ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О. Н. Соколовського» було описано ґрунтовий профіль у північній частині кратера, який представлений такими горизонтами:

Н (0–32 см): гумусово-акумулятивний, пухкий, механічно порушений, але відносно однорідний.

Нр (32–42 см): гумусовий перехідний, пухкий, характеризується неоднорідною гумусованістю (зона активної турбації).

Нр (42–52 см): гумусовий перехідний, пухкий, порушений, за морфологією наближений до однорідного.

НР (52–68 см): гумусовий перехідний, щільний, зі збереженою природною структурою.

Ph (нижче 68–70 см): слабогумусований лес; лінія закипання від HCl спостерігається на глибині 70 см, виділення карбонатів (білозірка) — з 90 см.

Аналіз внутрішньої будови вирви дозволив виділити в її чаші два специфічні шари розпушеної маси. Перший — бомботурбований шар (зона відступу), представлений сумішшю грубобрилуватого та частково спеченого матеріалу, що під час детонації був піднятий у повітря і згодом повернувся у кратер. Другий — пухкий шар (зона рихлення), де під впливом ударної хвилі та розширення газів відбулося зниження щільності складення ґрунту без суттєвого перемішування його часток.

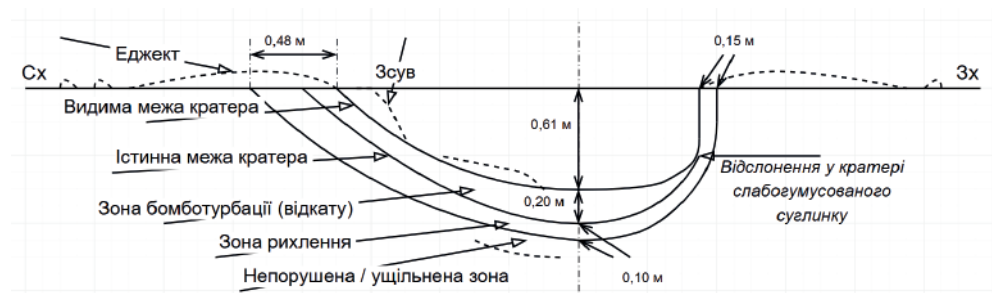


Рис. 2. Вертикальний профіль кратера, утвореного вибухом БпЛА «Shahed»

Товщина цих зон у бокових стінках кратера становить близько 10 см кожна, тоді як у днищі, внаслідок гравітаційного осипання, потужність перемішаного шару досягає 20 см. Межа між бомботурбованою масою та зоною рихлення поступова через нерівномірність відкладення спеченого матеріалу. Натомість перехід від пухкого (порушеного) шару до основи з природною щільністю є чітким і добре фіксується інструментально.

Для систематизації цих спостережень нами застосовано поняття «геомеханічний кратер вибуху» як весь простір вибухового порушення (зони бомботурбації, розущільнення і ущільнення) і «зона структурної дезінтеграції». Останнє поняття — це об'єм ґрунтового масиву, обмежений контуром виразного вибухового порушення, у межах якого відбулися зміни структури, щільності або просторового положення матеріалу (це відносно розпушені зони бомботурбації та рихлення).

Для математичного опису асиметричного контуру вирви застосовано секторну модель кратера, що базується на вимірюванні восьми радіусів із кроком 45° . Математичне обґрунтування цього підходу передбачає лінійну зміну радіуса залежно від кута між сусідніми точками вимірювання (R_1 і R_2), що забезпечує адекватне відображення криволінійної межі асиметричного кратера.

З метою підвищення точності розрахунків, замість традиційного арифметичного осереднення було використано середньоквадратичне значення радіуса через вираз $(R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)/3$. Наявність члена $R_1 R_2$ у цій моделі дозволяє врахувати реальну кривизну опуклої межі та мінімізувати похибку обчислень навіть за умов значних розбіжностей у довжині сусідніх радіусів. У результаті

підстановки центрального кута сектору $\theta = \pi/4$ у рівняння площі було виведено фінальну робочу формулу:

$$S \approx \frac{\pi}{24} \cdot R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2$$

За цією методикою визначено площу видимого кратера та межу зони структурної дезінтеграції ґрунту (табл. 1). Традиційні підходи до оцінки об'ємів вибухових кратерів зазвичай базуються на припущенні про їхню ідеальну радіальну симетрію. Це дозволяє використовувати класичну модель параболоїда обертання, що цілком обґрунтовано фізикою процесу: під час детонації та екскавації ґрунту матеріал викидається рівномірно, формуючи чашоподібне заглиблення. Математично така форма описується квадратичною залежністю глибини від відстані до епіцентру, що робить параболоїд найбільш природною моделлю для простих кратерів (Holsapple, 2003).

Таблиця 1

Морфометричні параметри видимого кратера та зони структурної дезінтеграції (ЗСД) ґрунту

Сектор	Видимий кратер		Видимий кратер разом з ЗСД		Площа ЗСД (м²)
	Радіуси (м)	Площа S (м²)	Радіуси (м)	Площа S (м²)	
Пн – Пн-Сх	1,00–0,975	0,383	1,36–1,395	0,745	0,362
Пн-Сх – Сх	0,975–1,39	0,495	1,395–1,87	0,913	0,418
Сх – Пд-Сх	1,39–1,05	0,588	1,87–1,35	1,027	0,439
Пд-Сх – Пд	1,05–1,00	0,424	1,35–1,63	0,825	0,401
Пд – Пд-Зх	1,00–0,975	0,383	1,63–1,225	0,805	0,422
Пд-Зх – Зх	0,975–0,71	0,284	1,225–0,86	0,540	0,256
Зх – Пн-Зх	0,71–1,05	0,308	0,86–1,48	0,550	0,242
Пн-Зх – Пн	1,05–1,00	0,424	1,48–1,36	0,828	0,404
УСЬОГО		3,289		6,233	2,944

Проте на практиці ідеальна симетрія є рідкістю. Кут падіння боєприпасу, неоднорідність ґрунтового масиву та особливості вибухової хвилі призводять до формування асиметричних утворень. Для отримання достовірних даних у цій роботі застосовано модель асиметричного параболоїда. Її ключова перевага полягає у здатності описувати поверхню кратера за двома різними профілями: асиметричним вздовж траєкторії удару (вісь Схід-Захід) та відносно симетричним у перпендикулярному напрямку (вісь Північ-Південь). Таке поєднання дозволяє відтворити реальну геометрію об'єкта, де загальний об'єм визначається як функція площі його поздовжнього перерізу та поперечної ширини.

Розрахунок базується на формулі:

$$V = \left(4 * \frac{b}{3} \right) * A$$

де V — загальний об'єм кратера;

b — напівширина симетричного перерізу (Північ-Південь);

A — площа асиметричного профілю (Схід-Захід).

Для обчислення площі поздовжнього профілю ($A_{\text{Сх-Зх}}$) використано метод чисельного інтегрування за трапеціями. Цей метод використовується як найбільш точний інструмент для безпосередньої роботи з емпіричними даними. Він передбачає поділ площі під профілем на ряд трапецій, де основи відповідають вимірним значенням глибини, а висота — кроку вимірювання Δx (табл. 2). Кожний сегмент профілю визначається за формулою:

$$A_i = \left(\frac{z_i + z_{i+1}}{2} \right) * (x_{i+1} - x_i)$$

Аналіз параметрів асиметричного профілю Сх-Зх по шести реперних точках підтверджує значну асиметрію: при загальній довжині профілю 2,1 м його найглибша точка (0,61 м) зміщена на 0,34 м від геометричного центру (табл. 2). Це характерно для вибухів при похилому влучанні боєприпасу. На основі експериментальних даних із параметром $b = 1.0$ м та розрахованою площею перерізу $A_{\text{Сх-Зх}} \approx 0,8785 \text{ м}^2$, отримано підсумковий об'єм кратера $V \approx 1,17 \text{ м}^3$. Запропонований підхід забезпечує високу точність морфометричних оцінок при обмеженій кількості вихідних точок вимірювання.

Але, визначений об'єм видимого кратера все ж таки відображає ідеальну, хоч і не симетричну чашу параболоїда. Фактично же в межах кратера було два клиноподібних виступи від кромки кратера (зсув еджекта), загальним об'ємом біля $0,128 \text{ м}^3$, і навал ґрунту в нижній частині кратера, об'ємом $0,036 \text{ м}^3$. Таким чином, порожнина кратера фактично мала об'єм $1,01 \text{ м}^3$.

Таблиця 2

Параметри поперечних профілів кратера

Сх-Зх	Поперечна ширина x, м	0	0,43	0,79	1,39	1,80	2,10
	Глибина z, м	0	0,23	0,46	0,61	0,56	0,40
Пн-Пд	Поперечна ширина x, м	0	0,50	1,00	1,50	2,0	
	Глибина z, м	0	0,46	0,61	0,46	0	

Для повної кількісної оцінки недостатньо знати лише видимі габарити вибуху. Необхідно враховувати об'єм геомеханічного кратера — зони, де під дією вибуху відбулися зміни властивостей ґрунту — складення, структурного стану тощо. Нами у кратері були визначені параметри зони структурної дезінтеграції, які виразно були представлені зоною бомботурбації (перемішаної спеченої брилуватої маси) та зоною рихлення (однорідною, відносно пухкою ґрунтовою

масою). При цьому було проведено порівняльний аналіз трьох методів їхньої реконструкції.

Найбільш достовірні результати забезпечив метод анізотропного масштабування. Він базується на відновленні реального профілю шляхом індивідуального розрахунку розширення кожної сторони вирви, що дозволяє мінімізувати спотворення форми. Різниця об'ємів ($2,60\text{--}3,05\text{ м}^3$) між різними методами відображає чутливість визначень до геометрії периферійних ділянок кратера, де навіть незначне збільшення ширини при помірній глибині суттєво впливає на інтегральний об'єм.

Таким чином, комплексне моделювання дозволило чітко розмежувати масштаби фізичного впливу вибуху на ґрунтовий покрив. В досліджуваному кратері об'єм порожнини (видимий кратер), що утворився внаслідок безпосереднього викиду матеріалу, становить $1,01\text{ м}^3$. Повний об'єм ґрунтового масиву, що зазнав подрібнення, спікання та перемішування, складає $3,05\text{ м}^3$. Різниця між цими показниками ($2,04\text{ м}^3$) фактично визначає об'єм зони структурної дезінтеграції ґрунту.

Навколо кратера формується зона викиду ґрунтового матеріалу (еджект). В досліджуваному кратері еджект був сформований валом ґрунту, нерівномірним по грубизні і ширині, а також шлейфом розсіювання. Ширина валу становила від 1 до 1,4 м, грубизна від 1 до 10 см; видимий шлейф розсіювання, шириною до 5 м і більше, складався з тонкого не суцільного прошарку ґрунтової маси з окремими брилуватими окремостями.

Для аналізу просторового розподілу викинутого ґрунту навколо вирви було виділено два розрахункові кільця: кільце K1 (радіус від 1 до 2 м від центру вирви); кільце K2 (радіус від 2 до 3 м від центру вирви).

Визначення маси проводилося ваговим методом на пробних площадках. Для розрахунку маси в кільці K1, площею $9,42\text{ м}^2$, застосований секторно-екстраполяційний метод: для цієї зони застосовано метод локального вимірювання на площадці $0,5\text{ м}^2$ по 4 секторах (21,5 кг, 11,3 кг, 23,1 кг, 12,7 кг), які характеризувалися індивідуальним розподілом ґрунтової маси. Отриману масу на одиницю площі поширено на площу сектора (відповідно на 1,96, 2,04, 3,27, $2,15\text{ м}^2$), а загальну масу еджекту визначено як суму по всіх секторах. Визначена маса еджекту в K1 становить $336,07\text{ кг}$.

Для розрахунку маси ґрунту в кільці K2, площею $15,708\text{ м}^2$, через виражену променеву структуру викиду застосований метод виділення скупчень на шести променях із фоновією екстраполяцією. Загальна маса скупчень на шести променях еджекту (3 м^2) склала $27,6\text{ кг}$; визначена фоновіа маса $= 3,2\text{ кг/м}^3$. Разом маса викинутого ґрунту на K2 склала $68,27\text{ кг}$.

Таким чином, сумарна маса еджекту (викинутого ґрунту) на відстані до 2-х метрів від кромки вирви становить $404,34\text{ кг}$.

З попередніх розрахунків відомо, що розрахований видимий об'єм кратера $V_{\text{вид.}} \approx 1,01\text{ м}^3$. Маса цього ґрунту залежить від щільності; при типовій щіль-

ності для польових умов $1,3 \text{ т/м}^3$, маса ґрунту у кратері повинна становити біля 1300 кг. Таким чином, маса викинутого ґрунту в межах 2-х метрового кола навколо кромки кратера становить лише 31% від маси ґрунту, який раніше заповнював вирву.

«Дефіцит» ґрунтової маси пояснюється кількома факторами — формуванням зони ущільнення, в якій ґрунт не викидається, а вдавлюється вибуховою хвилею в дно та стінки вирви (Nagy, 2015), формуючи зону геомеханічного ложа, і дальнім викидом, у результаті якого дрібні фракції та пил піднімаються високо в повітря і розносяться вітром на десятки й сотні метрів, виходячи за межі визначеного у даному дослідженні радіуса К2 (3 м від центру кратера).

Про визначальний вплив розсіювання ґрунтової маси засвідчує кратер від вибуху БпЛА «Shahed» в межах м. Одеси (рис. 16). При діаметрі 3,1 м, глибині 1 м і об'ємі видимої чаші кратера $3,68 \text{ м}^3$ ($\approx 4,8 \text{ т}$ ґрунту), цей кратер практично не мав дрібноземистого еджекту.

Аналіз структурно-агрегатного стану ґрунту за результатами сухого просіювання показав, що детонація бойової частини БпЛА «Shahed» спричиняє глибоку механічну трансформацію ґрунтової маси, яка проявляється у суттєвому перерозподілі агрегатних фракцій порівняно з контролем (рис. 3). У межах кратера (днище, схили, зона розпушення) та прилеглих зон еджекта фіксується різке зростання частки грубих агрегатів розміром понад 10 мм до 71–79%, що істотно перевищує контрольні значення. Це можна пояснити поєднанням

ударно-хвильової дезінтеграції ґрунтового матеріалу з подальшою вторинною агрегацією часток у брилуваті окремість під дією локального ущільнення і ударного злипання матеріалу. Також додаткову роль відіграють вибіркове винесення пилюватої фракції за межі кратера і термічне зміцнення (спікання, різке висихання) ґрунтової маси.

Максимальна брилуватість встановлена у периферійній зоні розпушення, де частка великих агрегатів досягає майже 80%. Такий розподіл вказує на специфічний режим дії вибуху: енергії достатньо для дезінтеграції масиву на великі блоки, але недостатньо для їх подальшого подрібнення або виносу за межі цієї зони. Водночас вміст агрономічно цінних агрегатів різко знижується —

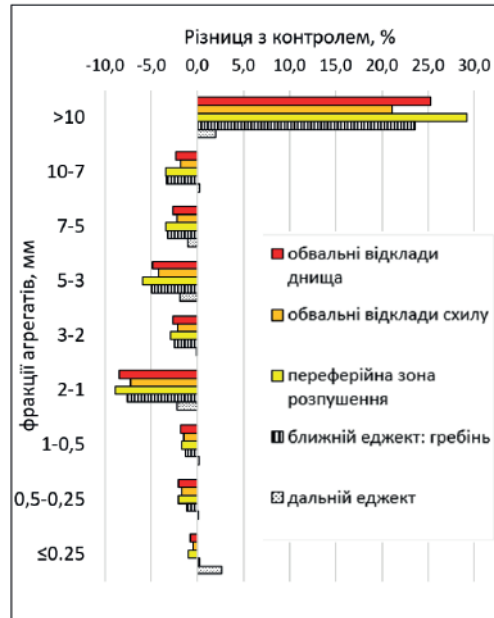


Рис. 3. Відхилення вмісту структурних фракцій ґрунту в зонах бомбової ерозії відносно показників контролю

приблизно вдвічі порівняно з контролем, що свідчить про втрату оптимальної структури і деградацію фізичного стану ґрунту. Найбільш виражена деструктуризація характерна для днища кратера та зони рихлення, де поєднуються ефекти ударного навантаження, газодинамічного і термічного впливу.

Просторовий аналіз еджекту також виявив закономірну диференціацію матеріалу. У ближньому еджекті (гребінь кратера) накопичується матеріал, викинутий по крутій траєкторії з подальшим обваленням, що зумовлює високу частку великих агрегатів і відносне збереження їх цілісності. На відміну від цього, у дальній зоні розсіювання показники структурного стану наближаються до контрольних, що пов'язано з переважним перенесенням дрібніших фракцій, які зазнали менш інтенсивного на них впливу.

Важливою особливістю є перерозподіл дрібнодисперсної фракції: у межах кратера її частка зменшується, тоді як у зоні розсіювання — зростає. Це свідчить про вибіркового винос пилу на більші відстані і підтверджує ключову роль процесів вибухового розсіювання у формуванні просторової структури еджекту. Таким чином, вибух формує чітко диференційовану систему зон із різним ступенем деструктуризації ґрунту, що має принципове значення для оцінки фізичної деградації ґрунту.

Отримані морфометричні дані — від розрахунків площ порушень ґрунту та об'ємів екскавації до кількісного розподілу маси еджекту по окремих зонах — дозволяє вийти за межі суто описової характеристики наслідків вибухів. Встановлена закономірність трансформації структурного стану ґрунтової маси в межах вирви та на прилеглих територіях, у поєднанні з аналізом результатів попередніх публікацій, дає підстави для теоретичного узагальнення цих процесів у межах цілісного явища. Виходячи з системного підходу до аналізу порушень, ми пропонуємо впровадження нового поняття «бомбова ерозія ґрунту», що найбільш повно відображає природу спостережуваних змін.

Бомбова ерозія ґрунту — це специфічний тип деградації ґрунтового покриття, що полягає у миттєвому порушенні генетичного профілю, екскавації ґрунтової маси та її наступному просторовому перерозподілі під дією енергії вибуху. Основними і супутніми складовими цього процесу є:

1. Екскавація ґрунту і формування кавернозного рельєфу. Це початкова фаза ерозії, під час якої відбувається «зрізання» ґрунту. Кінетична енергія долає сили зв'язності суглинку, створюючи зону екскавації. Результатом є безповоротне винесення ґрунтової маси з місця її природного залягання та формування від'ємних форм мікрорельєфу (екскаваційних вирв), що радикально змінює геоморфологію території. На відміну від водної чи вітрової ерозії, де руйнування йде поступово і пошарово, бомбова ерозія діє миттєво і об'ємно. Сформовані від'ємні форми рельєфу (вирви) стають центрами подальшої акумуляції вологи та вторинної водної ерозії стінок.

2. Перерозподіл ґрунтової маси. Це процес міграції вилученого матеріалу, що включає його балістичне переміщення та розсіювання на прилеглих тери-

торіях. Це призводить до просторового переміщення генетичних горизонтів; родючий шар верхніх горизонтів переміщується із слабогумусованою масою перехідних горизонтів чи з материнською породою. Формується техногенний нанос (еджект), що призводить до поховання непорушених ґрунтів під шаром викидів.

3. Вибухова педотурбація та механо-фізична трансформація. В окремих зонах кратера відбувається радикальна зміна фізичного стану ґрунту: вертикальне переміщення матеріалу різних горизонтів (бомботурбація); рихлення ґрунтової маси без перемішування; суттєва зміна структурного стану ґрунту — спікання ґрунтової маси з утворенням грубобрилуватої структури.

4. Диференціація ґрунтового покриву через утворення гранично-структурних елементів. Бомбова ерозія завершується формуванням якісно нової структури ґрунтового покриву. Замість відносно однорідного ареалу постає комплекс гранично-структурних елементів, кожен з яких має характерні морфологічні ознаки:

- еродоване ядро (вирва з педотурбаційною трансформацією, з відслоненням менш гумусованих горизонтів чи породи, з меншою біологічною активністю ґрунту, із зміненням геохімічним фоном через додавання продуктів детонації, осколків чи вивантаженням на поверхню глибоких горизонтів з іншими характеристиками);
- зона акумулятивного перекриття: територія навколо вирви, представлена інверсійними профілями. Тут педотурбований матеріал викидів (еджект) утворює наносну товщу, яка за складом і властивостями є «чужою» для поверхневого шару, на який вона осіла;
- зона далекого розсіювання ґрунтового матеріалу.

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що вибуховий вплив на ґрунтовий покрив є складним процесом, який виходить далеко за межі простого механічного пошкодження поверхні. На основі аналізу наслідків детонації бойової частини БпЛА «Shahed» встановлено, що кратери та прилегла територія набувають чіткої зональної структури, яка визначає подальшу еволюцію ґрунтового покриву.

Методичний підхід, застосований у роботі, базується на комплексному зоннуванні вирви та еджекта. Було розмежовано поняття видимого кратера (порожнини) та геомеханічного кратера, який включає зони перемішування (бомботурбації), рихлення та ущільнення. Визначено, що об'єм зони структурної дезінтеграції ґрунту (перемішування і рихлення), який становить 3,05 м³, втричі перевищує об'єм видимої чаші (1,01 м³). Це свідчить про глибоку внутрішню трансформацію ґрунту під видимою поверхнею вибухового кратера. Дослідження фізичних властивостей виявило критичну деградацію структури: у межах вирви та навалу викидів (еджекту) частка брилуватої структури (>10 мм)

зростає до 71–79%, тоді як кількість агрономічно цінних агрегатів скорочується вдвічі. Синтез отриманих даних дозволив сформулювати концепцію «бомбової ерозії ґрунту». Це специфічний тип деградації ґрунтового покриву, що полягає у миттєвому порушенні генетичного профілю, екскавації ґрунтової маси та її наступному просторовому перерозподілі під дією енергії вибуху. Суть явища полягає у формуванні нових гранично-структурних елементів, що мають: еродоване ядро (вирву) з зонами бомботурбації, рихлення, ущільнення, спікання ґрунтової маси, з відслоненням нижніх горизонтів чи материнської породи, із зниженою біологічною активністю та зміненим хімічним фоном; зони акумулятивного перекриття: територію навколо вирви з інверсійними профілями, де перемішаний і розпушений чи спечений матеріал викидів (еджект) ховає під собою природний родючий шар; зону розсіювання: периферію, де відбулося винесення дрібних часток ґрунту, що підтверджується дефіцитом маси еджекта (знайдено лише 31% від об'єму екскавації). Опрацьована модель зонування є надійним інструментом для швидкого оцінювання масштабів пошкодження ґрунтів та планування їх подальшого відновлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Михайлюк В. І. Вплив воєнних дій на вміст органічної речовини і елементів живлення в ґрунтах півдня України. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*. 2024. Т. 29, вип. 1(44). С. 109–123. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1\(44\).305376](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376)
- Оцінювання впливу збройної агресії на стан чорноземних ґрунтів і заходи з його відновлення : монографія / С. А. Балюк та ін. ; за ред. С. А. Балюка, А. В. Кучера. Київ : Аграрна наука, 2025. 240 с.
- Hupy J., Schaetzl R. Introducing “bombturbation,” a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*. 2006. Vol. 171. P. 823–836. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228053.08087.19>
- Ambrosini R. D., Luccioni B. M. Craters produced by explosions on the soil surface. *Journal of Applied Mechanics* 2006. Vol. 73, iss. 6. P. 890–900. <https://doi.org/10.1115/1.2173283>
- Holsapple K. A. Theory and equations for craters from impacts and explosions. St. Louis, MO : Washington University, 2003. <https://www.lpi.usra.edu/lunar/tools/lunarcratcalc/theory.pdf>
- Housen K. R., Schmidt R. M., Holsapple K. A. Crater ejecta scaling laws: fundamental forms based on dimensional analysis. *Journal of Geophysical Research*. 1983. Vol. 88, iss. B3. P. 2485–2499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02485>
- Nagy N. M. Numerical evaluation of craters produced by explosions on the soil surface. *Acta Physica Polonica Series A*. 2015. Vol. 128, iss. 2B. P. B-260–B-266. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-260>
- Facies distribution of ejecta in analog tephra rings from experiments with single and multiple subsurface explosions / A. Graettinger et al. *Bulletin of Volcanology*. 2015. Vol. 77. Article 66. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0951-x>
- Gemini (Версія 1.5 Pro). Google AI. URL: <https://gemini.google.com> (дата звернення: 20.04.2026).

REFERENCES

- Mikhaulyuk, V. I. (2024). Vplyv voennykh dii na vmist orhanichnoi rehovyny i elementiv zhyvlennia v gruntakh pivdnia Ukrainy [Impact of military activities on the content of organic matter and nutrients in the soils of southern Ukraine]. *Odesa National University Herald. Geography & Geology*, 29(1(44)), 109–123. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1\(44\).305376](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2024.1(44).305376) [in Ukrainian].
- Baliuk, S. A., & Kucher, A. V. (Eds.). (2025). *Otsiniuvannia vplyvu zbroinoi ahresii na stan chornozemnykh gruntiv i zakhody z yoho vidnovlennia* [Assessment of the impact of armed aggression on the condition of chernozem soils and measures for their restoration] (240 p.). Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian].
- Hupy, J., & Schaetzl, R. (2006). Introducing “bombturbation,” a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*, 171, 823–836. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228053.08087.19>

- Ambrosini, R. D., & Luccioni, B. M. (2006). Craters produced by explosions on the soil surface. *Journal of Applied Mechanics*, 73(6), 890–900. <https://doi.org/10.1115/1.2173283>
- Holsapple, K. A. (2003). *Theory and equations for craters from impacts and explosions*. St. Louis, MO: Washington. <https://www.lpi.usra.edu/lunar/tools/lunarcratercalc/theory.pdf>
- Housen, K. R., Schmidt, R. M., & Holsapple, K. A. (1983). Crater ejecta scaling laws: fundamental forms based on dimensional analysis. *Journal of Geophysical Research*, 88(B3), 2485–2499. <https://doi.org/10.1029/JB088iB03p02485>
- Nagy, N. M. (2015). Numerical evaluation of craters produced by explosions on the soil surface. *Acta Physica Polonica Series A*, 128(2B), B-260–B-266. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.B-260>
- Graettinger, A., Valentine, G. A., Sonder, L., Ross, P.-S., & White, J. (2015). Facies distribution of ejecta in analog tephra rings from experiments with single and multiple subsurface explosions. *Bulletin of Volcanology*, 77, 66. <https://doi.org/10.1007/s00445-015-0951-x>
- Gemini (Version 1.5 Pro). Google AI. Retrieved April 20, 2026, from <https://gemini.google.com>

V. I. Mikhaylyuk,

Odesa State Agrarian University,
Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre,
3 Panteleimonivska St, Odesa, 65012, Ukraine;
mykhailiukv@osau.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-8526-0802>

BOMB-INDUCED SOIL EROSION: PROCESS MECHANISMS AND RESEARCH METHODOLOGY

Abstract

Problem Statement and Purpose. Anthropogenic transformation of soils caused by military activity is emerging as a global environmental threat. Explosion craters act as focal points of severe disturbance of the soil cover, accompanied by the instantaneous destruction of genetic horizons and chaotic redistribution of soil mass. The commonly used term *bombturbation* does not fully capture the entire range of destructive processes occurring in the landscape. In this context, the term **bomb erosion (bomb-induced soil erosion)** is proposed, treating explosive impact as a specific form of soil degradation comparable in outcome to classical erosion, but acting instantaneously and in three dimensions. The aim of this study is to investigate the morphological structure of an explosion crater, quantify the volumes of displaced soil, and substantiate the concept of **bomb erosion** as an integrated driver of soil cover transformation.

Data and Methods. The study was conducted on an explosion crater formed by a “Shahed” UAV in **Calcic Chernozems (southern heavy loam)** in Odesa region. The methodology is based on morphogenetic analysis and mathematical modeling of crater geometry. Surface areas were calculated using a sector-based model of an asymmetric contour, while volumes were estimated using an asymmetric paraboloid model. The mass of ejected soil (ejecta) was determined by a gravimetric method on sampling plots, followed by spatial zoning of the area surrounding the crater. Laboratory analysis included assessment of the soil structural–aggregate state by dry sieving. A comparative analysis with an undisturbed control site allowed quantification of the degree of physical soil degradation.

Results. The results demonstrate that the explosion crater has a complex zonal structure controlling the pattern of soil transformation. A substantial discrepancy was found between the volume of the visible cavity (1.01 m³) and the total volume of geomechanical disturbance (3.05 m³), which includes the bombturbation zone and

the buried loosening zone. Structural analysis revealed a pronounced increase in cloddiness: the proportion of coarse aggregates (>10 mm) within the crater and the proximal ejecta rim reached 71–79%, accompanied by a twofold decrease in agronomically valuable fractions. A significant deficit of ejecta mass was observed in the near zone (only 31% of the crater soil mass), which is explained by compaction at the crater bottom and the preferential transport of fine material to distal areas. The concept of **bomb erosion** is substantiated as comprising four components: excavation of soil and formation of a cavernous microrelief; redistribution of soil mass beyond the crater; explosive pedoturbation and mechano-physical transformation and differentiation of the soil cover through the formation of **spatially confined soil structural elements**. The proposed zoning model provides a reliable tool for rapid assessment of soil damage and for planning restoration measures.

Keywords: bomb-induced soil erosion, bombturbation, soil degradation, explosion crater, ejecta distribution, physical soil properties, Shahed UAV.

Отримано редакцією / Received 15.04.2026

Прорецензовано / Reviewed 25.05.2026

Схвалено до друку / Accepted 26.05.2026

Опубліковано / Published 10.08.2026

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів. При написанні статті автор не використовував ШІ.