УДК 579.6:504.5/.6:614.76:623.451.7](477.64-25)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.12

ПРОСТОРОВА ОЦІНКА ФІТОТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТУ В ЗОНІ ДЕТОНАЦІЇ КЕРОВАНОЇ АВІАЦІЙНОЇ БОМБИ (М. ЗАПОРІЖЖЯ, УКРАЇНА)

Крупєй К.С. (orcid.org/0000-0003-1522-1060)
Запорізький державний медико-фармацевтичний університет
пр. Маяковського, 26, 69000, м. Запоріжжя
krupeyznu@gmail.com

В умовах воєнних дій особливого значення набуває оцінювання біологічного стану ґрунтів, що зазнали впливу детонації боєприпасів. Метою дослідження було визначення інтегрального показника фітотоксичності ґрунту (ІПФ) та встановлення особливостей його просторової диференціації в зоні детонації керованої авіаційної бомби (КАБ). Дослідження проведено на ґрунтових зразках, відібраних у центрі вирви та на відстані 3, 10, 20 і 50 м у північному, східному, південному та західному напрямках (контроль – 200 м від місця детонації боєприпасу). Фітотоксичність визначали методом біотестування з використанням *Raphanus sativus* L. var. *radicula*, *Lepidium sativum* L. var. *latifolium* та *Avena sativa* L. відповідно до ДСТУ ISO 22030:2007. Інтегральний показник розраховували з урахуванням енергії проростання, схожості насіння, довжини кореня та пагона.

Встановлено виражену просторову неоднорідність фітотоксичної дії досліджуваного ґрунту. Для *R. sativus* переважали значення ІПФ, що відповідали відсутності або слабкій фітотоксичності; водночас на окремих ділянках, зокрема на відстані 50 м у північному напрямку, ІПФ знижувався до 0,40. *L. sativum* характеризувався більш вираженою та варіабельною реакцією: ІПФ змінювався від 0,00 до 1,15, а найнижче значення (0,28) зафіксовано у західному напрямку на відстані 10 м; на відстані 20 і 50 м у цьому секторі спостерігалося повне в’янення рослин. Найвищу чутливість продемонструвала *A. sativa*: ІПФ у всіх дослідних варіантах був нижчим за 0,71, а мінімальні значення становили 0,00–0,30, що відповідає катастрофічному та дуже сильному ступеню забруднення.

Виявлено відсутність чіткої монотонної залежності фітотоксичності від відстані до епіцентру детонації. Найбільш виражені токсичні ефекти реєструвалися не лише поблизу центру, а й на відстані 10–50 м, що свідчить про мозаїчний характер просторового розподілу токсичності ґрунту на рослинні тест-об’єкти. Отримані результати підтверджують доцільність використання комплексного фітотестування для біологічної оцінки ґрунтів, постраждалих унаслідок детонації боєприпасів, та доповнення ним результатів хімічного аналізу. *Ключові слова:* фітотоксичність ґрунту, фітотестування, керована авіаційна бомба, детонація боєприпасів, просторова оцінка забруднення ґрунту.

Spatial Assessment of Soil Phytotoxicity in the Detonation Zone of a Guided Aerial Bomb (Zaporizhzhia, Ukraine). Krupiei K.
Under conditions of armed conflict, assessment of the biological status of soils affected by ammunition detonations is of particular importance. The aim of this study was to determine the integral phytotoxicity index (IPI) of soil and to identify patterns of its spatial differentiation within the zone of a guided aerial bomb (GAB) detonation. The study was conducted using soil samples collected from the crater center and at distances of 3, 10, 20, and 50 m in the northern, eastern, southern, and western directions; the control samples were collected 200 m from the detonation site. Soil phytotoxicity was assessed using a bioassay with *Raphanus sativus* L. var. *radicula*, *Lepidium sativum* L. var. *latifolium*, and *Avena sativa* L. in accordance with DSTU ISO 22030:2007. The IPI was calculated based on seed germination energy, final germination, root length, and shoot length.

A pronounced spatial heterogeneity in the phytotoxic effects of the investigated soil was established. For *R. sativus*, IPI values predominantly indicated absent or low phytotoxicity; however, at individual sampling points, particularly 50 m north of the detonation center, IPI decreased to 0.40. *L. sativum* exhibited a more pronounced and variable response, with IPI values ranging from 0.00 to 1.15. The lowest value (0.28) was recorded 10 m west of the detonation center, while complete plant wilting was observed at 20 and 50 m in the same sector. *A. sativa* demonstrated the highest sensitivity: IPI values were below 0.71 at all sampling points, with minimum values of 0.00–0.30, corresponding to catastrophic and very high levels of soil contamination.

No clear monotonic relationship between phytotoxicity and distance from the detonation epicenter was identified. The most pronounced toxic effects occurred not only near the crater center but also at distances of 10–50 m, indicating a mosaic pattern of the spatial distribution of soil toxicity to plant test organisms. The results demonstrate the applicability of integrated phytotesting for the biological assessment of soils affected by ammunition detonations and its value as a complement to chemical analysis. *Key words:* soil phytotoxicity, phytotesting, guided aerial bomb, ammunition detonation, spatial assessment of soil contamination.

Постановка проблеми. Через воєнні дії в Україні ґрунтовий покрив зазнає значного техногенного навантаження, зокрема через застосування вибухових засобів ураження. Детонація боєприпасів спричиняє механічне порушення ґрунту та може супроводжуватися надходженням до нього продуктів вибуху й інших потенційно токсичних сполук, що здатні негативно впливати на біологічні властивості ґрунтового середовища. Водночас оцінювання наслідків такого впливу часто ґрунтується переважно на визначенні хімічного складу ґрунту, тоді як його безпосередній біологічний ефект залишається недостатньо

© Крупєй К.С., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

охарактеризованим. Особливо пріоритетним є визначення просторової неоднорідності фітотоксичності ґрунту в зоні детонації боєприпасів та встановлення закономірностей її зміни в залежності від відстані від епіцентру вибуху.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінювання біологічних наслідків забруднення ґрунтів унаслідок детонації боєприпасів, зокрема визначення рівня їх фітотоксичності та просторової неоднорідності в зоні ураження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в контексті сучасних завдань екологічного моніторингу та оцінювання стану ґрунтових екосистем, що зазнали впливу воєнних дій. Авторський доробок спрямований на апробацію фітотестування як доступного біологічного інструменту для виявлення функціональних порушень ґрунту після детонації боєприпасів. Поєднання просторового відбору проб із визначенням інтегральної фітотоксичності дасть змогу доповнити результати хімічного аналізу ґрунту та може бути використане для подальшого екологічного обстеження територій, постраждалих унаслідок бойових дій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фітотоксичність ґрунту оцінюють за показниками проростання насіння, росту коренів, пагонів і накопичення біомаси тест-рослин. Дослідження свідчать, що в районах бойових дій вибухові речовини та продукти руйнування військової техніки можуть істотно пригнічувати ці показники. При цьому токсичний ефект залежить як від складу та концентрації забруднень, так і від властивостей ґрунту [1 – 3]. Залишкові продукти розкладання вибухових речовин здатні зберігати токсичний вплив на рослини протягом 170 років, що може суттєво порушувати функціонування агроекосистем [4]. В. В. Дудар (2026) дійшов висновку, що підвищений вміст алюмінію може використовуватися як надійний маркер військово-техногенного забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, особливо у випадках, коли органічні забруднення не виявляються. Концентрація алюмінію у ґрунтах епіцентрів забруднення сягала 168 000 мг/кг, що більш ніж удвічі перевищує природний фон (55 000–75 000 мг/кг), підтверджуючи його антропогенне походження [5]. Виражену залежність між рівнем хімічного забруднення ґрунту та пригніченням розвитку рослин встановили О. В. Коляда та співавт. (2025). Зі збільшенням концентрації нафтопродуктів знижувалася схожість насіння редису та довжина паростків: за концентрації 10 г/кг схожість зменшувалася до 30 %, а за 100 г/кг проростання не відбувалося. Фітотоксичність ґрунту за найвищого рівня забруднення досягала 77–100 %, що свідчить про суттєве погіршення умов для росту рослин [6]. Окрім забруднення ґрунтів продуктами вибухових процесів, важливим чинником антропогенного впливу є потрапляння до них хімічних речовин, що застосовуються під час ліквідації надзвичайних ситуацій. У цьому контексті Н. М. Гринчишин та С. С. Порошенко (2017) встановили, що забруднення ґрунту розчинами піноутворювачів для гасіння пожеж негативно впливає на ріст рослин, а рівень і тривалість фітотоксичної дії залежать від складу поверхнево-активних речовин. Найменшу фітотоксичність серед досліджених засобів виявлено для піноутворювача «БАРС-S1», що обґрунтовує доцільність його використання у природних наземних екосистемах [7].

Отже, аналіз літературних джерел засвідчує, що фітотоксичність ґрунтів, забруднених через техногенний та воєнний вплив, переважно досліджується за окремими показниками росту й розвитку рослин або в контексті визначення конкретних забруднювальних речовин. Водночас недостатньо уваги приділено інтегральній оцінці фітотоксичності та її просторовій диференціації безпосередньо в зоні детонації боєприпасів. Це зумовлює доцільність проведення дослідження фітотоксичності ґрунту на різних відстанях від епіцентру детонації керованої авіаційної бомби (на прикладі прифронтового м. Запоріжжя, Україна).

Мета. Визначити інтегральний показник фітотоксичності ґрунту та оцінити його просторову варіабельність у зоні детонації керованої авіаційної бомби шляхом фітотестування з використанням рослинних тест-об'єктів.

Об'єкт дослідження – ґрунт у зоні детонації керованої авіаційної бомби.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття, полягає в недостатньому вивченні фітотоксичності ґрунту в зоні детонації авіаційних боєприпасів та відсутності даних щодо її просторової диференціації у міру віддалення від епіцентру вибуху.

Новизна. Вперше визначено інтегральний показник фітотоксичності ґрунту в зоні детонації керованої авіаційної бомби та встановлено його неоднорідні зміни в залежності від відстані від епіцентру вибуху.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні фітотестування та інтегрального показника фітотоксичності для комплексної характеристики біологічного стану ґрунту, що зазнав впливу детонації боєприпасу. Використання комплексу показників проростання та росту рослинних тест-об'єктів дає змогу оцінити сумарний фітотоксичний ефект ґрунту та його просторову диференціацію. Отримані результати можуть бути використані для розвитку підходів до біологічного моніторингу ґрунтів, постраждалих через бойові дії.

Матеріали та методи дослідження. *Відбір проб ґрунту.* Місце детонації керованої авіаційної бомби (КАБ) розташовувалося у Вознесенівському

районі м. Запоріжжя у підніжжя дамби біля парку Перемоги. Верхній шар ґрунту представлений темнозабарвленим гумусовим горизонтом, який підстилається щільними глинистими відкладами. Кут нахилу північно-східного схилу, визначений за допомогою цифрового інклінометра, становив 33 °.

Проби ґрунту були відібрані 25 липня 2026 р. через 48 год після детонації КАБ. Температура повітря на момент відбору проб – 24 °С, вітер – 16 км/год, вологість – 60 %, опади відсутні.

Схема відбору проб ґрунту відповідала вимогам міжнародного стандарту ISO 18400-104:2018 (таблиця 1 в ISO) [8]. Розроблений дизайн експерименту базувався на гібридному методологічному підході, що поєднує експертний (цільовий) відбір із моделями систематичного аналізу. Цільовий відбір використовували для визначення конкретного точкового джерела антропогенного забруднення (вирви від КАБ). Для фіксації просторового градієнта забруднення провели одноразовий просторовий відбір проб із використанням лінійних та кругових схем, розгорнутих радіально від епіцентру вирви (0 м) уздовж 4-х основних географічних осей: Північ (N), Південь (S), Схід (E) та Захід (W). Діаметр вирви – 5,2 м. Зразки верхнього шару ґрунту (0-5 см) відбирали лопаткою з нержавіючої сталі через фіксовані просторові інтервали 3, 10, 20 та 50 м уздовж кожного з чотирьох трансект (див. рис. 1).

У кожній точці відбору використовували пластиковий трафарет розміром 10 × 10 см, у межах якого відбирали приблизно 300 г ґрунту та поміщали проби у крафт-пакети. Після кожного забору інструменти обробляли 96 %-м етиловим спиртом і протирали насухо стерильними марлевими серветками. Для встановлення надійного локального фону (контроль) застосовували схему конверта в межах квадратної референтної зони розміром 5 × 5 м, розташованої на відстані 200 метрів з навітряного боку від вирви (у північно-західному напрямку). У межах цієї зони відбирали 5 дискретних референтних зразків (із центру та 4-х кутів), що гарантувало ідентичність геологічних та ґрунтових характеристик, повністю виключаючи ризик перехресного забруднення від шлейфу вибуху.

Оцінка фітотоксичності ґрунту. Фітотоксичність ґрунту оцінювали методом біотестування відповідно до ДСТУ ISO 22030:2007 [9] із використанням тест-культур *Raphanus sativus* L. var. *radicula* (редька посівна), *Lepidium sativum* L. var. *latifolium* (крес-салат) та *Avena sativa* L. (овес посівний). Для досліду використовували необроблене насіння зі схожістю не менше 90 %. У кожну ємність (пластикові стакани) із досліджуваним ґрунтом (по 100 г) висівали по 10 насінин. Вологість субстрату підтримували на рівні 40 % шляхом зволоження дистильованою водою.

Рослини вирощували у фітокамері за температурного режиму 21 °С удень та 18 °С уночі, відносної вологості повітря 80 %, інтенсивності освітлення 25 000 лк і фотоперіоду 14/10 год (день/ніч). Кількість пророслого насіння реєстрували на 3-тю добу для визначення енергії проростання насіння та на 7-му добу для оцінки кінцевої схожості. На 14-ту добу вимірювали довжину кореневої системи та пагонів, після чого визначали біомасу

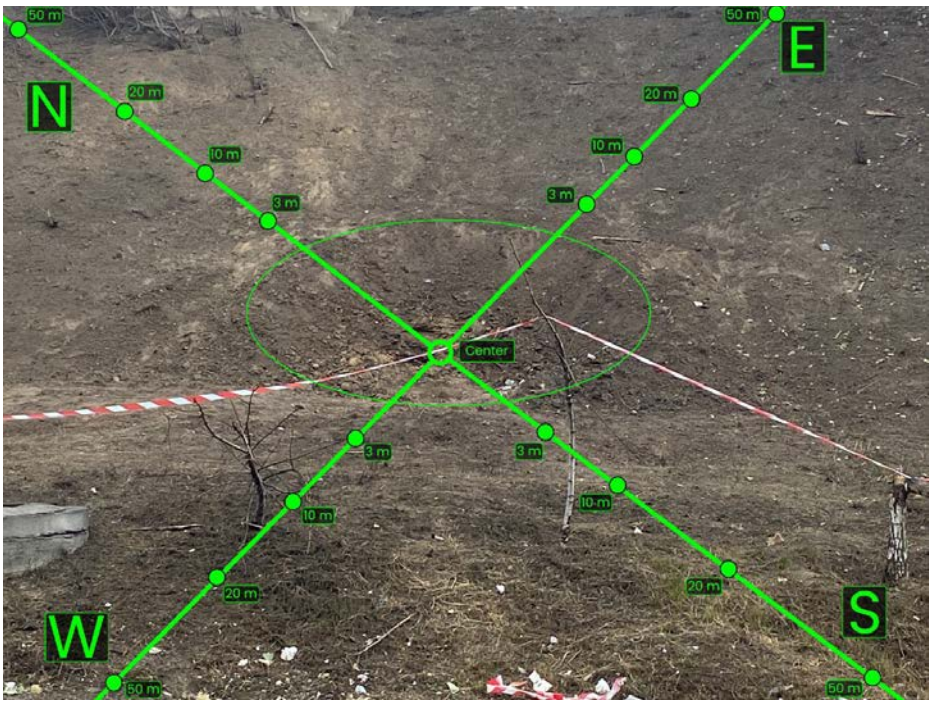


Рис. 1. Схема відбору проб ґрунту в центрі вирви від КАБ та вздовж 4-х трансект

всіх свіжих паростків, фіксували морфометричні зміни тест-рослин / в'янення, а також розраховували інтегральний показник фітотоксичності (ІПФ) за формулою [10, 11]:

$$ІПФ = \sqrt[4]{I_c \times I_{еп} \times I_k \times I_p}$$

де Іс – індекс схожості насіння на 7-му добу (співвідношення частки пророслого насіння у досліді та контролі), %;

Іеп – індекс енергії проростання (відношення кількості пророслого насіння на 3-тю добу у дослідному варіанті до контрольного), %;

Ік – індекс довжини кореня (відношення середньої довжини коренів у дослідному та контрольному варіантах, мм);

Іп – індекс довжини пагона (відношення середньої довжини пагонів у дослідному та контрольному варіантах, мм).

Значення ІПФ інтерпретували відповідно до градацій ступеня фітотоксичності ґрунту, наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Градації ступеня забруднення ґрунтів за інтегрованим показником фітотоксичності [10]

Ступінь загальної фітотоксичності ґрунту	Інтегрований показник фітотоксичності, ІПФ
Фітотоксичність відсутня	>0,90
Слабкий	0,90-0,71
Середній	0,70-0,51
Сильний	0,50-0,31
Дуже сильний	0,30-0,16
Катастрофічний	<0,16

Окрім ІПФ, ступінь токсичності ґрунту може оцінюватися за коефіцієнтом токсичності ґрунту (КЗҐ), який базується на рівні пригнічення росту коренів і пагонів у порівнянні з контролем [12, 13]. Однак для комплексної оцінки впливу забруднення ґрунтів унаслідок бойових дій у цьому дослідженні обрано ІПФ, оскільки він враховує сукупність морфофізіологічних показників рослин (схожість, енергію проростання, довжину коренів і пагонів).

Статистичний аналіз отриманих даних проводили з використанням програмного забезпечення Microsoft Excel 2010 та Statistica 10 [14, 15].

Виклад основного матеріалу. За результатами фітотестування встановлено неоднорідну реакцію тест-рослин на досліджувані ґрунтові зразки, без чіткої монотонної залежності показників росту від відстані до епіцентру детонації (див. табл. 2, рис. 2).

У *Raphanus sativus* L. var. *radicula* довжина коренів у більшості зразків залишалася близькою до контрольного значення (71 мм), однак у західному напрямку на відстані 10–20 м вона знижувалася до 49–45 мм. Одночасно в окремих зразках на 20 м у північному та 20 м у східному напрямках спостерігали навіть перевищення контрольних показників. Для *Lepidium sativum* L. var. *latifolium* характерно виражене пригнічення росту коренів і пагонів: у більшості напрямків їх довжина була нижчою за контрольні значення (52 і 42 мм, відповідно), а в окремих зразках спостерігалося масове в'янення рослин. Найбільш контрастну реакцію виявила *Avena sativa* L.: довжина коренів у дослідних варіантах змінювалася від 52 до 98 мм проти 132 мм у контролі, тоді як довжина пагонів була більш варіабельною і в окремих зразках навіть перевищувала контроль (140 мм). Отже, за показниками росту найбільш чутливою до досліджуваного ґрунту виявилася *L. sativum*, оскільки її реакція супроводжувалася не лише зменшенням довжини коренів і пагонів, а й в'яненням рослин. *R. sativus* характеризувався менш вираженою та просторово неоднорідною реакцією, тоді як *A. sativa* демонструвала значну варіабельність окремих показників. Загалом отримані результати свідчать про просторову неоднорідність фітотоксичного впливу ґрунту та відсутність єдиного радіального градієнта його прояву.

За показником біомаси також встановлено просторову неоднорідність реакції ґрунтових зразків без чіткої залежності від відстані до епіцентру детонації. У *Raphanus sativus* L. var. *radicula* за 256 мг у контролі біомаса в дослідних варіантах змінювалася в межах 160–342 мг. Для *Lepidium sativum* L. var. *latifolium* за 416 мг у контролі цей показник становив 228–416 мг, причому найбільше зниження зафіксовано на 10 м у західному напрямку. У *Avena sativa* L. за 427 мг у контролі біомаса становила 210–427 мг, із найбільшим зниженням у західному та східному напрямках. Найбільш виражене зниження біомаси загалом характерне для *L. sativum*.

Значення ІПФ, визначені для ґрунтових зразків із використанням *Raphanus sativus* L. var. *radicula*, свідчили про переважно відсутню або слабку фітотоксичність (див. табл. 3). У центрі детонації КАБ значення показника ІПФ становило 0,95, що свідчить про відсутність вираженого фітотоксичного ефекту. На північному напрямку ІПФ змінювався від 0,40 на 50 м до 1,00 на 20 м. Найнижче значення зафіксовано на відстані 50 м (0,40), що відповідало сильній фітотоксичності. Водночас на відстані 20 м ІПФ дорівнював 1,00, тобто реакція тест-рослин не відрізнялася від контрольної. У східному секторі значення ІПФ становили 1,07–1,09 на 3–20 м та знижувалися до 0,81 на 50 м.

Отже, у більшості зразків фітотоксичність не виявлялася. У південному напрямку ІПФ перебував у межах 0,91–1,05, що також відповідало відсутності або слабкому прояву токсичності. Найбільш виражена реакція *R. sativus* спостерігалася у західному секторі, де ІПФ становив 0,72–0,90, а на 3 м – 0,72, що відповідає слабкій фітотоксичності. Загалом для *R. sativus* характерною була переважно слабка або

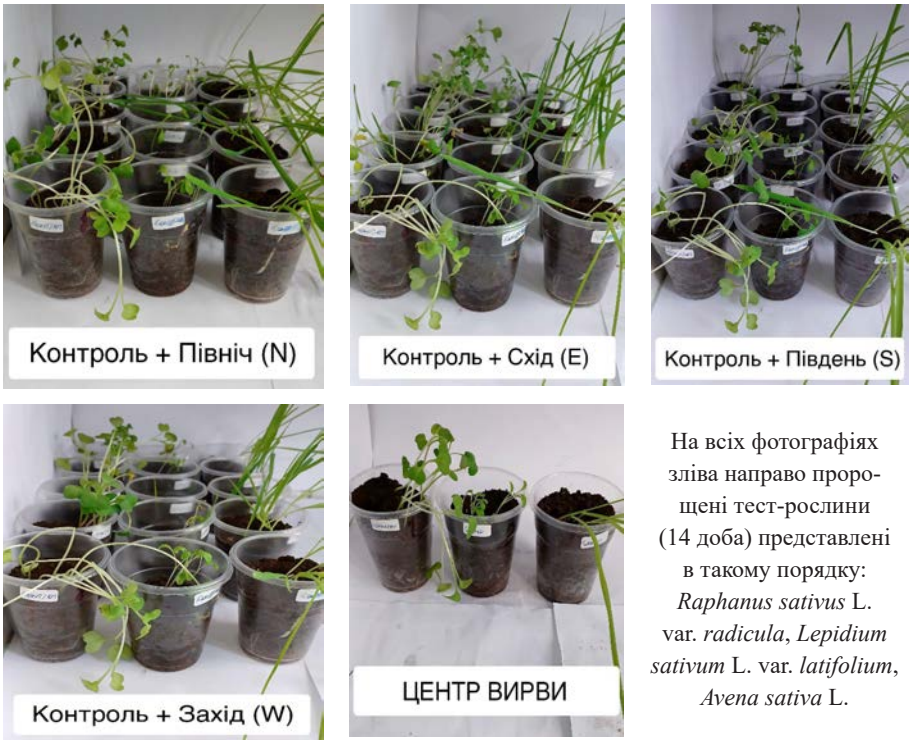
 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Таблиця 2

Вплив досліджуваних зразків ґрунту на довжину кореневої системи та пагонів тест-рослин (14 доба)

Точки відбору проб ґрунту	L коренів, мм ± *m*	L пагонів, мм ± *m*	L коренів, мм ± *m*	L пагонів, мм ± *m*	L коренів, мм ± *m*	L пагонів, мм ± *m*
	Raphanus sativus* L. var. *radicula		***Lepidium sativum* L. var. *latifolium***		***Avena sativa* L.**	
Контроль	71±2,26	91±2,73	52±0,93	42±1,30	132±3,56	140±4,34
Центр вирви	74±2,14	89±3,74	40±1,16	36±0,91	98±1,17	110±4,29
N 3 м	75±2,85	65±1,75	55±2,36 (зав'яло 3 рослини)*	48±0,43 (зав'яло 3 рослини)*	80±2,08	100±2,90
N 10 м	60±1,14	83±4,23	63±1,70	68±2,65	90±2,52	110±6,16
N 20 м	82±5,16	109±4,14	40±1,12	36±1,54	62±1,98	100±6,40
N 50 м	55±2,14 (зав'яло 6 рослин)*	74±1,48 (зав'яло 6 рослин)*	35±0,80	26±0,46	80±2,08	120±4,20
E 3 м	80±3,92	104±4,05	59±0,82	60±1,26	65±1,82	110±5,72
E 10 м	82±2,70	112±5,03	42±1,38	37±0,45	83±4,31	108±3,67
E 20 м	91±4,09	101±3,23	35±0,80 (зав'яло 4 рослини)*	32±0,67 (зав'яло 4 рослини)*	53±3,28	64±1,27
E 50 м	58±1,68 (зав'яло 7 рослин)*	70±3,36 (зав'яло 7 рослин)*	28±0,75 (зав'яло 5 рослин)	21±2,07 (зав'яло 5 рослин)*	80±1,92	100±4,60
S 3 м	75±3,82	73±2,40	35±1,47	26±0,93	62±1,61	154±7,85
S 10 м	78±4,13	75±2,51	34±0,98 (зав'яло 2 рослини)*	20±0,46 (зав'яло 2 рослини)*	66±1,55	154±5,08
S 20 м	71±1,84	94±2,53	39±1,17 (зав'яло 2 рослини)*	18±0,19 (зав'яло 2 рослини)*	73±1,31	96±4,99
S 50 м	79±3,00	100±5,21	33±1,38	22±0,52	67±3,21	83±4,23
W 3 м	62±3,10	82±2,54	41±0,61 (зав'яло 4 рослини)*	29±0,89 (зав'яло 4 рослини)*	52±1,04	73±4,45
W 10 м	49±1,66 (зав'яло 3 рослини)*	75±2,17 (зав'яло 3 рослини)*	29±0,58 (зав'яло 7 рослин)*	22±1,14 (зав'яло 7 рослин)*	68±2,85	94±2,25
W 20 м	45±2,34 (зав'яло 4 рослини)*	67±2,74 (зав'яло 4 рослини)*	зав'яли всі рослини	зав'яли всі рослини	96±3,45	115±5,75
W 50 м	65±2,14	82±5,41	зав'яли всі рослини	зав'яли всі рослини	90±2,07	125±4,12

Примітка: у таблиці наведено середні арифметичні значення (n = 10) ± похибка середнього арифметичного (*m*). L – довжина коренів / пагонів тест-рослин; *в таблиці вказано середнє значення параметрів рослин без урахування тих, що зав'яли.



На всіх фотографіях зліва направо пророщені тест-рослини (14 доба) представлені в такому порядку: *Raphanus sativus* L. var. *radicula*, *Lepidium sativum* L. var. *latifolium*, *Avena sativa* L.

Рис. 2. Тест-рослини на 14-ту добу фітотестування контрольного та дослідних ґрунтових зразків

відсутня фітотоксичність, за винятком північної ділянки на 50 м, де зафіксовано сильний фітотоксичний ефект. Отже, для цього тест-об'єкта чіткої залежності ІПФ від відстані до епіцентру не встановлено.

Фітотестування токсичності ґрунту на *Lepidium sativum* L. var. *latifolium* показало суттєво вищу фітотоксичність порівняно з *R. sativus* (див. табл. 4). У центрі детонації ІПФ становив 0,69, що відповідало середній фітотоксичності. На північному напрямку значення показника були контрастними: від 0,00 на 3 м до 1,15 на 10 м та 0,40 на 50 м. Нульове значення ІПФ на 3 м було зумовлене відсутністю проростання на 3-тю добу. У східному секторі ІПФ змінювався від 0,47 до 0,99, а найбільш виражену токсичність зафіксовано на 50 м (0,47), тоді як на 3 м фітотоксичність практично не проявлялася (ІПФ = 0,99). У південному напрямку ІПФ становив 0,00–0,60, причому найнижче значення також було пов'язане з нульовим показником енергії проростання. У західному секторі виявлено найбільш виражене та стійке пригнічення: ІПФ становив 0,46 на 3 м і знижувався до 0,28 на 10 м; на 20 і 50 м розрахунок ІПФ був неможливим через повне в'янення тест-рослин. Таким чином, найбільш фітотоксичними для *L. sativum* виявилися західний сектор, особливо ділянка на 10 м, а також окремі ділянки північного та південного напрямків.

Таблиця 3

Результати фітотестування токсичності ґрунту після детонації КАБ з використанням *Raphanus sativus* L. var. *radicula*

Точки відбору	Іс	Іеп	Ік	Іп	ІПФ
Центр вирви	1,0	0,8	1,04	0,98	0,95
N 3 м	0,9	0,7	1,06	0,71	0,83
N 10 м	0,7	0,8	0,85	0,91	0,81
N 20 м	0,9	0,8	1,15	1,20	1,00
N 50 м	0,2	0,2	0,77	0,81	0,40
E 3 м	1,0	1,0	1,13	1,14	1,07
E 10 м	0,9	0,9	1,15	1,23	1,04
E 20 м	1,0	1,0	1,28	1,11	1,09
E 50 м	1,0	0,7	0,82	0,77	0,81
S 3 м	0,9	0,9	1,06	0,80	0,91
S 10 м	0,9	0,9	1,10	0,82	0,93
S 20 м	0,9	0,8	1,00	1,03	0,93
S 50 м	1,0	1,0	1,11	1,10	1,05
W 3 м	0,7	0,5	0,87	0,90	0,72
W 10 м	0,8	0,8	0,69	0,82	0,78
W 20 м	0,9	0,8	0,63	0,74	0,76
W 50 м	0,9	0,9	0,92	0,90	0,90

Таблиця 4

Результати фітотестування токсичності ґрунту після детонації КАБ з використанням *Lepidium sativum* L. var. *latifolium*

Точки відбору	Іс	Іеп	Ік	Іп	ІПФ
Центр вирви	0,7	0,5	0,77	0,86	0,69
N 3 м	0,3	0,0	1,06	1,14	0,00
N 10 м	1,0	0,9	1,21	1,62	1,15
N 20 м	1,0	0,3	0,77	0,86	0,67
N 50 м	0,3	0,2	0,67	0,62	0,40
E 3 м	1,0	0,6	1,13	1,43	0,99
E 10 м	0,8	0,6	0,81	0,88	0,76
E 20 м	0,8	0,7	0,67	0,76	0,73
E 50 м	0,6	0,3	0,54	0,50	0,47
S 3 м	0,0	0,0	0,67	0,62	0,00
S 10 м	0,6	0,7	0,65	0,48	0,60
S 20 м	0,5	0,6	0,75	0,43	0,56
S 50 м	0,5	0,4	0,63	0,52	0,51
W 3 м	0,2	0,4	0,79	0,69	0,46
W 10 м	0,1	0,2	0,56	0,52	0,28
W 20 м	0,7	0,6	-*	-*	-*
W 50 м	0,7	0,5	-*	-*	-*

Примітка: *всі рослини зав'яли на 14-ту добу.

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Отримані результати свідчать про значну просторову неоднорідність фітотоксичності ґрунту та відсутність її монотонного зменшення з віддаленням від епіцентру.

При дослідженні *Avena sativa* L. виявлено найвираженішу фітотоксичну реакцію серед 3-х тест-культур (див. табл. 5). Уже в центрі детонації ІПФ становив 0,49, що відповідало сильній фітотоксичності. На північному напрямку значення показника змінювалися від 0,00 на 3 м до 0,65 на 50 м; на 10 м ІПФ становив 0,53, а на 20 м – 0,43, що відповідало середній та сильній фітотоксичності відповідно. У східному секторі ІПФ перебував у межах 0,00–0,53, при цьому найбільш виражене пригнічення спостерігалося на 10 м (ІПФ = 0,00) та 20 м (0,44). У південному напрямку значення становили 0,00–0,57, а найбільша фітотоксичність зафіксована на 3 м (ІПФ = 0,00) та 10 м (0,41). Найнижчі значення в західному секторі становили 0,30 на 3 м та 0,34 на 10 м, що відповідало дуже сильній та сильній фітотоксичності, відповідно. На 20 і 50 м ІПФ підвищувався до 0,48 і 0,54, проте фітотоксичний ефект залишався середнім. Отже, *A. sativa* характеризувалася найбільш вираженою та поширеною реакцією на досліджуваний ґрунт: у всіх дослідних зразках ІПФ був нижчим за 0,71, тобто фітотоксичність щонайменше відповідала середньому рівню.

Порівняння результатів 3-х тест-культур показало виражену міжвидову диференціацію чутливості до досліджуваного ґрунту. Найменший прояв фітотоксичності встановлено для *R. sativus*, для якого більшість значень ІПФ перебували в межах, що відповідали відсутності або слабкій фітотоксичності. *L. sativum* характеризувався істотно більшою варіабельністю реакції та переважанням середньої й сильної фітотоксичності, з особливо вираженим ефектом у західному секторі.

Головні висновки. За ІПФ ряд тест-культур за чутливістю можна представити як *A. sativa* > *L. sativum* > *R. sativus*. Найчутливішою тест-культурою виявилася *A. sativa*: для неї ІПФ у всіх дослідних варіантах був нижчим за 0,71, а на окремих ділянках – ≤ 0,30. Просторовий розподіл ІПФ не демонстрував єдиного радіального градієнта. Найнижчі значення показника реєструвалися не лише поблизу епіцентру, а й на відстані 10–50 м, тоді як окремі ділянки, розташовані ближче до центру детонації, характеризувалися слабкою або навіть відсутньою фітотоксичністю. Особливо показовим є західний сектор, де для *L. sativum* і *A. sativa* зафіксовано одні з найнижчих значень ІПФ. Виявлена підвищена фітотоксичність у західному секторі може бути пов'язана з особливостями мікрорельєфу ділянки (кут нахилу північно-східного схилу становив 33°) та напрямком вітру під час детонації, що потенційно могли впливати на просторовий перерозподіл продуктів вибуху й забруднювальних компонентів ґрунту. Водночас у східному та південному напрямках також спостерігалися локальні осередки вираженого пригнічення. Отже, отримані дані свідчать про мозаїчний характер просторового розподілу фітотоксичності ґрунту, що не дозволяє характеризувати її лише відстанню від епіцентру детонації. Подібні неоднорідні результати хімічного забруднення ґрунту були і раніше встановлені науковцями. Так, фундаментальні дослідження Інженерного корпусу армії США (USACE) доводять, що забруднення вибуховими речовинами має гетерогенний точковий характер, який називається ефектом "hotspots" [16, 17]. Концентрація токсиканту в одній точці може перевищувати 10 000 мг/кг, тоді як у зразку ґрунту, відібраному лише за 10 сантиметрів поруч, забруднення може бути майже нульовим [18].

Таблиця 5

Результати фітотестування токсичності ґрунту після детонації КАБ з використанням *Avena sativa* L.

Точки відбору	Іс	Іеп	Ік	Іп	ІПФ
Центр вирви	0,5	0,2	0,74	0,79	0,49
N 3 м	0,5	0,0	0,61	0,71	0,00
N 10 м	0,5	0,3	0,68	0,79	0,53
N 20 м	0,5	0,2	0,47	0,71	0,43
N 50 м	0,7	0,5	0,61	0,86	0,65
E 3 м	0,5	0,4	0,49	0,79	0,53
E 10 м	0,5	0,0	0,63	0,77	0,00
E 20 м	0,7	0,3	0,40	0,46	0,44
E 50 м	0,5	0,2	0,61	0,71	0,46
S 3 м	0,5	0,0	0,47	1,10	0,00
S 10 м	0,5	0,1	0,50	1,10	0,41
S 20 м	0,7	0,4	0,55	0,69	0,57
S 50 м	0,6	0,2	0,51	0,59	0,44
W 3 м	0,2	0,2	0,39	0,52	0,30
W 10 м	0,4	0,1	0,52	0,67	0,34
W 20 м	0,9	0,1	0,73	0,82	0,48
W 50 м	0,7	0,2	0,68	0,89	0,54

Перспективи використання результатів дослідження. За результатами дослідження розроблено навчальний відеофільм, присвячений методиці відбору проб ґрунту на територіях, що зазнали впливу бойових дій, який може бути використаний у навчальному процесі під час підготовки фахівців екологічного та біологічного профілю [URL: https://youtu.be/GidcdbGnE58?si=lXk539oIdMSKskWt]. Отримані результати можуть бути використані під час проведення екологічного моніторингу та біологічної оцінки ґрунтів, постраждалих унаслідок детонації боєприпасів. Перспективою подальших досліджень є встановлення взаємозв'язку між рівнем фітотоксичності різних типів ґрунтів та їх фізико-хімічними властивостями, вмістом потенційно токсичних елементів і залишкових продуктів вибуху, а також дослідження просторової динаміки цих показників у часі.

Література

1. Panz K., Miksch K., Sójka T. Synergetic toxic effect of an explosive material mixture in soil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013. Vol. 91. P. 555–559. DOI: https://doi.org/10.1007/s00128-013-1099-z.
2. Hu X., Wang J., Lv Y., Liu X., Zhong J., Cui X., Zhang M., Ma D., Yan X., Zhu X. Effects of heavy metals/metalloids and soil properties on microbial communities in farmland in the vicinity of a metals smelter. *Frontiers in Microbiology*. 2021. Vol. 12. Article 707786. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.707786.
3. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., Vynokurova N., Sementsova K., Mariychuk R. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 10. Article 1614. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101614.
4. Bausinger T., Preuß J. Environmental assessment of former military sites: A review on the fate of energetic compounds. *Science of The Total Environment*. 2012. Vol. 416. P. 1–17.
5. Дудар В. В. Алюміній як індикаторний маркер залишкового забруднення ґрунтів вибуховими речовинами. Екологічні науки. 2026. № 3(66). С. 16–24. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.2.
6. Коляда О. В., Коробкова Г. В., Коляда В. П. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту, забрудненого нафтопродуктами. Український журнал природничих наук. 2025. № 12. С. 371–378. DOI: https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.37.
7. Гринчишин Н. М., Порошенко С. С. Фітотоксичність ґрунту, забрудненого розчинами піноутворювачів для гасіння пожеж. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2017. Вип. 27(6). С. 77–80.
8. ISO. Soil quality – Sampling – Part 104: Guidance on the distribution and application of sampling programmes (ISO 18400-104:2018). Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
9. ДСТУ ISO 22030:2007. Якість ґрунту. Біологічні методи. Хронічна токсичність для вищих рослин (ISO 22030:2005, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2007.
10. Визначення забруднення ґрунту і води гербіцидами сім-тріазинової групи за допомогою хлорели звичайної та методики фітотестування (методичні рекомендації) / за ред. чл.-кор. НААН М. Мірошниченка. Харків : Стильна типографія, 2024. 34 с.
11. Коваль Ф. Ф. Оцінка фітотоксичності орних ґрунтів Валківської громади за різними методичними підходами. *Агрохімія і ґрунтознавство* : міжвідом. темат. наук. зб. / ННЦ "ІҐА ім. О. Н. Соколовського". Харків : 2025. Вип. 99. С. 70–82. DOI: 10.31073/acss99-08.
12. Крайнюков О. М., Кривицька І. А. Спосіб визначення ступеня забрудненості ґрунтів : пат. на корисну модель № 113560 Україна. № u2016 11123; заявл. 10.11.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. 3 с.
13. Джура Н. М., Романюк О. І., Гонсьор Ян, Цвілинюк О. М., Терек О. І. Використання рослин для рекультивації ґрунтів, забруднених нафтою і нафтопродуктами. *Екологія та ноосферологія*. 2006. Т. 17, № 1–2. С. 55–60.
14. Голованова І. А., Бєлікова І. В., Ляхова Н. О. Основи медичної статистики : навчальний посібник для аспірантів та клінічних ординаторів. Полтава : ВДНЗУ «УМСА», 2017. 113 с. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://elib.umsa.edu.ua/bitstream/umsa/10614/1/Posibnik_Statistika_17.pdf
15. Яровий А. Т., Страхов Є. М. Багатовимірний статистичний аналіз : начально-методичний посібник для студентів математичних та економічних фахів. Одеса : Астропринт, 2015. 132 с. Режим доступу: http://ouek.onu.edu.ua/uploads/courses/msa/Yarovoy_Strakhov_MSA.pdf
16. Jenkins T. F., Hewitt A. D., Grant C. L., Thiboutot S., Ampleman G., Walsh M. E., Ranney T. A., Ramsey C. A., Palazzo A. J., Pennington J. C. Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges. *Chemosphere*. 2006. Vol. 63, No. 8. P. 1280–1290. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.066.
17. Jenkins T. F., Hewitt A. D., Walsh M. E., Ranney T. A., Ramsey C. A., Grant C. L., Bjella K. L. Representative sampling for energetic compounds at military training ranges. *Environmental Forensics*. 2005. Vol. 6, No. 1. P. 45–55. DOI: 10.1080/15275920590913912.
18. Abdul-Karim N., Blackman C. S., Gill P. P., Morgan R. M., Matjacic L., Webb R., Ng W. H. Morphological variations of explosive residue particles and implications for understanding detonation mechanisms. *Analytical Chemistry*. 2016. Vol. 88, No. 7. P. 3899–3908. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b00080.

Дата першого надходження статті до видання: 13.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026