ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 504.53:355.01(477)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.10

ОЦІНЮВАННЯ ҐРУНТІВ, ПОРУШЕНИХ ВОЄННИМИ ДІЯМИ, ТА ВИБІР СПОСОБУ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ: ОГЛЯД І КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ

Гладчук М.М. (orcid.org/0009-0009-4429-3224),
Марків В.С. (orcid.org/0000-0003-1294-7827),
Марків Б.А. (orcid.org/0009-0002-5388-667X),
Боднар О.І. (orcid.org/0000-0002-8416-5464),
Горин О.І. (orcid.org/0000-0003-1265-6253),
Жирська Г.Я. (orcid.org/0000-0002-7042-8956),
Герц Н.В. (orcid.org/0000-0002-3574-2288),
Герц А.І. (orcid.org/0000-0001-9133-0897),
Конончук О.Б. (orcid.org/0000-0001-9790-4812)
Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
вул. Максима Кривоноса, 2, 46027, м. Тернопіль
gladchuk@tnpu.edu.ua, viktor.markiv@tnpu.edu.ua, danyliak@chem-bio.com.ua, bodnar@tnpu.edu.ua, horynoi@tnpu.edu.ua, zhyrska14@gmail.com, herts_nv@chem-bio.com.ua, herts@chem-bio.com.ua, kononchuk@chem-bio.com.ua

Воєнні дії спричиняють комплексне порушення ґрунтового покриву: утворення вирв і перемішування генетичних горизонтів, ущільнення важкою технікою, вигоряння органічної речовини, а також хімічне забруднення металами, нафтопродуктами, продуктами горіння та залишками вибухових речовин. Ці зміни мають виражену просторову неоднорідність, тому усереднені показники для ділянки не є достатньою підставою для рішення щодо її подальшого використання. Мета роботи – на основі аналізу наукових публікацій 2022–2026 рр., нормативних документів та міжнародних методичних підходів обґрунтувати поетапну модель оцінювання ґрунтів, які порушені воєнними діями, і вибору способу їх подальшого використання. Узагальнення польових досліджень в Україні засвідчує, що в чорноземних ґрунтах переважають фізичні порушення, тоді як забруднення важкими металами здебільшого має локальний характер і концентрується в місцях знищення техніки, падіння літальних апаратів та підриву боєприпасів. Запропонована модель адаптує рамку оцінювання земель FAO та підхід TRIAD до умов воєнних порушень. Вона передбачає обов'язкове підтвердження безпеки території, стратифікацію ділянки за типом воєнного впливу, мінімальний базовий скринінг із розширенням аналізів лише за виявленого ризику та віднесення кожної однорідної частини до однієї з чотирьох категорій придатності: придатна; придатна за умов; потребує відновлення; непридатна для запланованої мети. Якщо даних для надійного рішення бракує, встановлюють тимчасовий статус «даних недостатньо». Категорію визначає найсуттєвіше обмеження для конкретного способу використання, а не інтегральний бал. Розглянуто можливість раннього використання *Miscanthus* × *giganteus* як рослини-індикатора і фіторемедіанта та окреслено межі такого підходу, акцентуючи увагу, що задовільний ріст толерантної культури не свідчить про безпечність ґрунту для харчових культур. Модель призначена для подальшої польової верифікації та економічного порівняння варіантів оцінювання і відновлення земель.
Ключові слова: воєнні дії, порушені ґрунти, забруднення важкими металами, оцінювання придатності земель, фітотестування, фіторемедіація, *Miscanthus* × *giganteus*.

Assessment of soils affected by military actions and selection of their further use: a review and conceptual model. Gladchuk M., Markiv V., Markiv B., Bodnar O., Horyn O., Zhyrska H., Herts N., Herts A., Kononchuk O.
Military actions disturb soils in several ways at once: cratering and mixing of genetic horizons, compaction by heavy vehicles, loss of organic matter in fires, and chemical contamination by metals, petroleum products, combustion products, and explosive residues. These changes are spatially heterogeneous, so a field-average value is not a sufficient basis for deciding on further land use. Based on an analysis of publications from 2022–2026, regulatory documents, and international methodological frameworks, we substantiate a stepwise model for assessing war-affected soils and selecting their further use. A synthesis of field studies in Ukraine shows that physical disturbance prevails in Chernozems, whereas heavy metal contamination is mostly local and concentrated at sites of destroyed vehicles, aircraft crashes, and ordnance detonation. The proposed model adapts the FAO land evaluation framework and the TRIAD approach to war-related disturbance. It requires confirmation of site safety, stratification of the site by type of military impact, a minimum baseline screening with further analyses added only when a risk is detected, and assignment of each homogeneous unit to one of four suitability categories: suitable; conditionally suitable; requires restoration; unsuitable for the intended use. If the evidence is insufficient for a reliable decision, a temporary status of "insufficient data" is assigned. The category is determined by the most severe limitation for the specific intended use rather than by an integral score. The early use of *Miscanthus* × *giganteus* as an indicator and phytoremediation plant is considered, together with its limitations: satisfactory growth of a tolerant crop does not prove that the soil is safe for food crops. The model is intended for field verification and for economic comparison of assessment and restoration options.
Key words: military actions, disturbed soils, heavy metal contamination, land suitability assessment, phytotesting, phytoremediation, *Miscanthus* × *giganteus*.

© Гладчук М.М., Марків В.С., Марків Б.А., Боднар О.І., Горин О.І., Жирська Г.Я., Герц Н.В., Герц А.І., Конончук О.Б., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Після завершення активних бойових дій Україна постане перед потребою ухвалювати рішення щодо значних площ земель, що зазнали обстрілів, руху важкої техніки, пожеж і руйнування промислових об'єктів [1–3]. Частину таких ділянок можна буде повернути до попереднього використання, інші потребуватимуть відновлення, зміни цільового призначення або тривалого моніторингу. Обґрунтоване рішення в кожному випадку можливе лише за умови достовірної оцінки фактичного стану ґрунту.

Актуальність дослідження. Поширений підхід, за якого відібрану пробу ґрунту порівнюють із нормативами гранично допустимих концентрацій речовин, для воєнно порушених земель є недостатнім. Ґрунт може не містити забруднювачів у кількостях, що вищі за нормативні, але бути сильно ущільненим або втратити гумусовий горизонт. Водночас окрема вирва чи місце знищення техніки може становити небезпеку на тлі допустимих середніх показників для поля [4–6]. Отже, польове обстеження, лабораторний аналіз і практичне рішення мають утворювати єдину послідовність [7, 8].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана в межах проєкту молодих учених «Природоорієнтована ремедіація деградованих земель міскантусом гігантським (*Miscanthus* × *giganteus*) і його меліорантами з використанням підходів циркулярної біоекономіки» (д. р. № 0126U002851). Запропонована модель є методичною основою для вибору ділянок, проведення польових досліджень і оцінювання результатів фіторемедіації в межах цього проєкту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після 2022 р. кількість публікацій про вплив війни на ґрунти України істотно зросла. Опубліковано огляди загальних екологічних наслідків війни [3, 9, 10], оцінки впливу на ґрунтовий покрив на національному рівні [1, 11] та праці про методи дистанційного виявлення порушень [4, 12, 13]. Польові дослідження з кількісними даними про вміст металів у вирвах і на місцях знищення техніки виконано переважно на Харківщині [4, 6, 13–16], значно менше – на Півночі та Півдні України [17–23]. Регіональні оцінки забруднення важкими металами проводились також на територіях Сумської, Чернігівської, Дніпропетровської, Миколаївської та Запорізької областей [19, 20, 24]. Узагальнено дані про вміст мікроелементів у ґрунтах, що зазнали воєнного впливу [24] і токсикологічний стан розмінованих чорноземів [15]. Окремим масштабним джерелом вторинного забруднення стало руйнування Каховської ГЕС, унаслідок якого донні відклади, що містили понад 80 тис. т важких металів, могли поширитися на заплави та сільськогосподарські землі нижче за течією [25, 26]. Практичні засади фітотехнології на основі *Miscanthus* × *giganteus* для пост-військових земель, зокрема результати польових дослідів у Долині (Івано-Франківська обл.) та Ворзелі (Київська обл.), узагальнено в посібнику [26]. Окремий напрям становлять дослідження поведінки вибухових речовин і постдетонаційних залишків у ґрунті [27, 28]. У 2026 р. оприлюднено огляд із попередніми результатами визначення 2,4,6-тринітротолуолу (TNT) та продуктів його перетворення, гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-триазин (RDX) та октагідро-1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетреазоцин (HMX) та інших речовин у воєнно порушених ґрунтах України [29]. Методичну основу оцінювання становлять міжнародні стандарти пробовідбору, біотестування, оцінювання біодоступності та екологічного ризику [7, 8, 30], а також рамки оцінювання якості ґрунту та придатності земель [31–33]. Можливості й обмеження фіторемедіації, зокрема за участю *Miscanthus* × *giganteus* на колишніх військових об'єктах, розглянуто в працях [34–37].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні праці здебільшого описують окремі компоненти проблеми, а саме типи порушень, вміст окремих забруднювачів або окремі методи аналізу. Недостатньо розробленим залишається перехід від різнорідних польових і лабораторних даних до обґрунтованого рішення про використання чи відновлення конкретної ділянки [8, 31, 38]. Відкритим є й питання про те, чи може пробне вирощування рослини-фіторемедіанта після мінімального скринінгу скоротити обсяг вартісних попередніх досліджень без збільшення ризику [34, 35, 39].

Метою статті є аналіз наукових публікацій, нормативних документів і міжнародних методичних підходів для узагальнення сучасних даних про воєнні порушення ґрунтів України та обґрунтування поетапної моделі оцінювання таких ґрунтів і вибору способу їх подальшого використання, зокрема з урахуванням можливості раннього застосування *Miscanthus* × *giganteus*.

Новизна. Рамку оцінювання земель FAO [31] і підхід TRIAD [8] адаптовано до умов воєнних порушень. На відміну від класичної рамки, модель (1) передбачає обов'язкову стратифікацію ділянки за типом воєнного впливу (вирва, колія, згарище, місце розливу, фон) та окреме оцінювання кожної порушеної однорідної частини, (2) передбачає тимчасовий статус «даних недостатньо», який забороняє автоматично визнавати ділянку безпечною, і (3) включає обережний варіант раннього використання рослини-фіторемедіанта як біологічного індикатора після розмінування та мінімального скринінгу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Робота є наративним (оглядово-аналітичним) дослідженням з елементами концептуального моделювання. Пошук публікацій проводили у Scopus, Web of Science Core Collection, PubMed, Google Scholar

та електронному каталозі Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського; бібліографічні відомості та DOI додатково перевіряли на офіційних сайтах журналів і видавців. Останній контрольний пошук виконано 29 вересня 2026 р. за поєднаннями ключових слів «war», «military», «armed conflict», «crater», «soil contamination», «heavy metals», «explosives», «TNT», «RDX», «HMX», «Ukraine», «phytoremediation», «Miscanthus» та їх українськими відповідниками. Для емпіричних даних основну увагу зосереджено на працях 2022–2026 рр.; базові методичні праці, стандарти й нормативні документи включали незалежно від року. До аналізу залучали праці з польовими або лабораторними даними про ґрунти воєнно порушених територій, огляди та нормативні документи. Публікації без первинних даних або без опису методів відбору проб використовували лише як допоміжні. Після перевірки відповідності темі та усунення дублювань до огляду включено 70 джерел, наведених у списку літератури. Оскільки робота є наративним, а не систематичним оглядом, формальну схему PRISMA і кількісний метааналіз не застосовували. Для обґрунтування моделі використано також підручники з ґрунтознавства, державні стандарти України, міжнародні стандарти ISO та матеріали FAO, UNEP і US EPA.

Модель ґрунтується на трьох засадах. По-перше, властивості ґрунту як природного тіла відокремлюють від наслідків воєнного впливу. По-друге, оптимальний вміст елементів живлення не розглядають як доказ відсутності небезпеки. По-третє, придатність визначають не загалом, а для конкретної мети, зокрема, для вирощування харчових чи технічних культур, лісорозведення, рекреації або проведення відновлювальних робіт [8, 31, 32].

Виклад, основного матеріалу.

1. Типи воєнних порушень ґрунтів

Ґрунт є функціональною системою, в якій мінеральна частина, органічна речовина, ґрунтовий розчин, повітря й біота взаємопов'язані; зміна однієї складової позначається на функціонуванні всієї системи [33, 40, 41]. Воєнні дії порушують цю систему одночасно на кількох рівнях. Першим і найпомітнішим наслідком зазвичай є фізичні порушення такі, як утворення вирв, перемішування і перекриття генетичних горизонтів (бомбтурбація), ущільнення, оголення поверхні [4, 5, 42]. Винесення на поверхню матеріалу нижніх горизонтів погіршує умови росту рослин навіть за відсутності токсикантів, адже втрачається гумусовий шар із найоптимальнішою структурою та найвищою біологічною активністю [5, 42]. Надалі змінюється водний режим. Так, на одних ділянках посилюється ерозія, на інших відбувається застій вологи. Пожежі та знищення рослинного покриву ці процеси прискорюють [4, 6, 42].

Хімічне забруднення, на відміну від фізичних порушень, зазвичай концентрується на невеликих за площею, але потенційно небезпечних ділянках біля знищеної техніки, складів, місць розливу пального та уламків боєприпасів [4, 27, 43]. Перелік аналізів доцільно формувати за ймовірним джерелом. Після пожежі техніки визначають не лише метали, а й нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні; на місцях детонації враховують склад боєприпасу та вибухових речовин [27, 43]. Основні типи воєнного впливу та пріоритетні показники для їх оцінювання наведено в таблиці 1.

Біологічні зміни (зниження активності мікроорганізмів, чисельності безхребетних, швидкості розкладання рослинних решток тощо) виявляються не завжди одразу [21, 33]. За узагальненими даними, біо-

Таблиця 1

Основні типи воєнного впливу на ґрунт і пріоритетні показники оцінювання

Тип впливу	Польові ознаки	Зміни в ґрунті	Пріоритетні показники
Вибух (вирва)	Вирва, викинутий ґрунт, уламки	Перемішування і перекриття горизонтів, втрата гумусового горизонту, локальне забруднення, зміна рельєфу і стоку	Будова профілю, глибина порушення, окремі проби з вирви, валу і периферії; метали та інші речовини за типом боєприпасу
Рух важкої техніки	Колії, ущільнена поверхня, застій води	Зменшення пористості, погіршення інфільтрації та росту коренів	Щільність складення, опір пенетрації, інфільтрація, розвиток коренів
Пожежа	Попіл, обвуглення, знищений рослинний покрив	Втрата органічної речовини, зміна кислотності, надходження продуктів горіння	Органічний вуглець, pH, нафтопродукти, ПАВ, метали
Розлив пального	Пляма, запах, пригнічена рослинність	Фітотоксичність, нестача кисню, міграція легких фракцій	Нафтопродукти, леткі сполуки (за потреби), фітотоксичність, глибина проникнення
Знищена техніка, уламки	Уламки, згарище, розлив технічних рідин	Підвищений вміст металів і нафтопродуктів на окремих ділянках, вертикальна міграція	Cd, Cu, Pb, Zn, Ni, Cr та ін.; нафтопродукти; пошарові проби
Руйнування об'єкта	Будівельні рештки, відходи, невідомі матеріали	Суміш металів, пального, будівельних і промислових забруднювачів	Історія об'єкта, цільовий аналіз речовин, окреме дослідження відходів

Джерело: складено авторами за даними [4–6, 27, 42].

маса мікроорганізмів поблизу вирв може зменшуватися удвічі зі зниженням ферментативної активності, а в окремих районах Чернігівської та Харківської областей із сильним ущільненням і забрудненням зафіксовано майже повну відсутність мезофауни [26]. Ці оцінки потрібно вважати орієнтовними, оскільки первинні польові дані для частини локацій залишаються обмеженими. Жоден окремо взятий біологічний показник не встановлює причини порушення, адже пригнічення росту коренів може бути зумовлене токсичністю, підкисленням, засоленням, нестачею вологи або ущільненням. Тому результати біотестування необхідно інтерпретувати лише разом із фізичними і хімічними даними [21, 44].

2. Узагальнення емпіричних даних про забруднення ґрунтів України

Аналіз опублікованих польових досліджень (табл. 2) засвідчує кілька закономірностей. По-перше, у чорноземних ґрунтах Харківщини вміст важких металів біля більшості вирв від артилерійських снарядів і реактивних систем залпового вогню близький до фонового або перевищує його лише в 1,1–1,5 раза [4, 6]. По-друге, найвищі перевищення зафіксовано на окремих порушених ділянках — у місцях знищення техніки, падіння літальних апаратів і підриву боєприпасів, де вміст окремих елементів може в десятки разів перевищувати фон або ГДК [6, 13, 18]. По-третє, у легких за гранулометричним складом ґрунтах сигнал забруднення може бути слабо вираженим унаслідок механічного перемішування матеріалу [17]. По-четверте, навіть гуманітарне розмінування може спричиняти вторинне перерозподілення потенційно токсичних елементів [18]. По-п'яте, у розмінованих чорноземах Харківщини підвищення (у 1,3–2,6 раза) вмісту Pb, Co, Fe і Zn щодо довоєнного рівня не досягло критичних значень, а вміст рухомих форм Cd, Pb, Ni, Co і Fe з часом знижувався, що автори пояснюють високою буферною здатністю чорноземів [15]. Натомість у промислових регіонах Дніпропетровської, Миколаївської та Запорізької областей воєнне забруднення накладається на довоєнне техногенне, і вміст Pb може перевищувати ГДК у 3–5 разів [20, 24].

Отже, для більшості воєнно порушених сільськогосподарських земель визначальним обмеженням, ймовірно, буде фізична деградація та втрата родючості, а не суцільне хімічне забруднення [6]. Водночас наявність окремих порушених ділянок із багаторазовими перевищеннями підтверджує, що усереднення даних для всього поля неприпустиме. Ці висновки безпосередньо обґрунтовують дві ключові вимоги моделі: стратифікацію ділянки за типом впливу та визначення категорії за найсуттєвішим обмеженням. Попередні дослідження воєнно порушених ґрунтів України вже підтвердили наявність TNT, продуктів його перетворення, RDX і HMX, однак їх розподіл є різко неоднорідним [29]. Польовий дослід з нафтовим забрудненням чорнозему також показав залежність природного самоочищення від початкового навантаження [45].

3. Методичні засади інтерпретації даних

Під час оцінювання необхідно розрізняти три поняття: тип ґрунту (генетична належність), стан (актуальні зміни – ущільнення, підкислення, засолення, втрата органічної речовини, забруднення) і придатність (можливість використання ділянки певним способом) [31, 32, 46]. Той самий ґрунт може бути придатним для технічних культур, але тимчасово непридатним для вирощування харчової продукції.

Коректне оцінювання стану потребує порівняльної (фонової) ділянки з подібним типом ґрунту, рельєфом і попереднім використанням. За її відсутності використовують довоєнні дані, регіональні фонові значення та нормативи [7, 47]. Порівняння ґрунтів різного генезису чи гранулометричного складу, навіть відібраних поруч, некоректне, оскільки ємність поглинання і рухомість металів залежать від вмісту і мінералогічного складу глинистої фракції [30, 40].

Щодо хімічних речовин потрібно розрізняти валовий вміст, рухомі форми і біодоступність. Валовий вміст характеризує запас речовини в ґрунті, рухомі форми - потенціал міграції, а біодоступність залежить від конкретного організму та шляху надходження; усі три показники визначаються кислотністю, вмістом органічної речовини, гранулометричним і мінералогічним складом [30, 43]. Надійність висновку зростає, якщо хімічні дані, результати біотестів і польові екологічні спостереження узгоджуються між собою. Саме на цьому ґрунтується підхід TRIAD [8]. Для первинного оцінювання повний комплекс TRIAD не є обов'язковим, однак принцип кількох незалежних ліній доказів доцільно зберегти.

В Україні затверджено нормативи гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах [48] та методику визначення розміру шкоди, завданої землям і ґрунтам унаслідок збройної агресії [49]. Протимінні роботи й повернення земель до безпечного використання визначено також Національною стратегією протимінної діяльності до 2033 року [50]. На рівні Європейського Союзу Директива (ЄС) 2025/2360 запроваджує спільну рамку моніторингу та стійкості ґрунтів [51]. Проте для рішення про подальше використання ділянки нормативних значень недостатньо, адже їх потрібно розглядати разом із просторовими даними, властивостями ґрунту, шляхами впливу та біологічною реакцією [8, 30, 31].

4. Поетапна модель оцінювання

Модель передбачає поступове розширення обсягу досліджень: детальніші аналізи додають лише тоді, коли вони можуть змінити рішення щодо використання або відновлення ділянки [7, 8, 31]. Загальну послідовність наведено на рисунку 1.

Етап 1. Безпека території. Польові роботи можливі лише після розмінування та отримання дозволу;

Таблиця 2

Узагальнення польових досліджень забруднення ґрунтів України внаслідок воєнних дій (2022–2026 рр.)

№ джерела	Регіон, ґрунти	Тип впливу	Досліджені показники	Основні результати
[14]	Харківська обл. (Новий Коротич, Мала Рогань)	Обстріли; порівняння обстріляних і необстріляних ділянок	Гранулометричний склад; Mn, Fe, Co, Cu, Cd, Cr, Pb, Ni; NDVI	На обстріляних ділянках зросла частка дрібних фракцій і вміст важких металів; ефект найвиразніший у Новому Коротичі
[4]	Харківська обл.	Вирви, рух техніки, бомбтурбація (ДЗЗ + польові дані)	Площі порушень; Cd, Cu, Pb, Zn	Виявлено 420 615 вирв; 3411 га порушено технікою; бомбтурбація на 4212 га. У всіх відібраних вирвах – збагачення Cd, Cu, Pb, Zn, переважно в 1,1-1,5 раза щодо фону
[6]	Харківська обл., 8 ділянок; чорноземи, фаеоземи	Авіабомби, ракети, артилерія, РСЗВ, знищена техніка	Cd, Cu, Pb, Ni, Zn, Cr, Sr; магнітні параметри	Біля вирв від артилерії та РСЗВ вміст металів переважно був близьким до фону; біля крилатої ракети й авіабомби – у 1,1–1,3 раза вищим. На місці падіння гелікоптера Cd сягав 57,8 мг/кг (близько 12 фонів), Cu – 71,5 мг/кг (4,1 фону), Zn – 114,2 мг/кг (2,2 фону); біля знищеного танка простежено міграцію нафтопродуктів у глибину
[13]	Харківська обл.	Уламки знищеної техніки на с.-г. угіддях	Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn	Перевищення ГДК для Cd, Cu, Pb, Zn – до 62 разів у місцях розташування уламків
[17]	Північна Україна; дерново-підзолисті ґрунти	Поле бою, місце знищення боєприпасів, ракетний удар	Магнітна сприйнятливість; As, Ba, Cu, Fe, Pb, Zn	Підвищення магнітної сприйнятливості, корельоване з As, Ba, Cu, Fe, Pb, Zn; на ділянці ракетного удару в піщаному ґрунті забруднення не виявлено
[18]	Південна Україна; с.-г. угіддя	Заміновані, вручну розміновані ділянки, місця підриву	Cr, Ni, Cd, Cu, Mn, Co, Ba, Al; pH, EC, гранулометрія (50 проб)	На місцях підриву окремі значення перевищували природний фон понад у 25 разів; 68 % проб перевищували фон або норматив щонайменше за одним елементом
[22]	Дніпропетровська обл.; сільськогосподарські землі	Ракетні вирви на с.-г. землях	Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, Mn; ^{137}Cs; фітотоксичність (пшениця)	Збагачення вирв металами, часто понад фон і орієнтири; ^{137}Cs підвищений без значного радіологічного ризику; підкислення й ущільнення; Pb пригнічував пшеницю
[23]	Київська обл., поблизу Гостомеля	Ґрунт у зоні вибухів, уламки ракет	Co, Ni	Ni до 408 мг/кг у ґрунті зони вибухів проти 36 мг/кг у ґрунті без вибухів; в уламках Co 73–589, Ni 110–577 мг/кг
[11, 16]	Харківська обл., 10 дослідних ділянок	Згоріла техніка, бомбардування, артилерійські обстріли	Pb, Cu, Zn та ін.	Середній вміст Pb перевищував ГДК у 2,8 раза, Zn – у 1,2–1,4 раза; Cu – у 1,45 раза, із перевищенням на 7 із 10 ділянок
[15]	Харківська обл. (Чкалівська громада); чорноземи	Розміновані с.-г. угіддя	Валові та рухомі форми Pb, Co, Fe, Zn, Cd, Ni, Cr, Mn, Cu	Pb, Co, Fe і Zn перевищували довоєнний рівень відповідно у 1,4; 1,3; 1,6 і 2,6 раза, але не досягали критичних значень; рухомі форми Cd, Pb, Ni, Co і Fe з часом знижувалися
[19]	Чернігівська, Сумська та Дніпропетровська обл.	Місця вибухів, вирви	Pb, Ni, Mn, Zn, Cu	У Дніпропетровській обл. Pb сягав 3,9 ГДК, Ni – 1,8 ГДК, Mn – 1,4 ГДК; інтегральний екологічний ризик оцінено як високий для Дніпропетровської та Сумської і середній для Чернігівської обл.
[20]	Миколаївська, Дніпропетровська, Запорізька обл.	Бойові дії в промислових регіонах	Pb, Zn, Cu, фториди, нафтопродукти	Дніпропетровська обл.: Pb до 3 ГДК, фториди – до 1,5 ГДК. Миколаївська обл.: Pb до 5 ГДК, Zn, Cu, фториди й нафтопродукти – приблизно на 25 % вище нормативу. Запорізька обл.: Pb до 11,17 ГДК; Zn і фториди – до 1,5 ГДК; нафтопродукти – на 35 %, фосфати – на 30 % вище нормативу
[26]	Київська обл. (Ворзель); супіщаний опідзолений ґрунт	Пост-військова ділянка (активні бойові дії 2022 р.)	pH, гумус, N, P_2O_5; елементний склад (РФА)	pH(KCl) 4,78; гумус 1,16 %; більшість елементів у межах нормативів, підвищений валовий вміст Mn і Cu
[21]	Київська обл., Бучанський р-н, с. Торф'яне; дерново-підзолистий супіщаний ґрунт	Мінометні й артилерійські обстріли; вирва та прилегла територія	Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb; pH, гумус; фітотоксичність	Через рік після обстрілів локально підвищився вміст рухомих форм металів; коефіцієнт концентрації щодо фону був найбільшим для Zn (6–14), Cr (7–9) і Pb (4–8); для Cu, Zn, Cd та Pb перевищення ГДК не зафіксовано
[29]	Воєнно порушені ділянки України; проби 2022–2025 рр.	Бойові дії; залишки вибухових речовин	TNT, продукти його перетворення, RDX, HMX та інші вибухові сполуки	Попередній скринінг підтвердив наявність вибухових сполук і виражену просторову неоднорідність; для частини проб зафіксовано перевищення ризик-орієнтованих скринінгових рівнів

Джерело: узагальнено авторами за публікаціями, наведеними в першому стовпці.

за наявності нерозірваних боєприпасів або нестійких конструкцій роботи припиняють. Жодні лабораторні показники не можуть бути підставою для пропуску цього етапу [2, 52].

Етап 2. Заплановане використання та вихідні дані. Спочатку визначають заплановане використання, оскільки одна й та сама частина території може мати різну придатність для харчових культур, технічних культур, лісорозведення чи рекреації. Перед обстеженням збирають картографічні матеріали, супутникові знімки, довоєнні відомості про ділянку та доступні дані про бойові події [4, 12, 13]. Дані дистанційного зондування дають змогу виявляти вирви, колії та уламки техніки і спрямовувати пробовідбір [4, 13], однак не замінюють вимірювань: координати можуть бути неточними, а частина подій є незафіксованою.

Етап 3. Поділ на фонові й порушені однорідні частини. Ділянку поділяють на відносно однорідні частини за типом ґрунту і видом впливу; вирви, згарища, місця стоянки техніки, колії та неушкоджені частини не об'єднують в одну змішану пробу [4, 7].

Етап 4. Польовий опис і пробовідбір. Описують профіль, потужність гумусового горизонту, забарвлення, структуру, щільність, вологість, наявність коренів, уламків і сторонніх включень, запах [40, 46]. Для сільськогосподарського оцінювання основним є орний або кореневмісний шар, проте біля вирв, місць розливу чи похованих матеріалів проби відбирають і з глибших шарів; глибину визначають за метою дослідження та можливим шляхом міграції забруднювача [6, 7]. Фонові ділянки характеризують змішаними пробами, а для кожної порушеної однорідної частини складають окремий план пробовідбору за ймовірним джерелом впливу; такі проби не об'єднують із фоновими [7].

Етап 5. Мінімальний скринінг. Він має виявити головне обмеження та визначити потребу в цільовому розширенні досліджень. Мінімальний скринінг охоплює чотири модулі: фізичний стан, загальні хімічні властивості, цільовий аналіз забруднювачів і біологічну дію. Орієнтовний склад показників наведено в таблиці 3; його коригують залежно від типу ґрунту, ймовірного джерела забруднення та запланованого використання [7, 8, 31].

Загальні хімічні властивості і забруднювачі оцінюють окремо, хоча обидва модулі спираються на хімічні аналізи. Перший характеризує стан самого ґрунту за pH, електропровідністю, вмістом органічного вуглецю та основних елементів живлення. Другий є цільовим, а перелік показників формують за ймовірним джерелом воєнного впливу. До його первинного скринінгу доцільно включати важкі метали (Pb, Cd, Cu, Zn та інші за ситуацією), оскільки вони не розкладаються, тривалий час зберігаються у ґрунті, можуть переходити в рослини та воду, а для їх визначення існують стандартизовані методи й нормативні орієнтири [43, 47, 48]. Після розливу пального, пожежі або руйнування промислового об'єкта перелік розширюють нафтопродуктами, продуктами горіння та іншими речовинами, характерними для конкретного джерела [27, 42, 43].

Для рослинних тестів в Україні чинні стандарти ДСТУ ISO 11269-1 (інгібування росту коренів) і ДСТУ ISO 11269-2 (проростання і ранній ріст вищих рослин), а вибір біотестів для екотоксикологічної характеристики ґрунтів регламентує ДСТУ ISO 17616 [44, 61, 62]. Отже, використання рослин як індикаторів має нормативно-методичну основу. Біологічний модуль доцільно доповнювати простими польовими методами біоіндикації за ґрунтовою фауною. Для обліку дощових червів у межах ділянки закладають 10 ґрунтових монолітів розміром 20 × 20 × 20 см і вручну вибирають особин. Результат порівнюють із фоновою ділянкою та попередніми обліками; 16 і більше особин у моноліті (≥ 400 ос./м²) можна використовувати як орієнтир високої чисельності, але універсальні межі залежать від ґрунту, сезону та землекористування [26, 53].

Таблиця 3

Базовий скринінг і умови розширення досліджень

Блок	Базовий скринінг	Умови розширення
Будова і фізичний стан	Будова профілю, потужність гумусового горизонту, гранулометричний склад, структура, щільність або опір пенетрації, ознаки перезволоження	Вирви, глибокі колії, перемішування горизонтів, ерозія, пригнічений ріст коренів
Загальні хімічні властивості	pH, електропровідність (засолення), органічний вуглець, основні елементи живлення	Значна відмінність від фонового ґрунту або від вимог культури
Цільовий аналіз забруднювачів	Цільовий перелік за джерелом; для первинного скринінгу металів – Pb, Cd, Cu, Zn та інші за ситуацією	Перевищення нормативу, ділянка з підвищеним вмістом, висока рухомість, ризик надходження у воду, пил чи врожай
Біологічна дія	Проростання насіння, довжина коренів, ранній ріст рослин порівняно з контрольним ґрунтом; облік дощових червів (10 монолітів 20 × 20 × 20 см)	Хімічні дані не пояснюють стану рослин, потрібно підтвердити сумарну токсичність або оцінити хід відновлення (аналіз нематодних угруповань, мікробна біомаса)
Якість даних*	Повторності, контрольні проби, координати, опис методів, фонова ділянка	Рішення з високими наслідками або розбіжність результатів різних методів

Джерело: складено авторами за даними [7, 8, 26, 30, 44, 53].* – наскрізна вимога до всіх модулів, а не окремий модуль

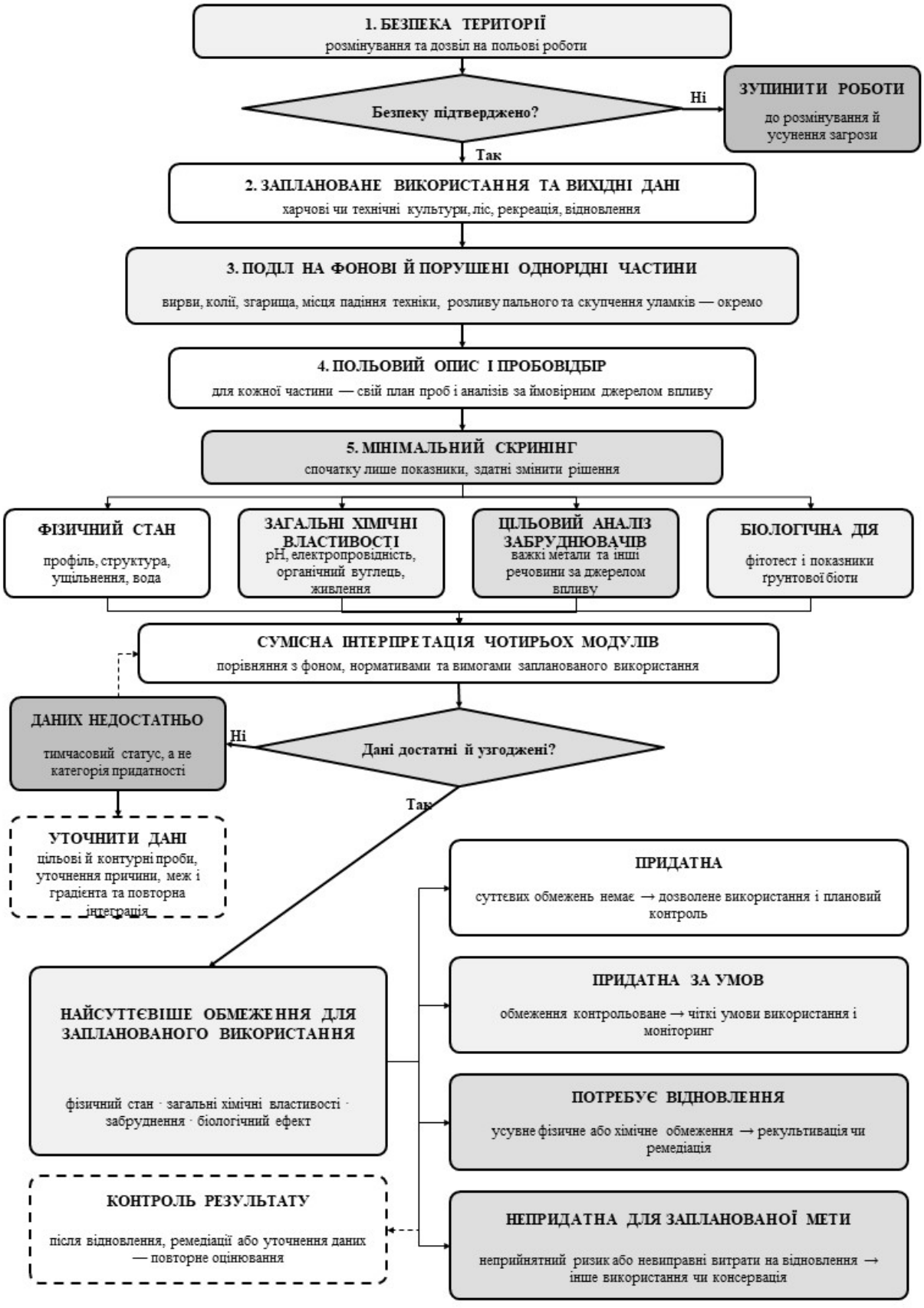

Рис. 1. Багаторівнева схема оцінювання ґрунтів, порушених воєнними діями

Більш чутливим, але одночасно більш трудомістким індикатором є структура угруповань ґрунтових нематод (індекси зрілості, структури та збагачення), яка реагує на порушення й початок відновлення раніше, ніж рослинність чи хімічні показники [26, 54]. Такі методи дешеві, легко поєднуються з агрохімічним пробовідбором і придатні для повторного моніторингу в тих самих точках.

5. Категорії придатності та правило найсуттєвішого обмеження

Після мінімального скринінгу результати чотирьох модулів інтерпретують спільно, порівнюють із фоном, нормативами та вимогами запланованого використання. Якщо відомостей для надійного рішення бракує або результати різних методів суперечать один одному, застосовують тимчасовий статус «даних недостатньо» і проводять цільове уточнення. За достатніх і узгоджених даних визначають найсуттєвіше обмеження та переходять до категоризації. Остаточний висновок має відповідати на чотири питання: чи можна використовувати ділянку, для чого саме, яке обмеження залишається і які подальші дії потрібні [8, 31, 32]. Для цього запропоновано чотири описові категорії придатності (табл. 4), співвіднесені з класами рамки FAO [31].

Правило, за яким категорію визначає найсуттєвіше обмеження, відповідає методу максимального обмеження, який широко застосовують у практиці оцінювання земель за рамкою FAO [31, 55]. Для воєнно порушених земель воно має особливе значення: якщо на окремій однорідній частині підтверджено неприйнятний ризик для харчової продукції, висока родючість інших частин цього не компенсує. Водночас такий результат не є підставою автоматично вилучати з використання всю територію: межі проблемної частини уточнюють контурними пробами й оцінюють її окремо [6–8]. Вирва, колія, згарище або місце падіння техніки є просторовою одиницею обстеження, тоді як забруднення — одним із можливих результатів аналізу цієї одиниці. Кожній однорідній частині присвоюють одну з чотирьох категорій придатності; якщо даних бракує, для неї встановлюють тимчасовий статус «даних недостатньо». Для окремих забруднювачів межі між категоріями можна прив'язати до встановлених технологічних порогів. Польовий дослід на важкосуглинковому чорноземі показав прийнятне самоочищення протягом двох років за внесення нафти 1,6 л/м², тоді як за 6,4 і 25,6 л/м² залишковий вміст вуглеводнів був несприятливим для тест-рослин і потребував стимулювання біодеградації [26, 45]. У термінах запропонованої моделі це відповідає переходу від категорії «придатна за умов» до категорії «потребує відновлення».

Поточну придатність необхідно відрізняти від потенційної. Ділянка, яка нині потребує відновлення через ущільнення, після розущільнення, відновлення рослинного покриву та перевірки водопроникності підлягає повторному оцінюванню. Прогноз має сенс лише за визначеного заходу, строку і критерію успіху [31, 32, 41].

6. Вибір заходів відновлення

Захід відновлення добирають відповідно до причини обмеження. Вапнування усуває надмірну кислотність, але не ущільнення; розпушування відновлює пористість, але не зменшує вмісту свинцю; внесення органічних матеріалів поліпшує структуру і водоутримувальну здатність, однак може змінювати рухомість металів [30, 41, 56]. Тому для кожного заходу заздалегідь визначають показник контролю (табл. 5).

Економічну доцільність потрібно оцінювати від початку. Для невеликої однорідної частини з підтвердженим забрудненням видалення або ізоляція забрудненого матеріалу можуть бути ефективнішими за оброблення всього поля, тоді як на значних площах із помірним забрудненням доцільніше розглядати фітостабілізацію, технічні культури або поетапне відновлення. Порівнюють повну вартість аналізів, робіт, моніторингу, недоотриманої продукції та поводження з біомасою чи відходами [31, 35, 57]. За узагальненими європейськими даними, 80,6 % державних витрат на забруднені ділянки припадало на заходи ремедіації, 15,1 % — на обстеження

Таблиця 4

Категорії придатності та тимчасовий статус «даних недостатньо»

Категорія або статус	Клас FAO	Зміст	Практичне рішення
Придатна	S1	Суттєвих обмежень для заявленого використання не виявлено	Використання з регулярним періодичним контролем
Придатна за умов	S2–S3	Помірне обмеження, яке контролюється агротехнічними або захисними заходами	Використання з чітко визначеними умовами та моніторингом
Потребує відновлення	N1	Поточний стан не дає змоги надійно використовувати ділянку, але обмеження усувне	Відновлення або ремедіація, після чого – повторне оцінювання
Непридатна для запланованої мети	N2	Ризик або витрати на відновлення надмірні для цього способу використання	Інше використання, консервація, ізоляція або інженерне рішення
Даних недостатньо	Не є класом FAO	Тимчасово бракує інформації або результати різних методів не узгоджуються	Виконують цільові чи контурні аналізи, повторний відбір проб і після цього повторюють оцінювання

Джерело: складено авторами; класи FAO наведено за [31].

Таблиця 5

Зв'язок між обмеженням, заходом відновлення та показником контролю

Основне обмеження	Можливі заходи	Показник успішності
Ущільнення, колії	Контрольоване розпушування, обмеження руху техніки, глибококореневі культури	Зменшення опору пенетрації, зростання інфільтрації, глибше проникнення коренів
Втрата гумусового горизонту	Повернення або нанесення родючого шару, планування, постійний рослинний покрив	Збільшення потужності функціонального шару, відновлення структури і рослинності
Ерозія	Трав'яний покрив, мульчування, контурні смуги, локальні інженерні заходи	Зменшення змиву, частки оголеної поверхні та винесення частинок
Підкислення або засолення	Вапнування, промивання, дренаж, кальцієві меліоранти залежно від причини	Нормалізація pH чи електропровідності, поліпшення росту чутливих рослин
Підтверджене хімічне забруднення однорідної ділянки	Очищення, видалення або ізоляція забрудненого матеріалу в уточнених межах	Межі забруднення уточнено, шлях впливу перекрито, контрольні проби відповідають запланованому використанню
Дифузне забруднення металами	Іммобілізація, фітостабілізація, фітоекстракція, зміна використання або поєднання методів	Зменшення рухомої частки або запасу в кореневій зоні, відсутність токсичного ефекту, визначено спосіб поводження з біомасою
Причина не встановлена	Не розпочинати масштабних робіт; уточнити межі, повторити пробовідбір, застосувати цільові аналізи й біотести	Результати відтворюються, встановлено чинник, що визначає рішення

Джерело: складено авторами за даними [30, 35, 41, 57].

і 4,3 % – на подальший догляд та повторне освоєння [58]. Натомість вирощування *Miscanthus* × *giganteus* на землях несільськогосподарського призначення, попри збитковість першого року, стає рентабельним із третього року вегетації; за внесення біочару дохід на третій рік перевищував контроль на 46,8 % (5 % біочару) та 97,7 % (10 % біочару) [26, 59]. Для України окремою обов'язковою статтею витрат є гуманітарне розмінування: у березні 2026 р. середня вартість робіт за програмою компенсації для агровиробників становила 59 тис. грн/га [60]. Цей показник характеризує витрати на безпеку доступу до земель, а не вартість відновлення властивостей ґрунту.

7. Miscanthus* × *giganteus* як рослина-індикатор і фіторемедіант

Повне оцінювання великих неоднорідних територій потребує значної кількості проб, аналізів і повторних обстежень [7, 35, 43]. Звідси постає практичне питання: чи можна після розмінування та мінімального скринінгу закладати пробні посіви рослини-фіторемедіанта, використовуючи її реакцію як одну з ранніх ліній доказів. Науковим підґрунтям цього є те, що проростання, ріст коренів і рання біомаса вже застосовуються як стандартизовані показники токсичності ґрунту [44, 61, 62], а рослина інтегрально реагує на водний режим, ущільнення, кислотність, засолення, нестачу елементів живлення та біодоступну частку забруднювачів [30, 44].

Miscanthus × *giganteus* – багаторічна енергетична культура другого покоління, яка зберігає продуктивність на одному місці до 20 років, переносить засолення, тимчасове перезволоження та pH ґрунту в межах 4,5–7,5 і формує 10–20 т сухої маси з 1 га [26]. Для неї є значний масив даних щодо вирощування на забруднених і колишніх військових землях. У вегетаційних дослідах із ґрунтами колишніх військових об'єктів (Кам'янець-Подільський, Україна; Сляч, Словаччина) рослина задовільно росла, а більша частина металів і металоїдів залишалася в коренях з обмеженим переміщенням у надземну біомасу [36]. Порівняльні дослідження ґрунтів військових і гірничодобувних об'єктів підтвердили толерантність культури до комплексного забруднення As, Pb, Zn, Cu та іншими елементами [37]. У польовому досліді на військовій базі Форт-Райлі (США) з валовим вмістом Pb 900–1500 мг/кг міскантус розглядали як культуру для фітостабілізації [63]. Реакція рослини на ґрунти військових об'єктів залежить від їх агрохімічних властивостей: застосування регуляторів росту поліпшувало параметри біомаси на родючому ґрунті (Долина, Україна), але не на бідному (Градчани, Чехія) [64]. Міскантус також виявився порівняно толерантним до забруднення дизельним паливом і нафтопродуктами, хоча зі зростанням концентрації біомаса знижувалася [65, 66]. Ефективність фіторемедіації може підвищуватися за інокуляції ризобактеріями, що стимулюють ріст рослин, і внесення біовугілля, зокрема отриманого із самої біомаси міскантусу [67, 68]. Водночас якість такого біовугілля залежить від сировини. Біовугілля із забруднених кореневищ містило потенційно токсичні елементи, тоді як отримане з надземної біомаси – ні [69]. У найтривалішому польовому досліді (Франція, з 2010 р.) на ґрунтах, забруднених Pb, Cd і Zn, урожайність міскантусу (близько 14 т/га сухої маси) не відрізнялася від контрольної ділянки, коефіцієнти біоконцентрації та транслокації залишалися меншими за одиницю, а вміст органічного вуглецю й ферментативна активність ґрунту поступово зростали [26]. В Україні фіторемедіацію техногенно і воєнно забруднених ґрунтів з використанням трав'янистих, деревних та енергетичних культур також

досліджують [52, 56, 70]. На пост-військовій території в Долині (дослід з 2018 р.) найбільший приріст біомаси міскантусу забезпечувало комбіноване внесення вапна, органічного та мінерального добрив [26]. У 2023 р. польовий дослід закладено у Ворзелі (Київська обл.) на супіщаному опідзоленому ґрунті з низьким вмістом гумусу (1,16 %) і мінерального азоту (30,1 мг/кг), pH(KCl) 4,78 та підвищеним вмістом Mn і Cu. На другий рік вегетації врожайність за внесення 5 % біочару становила 2,98 т/га сухої маси проти 1,43 т/га в контролі, тоді як доза 10 % (1,56 т/га) і мікробний біостимулятор (0,93 т/га) не мали переваг [26]. Отже, оптимальну дозу меліоранту необхідно визначати на пробних ділянках, що узгоджується з логікою запропонованої моделі.

Настанови US EPA передбачають перед застосуванням фіторемедіації характеристику ділянки, визначення забруднювача і мети очищення, лабораторний скринінг, закладання пробних польових ділянок і подальший моніторинг [34]. Огляди польових фітотехнологій наголошують на значенні біодоступності, довготривалої ефективності та поводження з біомасою [35, 39, 57]. З огляду на це пропонуємо скорочений алгоритм. Після розмінування визначають тип воєнного впливу, pH, електропровідність, гранулометричний склад і найбільш імовірні забруднювачі. Далі закладають невеликі дослідні ділянки з *Miscanthus* × *giganteus* і контрольним варіантом. Упродовж вегетації оцінюють приживлюваність, висоту, кількість пагонів, стан листків, розвиток кореневої системи та біомасу, а паралельно – вміст металів у ґрунті та органах рослини, що дає змогу розрахувати коефіцієнти біоконцентрації і транслокації та встановити, чи відбувається вилучення, закріплення в ризосфері або накопичення в надземній частині [36, 39, 57]. Інформативність рослинного тесту та його обмеження узагальнено в таблиці 6.

Задовільний ріст толерантної культури не означає, що ґрунт безпечний для харчових культур: рослина може мати здоровий вигляд і водночас накопичувати метали в коренях. Пригнічення росту не встановлює причини без додаткових вимірювань, а коренева система характеризує лише освоєний нею шар. Обов'язковою умовою є також безпечне поводження із забрудненою біомасою, зокрема аналіз золи та продуктів піролізу під час її енергетичного використання [35, 39, 68].

8. Обмеження запропонованого підходу

Запропонована модель є концептуальною основою для польового випробування, а не затвердженим порядком оцінювання. Межі між категоріями потребують уточнення для різних типів ґрунтів, природних зон і способів використання; для частини показників необхідно встановити регіональні фонові значення та уніфікувати лабораторні процедури [1, 11, 32]. Модель визначає, за яких умов потрібно аналізувати вибухові речовини, поліциклічні ароматичні вуглеводні та діоксини, але не встановлює для них порогів категорій придатності. Такі пороги потребують окремих аналітичних програм і ризик-орієнтованих критеріїв. Оцінювання екологічного стану ґрунту не замінює розмінування, санітарно-гігієнічного висновку та спеціальної оцінки ризику для здоров'я людини [2, 8, 52].

Головні висновки. 1. Узагальнення польових досліджень 2022-2026 рр. засвідчує, що на воєнно порушених землях України, зокрема в чорноземних ґрунтах, переважають фізичні порушення (бомбтурбація, ущільнення, втрата гумусового горизонту), тоді як забруднення важкими металами здебільшого локальне. Біля більшості вирв вміст близький до фону або перевищує його в 1,1–1,5 раза, а багаторазові перевищення характерні для місць знищення техніки, падіння літальних апаратів і підриву боєприпасів.

2. Просторова неоднорідність порушень робить неприйнятним усереднення даних для ділянки: вирви, згарища, колії, місця розливу і фонові частини необхідно досліджувати як окремі об'єкти.

3. Обґрунтовано п'ять послідовних етапів оцінювання: 1) безпека території; 2) заплановане використання та вихідні дані; 3) поділ на фонові й порушені однорідні частини; 4) польовий опис і пробовідбір; 5) мінімальний скринінг. Після п'ятого етапу результати фізичного модуля, модуля

Таблиця 6

Інформативність рослинного тесту та необхідні доповнення

Рослина може показати	Рослина не може надійно показати	Необхідне доповнення
Здатність середовища забезпечувати проростання, ріст коренів і формування біомаси	Причину пригнічення: токсикант, ущільнення, кислотність, засолення чи нестача вологи	Базовий набір фізичних і хімічних показників
Сумарну дію біодоступної частки забруднювачів	Загальний запас речовини та ризик для людини, ґрунтових вод або організмів з іншими шляхами надходження	Аналіз ґрунту, за потреби – води, пилу, інші біотести
Придатність конкретного виду для фітостабілізації або фітоекстракції	Довготривалу ефективність технології на всій неоднорідній площі	Контрольні ділянки, повторності, багаторічний моніторинг
Накопичення речовин у коренях і надземній біомасі (за аналізу тканин)	Безпечність біомаси для спалювання, піролізу, переробки чи повернення на поле	Баланс мас, аналіз біомаси, золи, біовугілля та викидів

Джерело: складено авторами за даними [34, 35, 39, 68].

загальних хімічних властивостей, цільового аналізу забруднювачів і біологічної дії інтерпретують спільно, перевіряють достатність та узгодженість даних, визначають найсуттєвіше обмеження, категорію придатності й потребу у відновленні та контролі. Модель адаптує рамку FAO і підхід TRIAD до умов воєнних порушень.

4. Запропоновано чотири категорії придатності – придатна; придатна за умов; потребує відновлення; непридатна для запланованої мети, які співвіднесені з класами FAO, а також окремий тимчасовий статус – «даних недостатньо». Категорію визначає найсуттєвіше обмеження для конкретного способу використання; кожен висновок супроводжують зазначенням головної проблеми, дозволеного використання, заходу відновлення та критерію повторного оцінювання.

5. *Miscanthus* × *giganteus* може бути використаний як рання біологічна лінія доказів і засіб фітостабілізації за умови попереднього розмінування, мінімального скринінгу загальних хімічних властивостей і ймовірних забруднювачів, наявності контрольних ділянок і моніторингу вмісту забруднювачів у ґрунті та біомасі; задовільний ріст культури не є підставою для висновку про безпечність ґрунту для вирощування рослин харчового використання.

Перспективи використання результатів дослідження. Наступним етапом є верифікація моделі на ділянках із різним типом воєнного впливу, зокрема з використанням наявних дослідних платформ із *Miscanthus* × *giganteus* (Ворзель, Долина) [26], а також порівняння повного попереднього обстеження з підходом «мінімальний скринінг + пробне вирощування *Miscanthus* × *giganteus*». Для цього необхідно встановити, які морфометричні та фізіологічні показники міскантусу найкраще відображають стан ґрунту, простежити динаміку вмісту забруднювачів у ґрунті та біомасі й оцінити економічну ефективність скороченого підходу [34, 35, 61].

Подяка. Дослідження виконано за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України в межах реалізації проєкту молодих вчених «Природоорієнтована ремедіація деградованих земель міскантусом гігантським (*Miscanthus* × *giganteus*) і його меліорантами з використанням підходів циркулярної біоекономіки» (державний реєстраційний номер 0126U002851).

Література

1. Балюк С. А., Кучер А. В., Солоха М. О., Соловей В. Б. Оцінка впливу збройної агресії Російської Федерації на ґрунтовий покрив України. *Український географічний журнал*. 2024. № 1. С. 7–18. DOI: https://doi.org/10.15407/ugz2024.01.007
2. UNEP. The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review. Nairobi : United Nations Environment Programme, 2022. URL: https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review
3. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M. et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19, № 1. Article 1. DOI: https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y
4. Bonchkovskyi O., Ostapenko P., Bonchkovskyi A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Article 178594. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594
5. Hupy J. P., Schaetzl R. J. Introducing bombturbation: a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*. 2006. Vol. 171. P. 827–835. DOI: https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228053.08087.19
6. Hlavatskyi D., Bonchkovskyi O., Ostapenko P., Bondar K., Bakhmutov V., Bonchkovskyi A., Menshov O., Poliachenko I., Shvaiko V. Classification of war-induced soil contamination by the type of military impact in Eastern Ukraine. *Land Degradation & Development*. 2026. Vol. 37, № 10. P. 4794–4820. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.70397
7. ISO 18400-104:2018. Soil quality. Sampling. Part 104: Strategies. Geneva: International Organization for Standardization, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/65223.html
8. ISO 19204:2017. Soil quality. Procedure for site-specific ecological risk assessment of soil contamination (soil quality TRIAD approach). Geneva: International Organization for Standardization, 2017. URL: https://www.iso.org/standard/63989.html
9. Yutilova K., Shved E., Rozantsev G., Adamski A. Russia-Ukraine war impacts on environment: warfare chemical pollution and recovery prospects. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. Vol. 32, № 10. P. 5685–5702. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-025-36098-9
10. Leal Filho W., Fedoruk M., Paulino Pires Eustachio J. H. et al. The environment as the first victim: the impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. Article 121399. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121399
11. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L. et al. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13. Article 1614. DOI: https://doi.org/10.3390/land13101614
12. FAO. Kharkiv Oblast's changing landscape: a geospatial study of agricultural impact 2021–2024. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. DOI: https://doi.org/10.4060/cd6502en
13. Solokha M., Melnyk O., Cannon N., Horton M., Datsko O., O'Connor D. et al. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: a case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 995. Article 180105. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105
14. Solokha M., Pereira P., Symochko L., Vynokurova N., Demyanyuk O., Sementsova K. et al. Russian-Ukrainian war impacts on the environment. Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 902. Article 166122. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122
15. Smirnova K., Baliuk S., Kucher A. et al. Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: a case study of the Chkalovsk territorial community. Scientific Horizons. 2024. Vol. 27, № 11. P. 90–104. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor11.2024.90
16. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Ponomarenko R. V., Asotskyi V. V., Darmofal E. A., Kalynovskyi A. Y., Maniuk V. V. Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2025. Vol. 34, № 2. P. 304–317. DOI: https://doi.org/10.15421/112526

17. Bondar K. M., Bakhmutov V., Poliachenko I., Hlavatskyi D., Menshov O. Magnetic and chemical signals of post-blast residue in soil: a case study from northern Ukraine. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 977. Article 179342. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179342
18. Splodytel A., Sut-Lohmann M., Rintoul-Hynes N. Environmental risks of humanitarian demining: evidence from a war-affected region (Ukraine). *Science of the Total Environment*. 2026. Vol. 1046. Article 181958. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2026.181958
19. Yashchenko L., Androshchuk O., Vasylenko L., Chornoivan Y. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 15. P. 18–27. DOI: https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3
20. Bulba I., Drobitko A., Zadorozhnii Y., Pismennyi O. Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. Scientific Horizons. 2024. Vol. 27, № 7. P. 107–117. DOI: https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107
21. Дмитренко О. В., Дем'янюк О. С., Погоріла Л. Г. та ін. Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу воєнних дій. *Агроекологічний журнал*. 2023. № 4. С. 89–96. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758
22. Skwarek E., Babenko L., Futorna O., Voytenko L., Wiśniewska M., Vasyuk V. et al. Soil contamination by metals and radionuclides in missile-affected areas: radiological risk assessment and phytotoxic effects on wheat plants. Environmental Geochemistry and Health. 2026. Vol. 48. Article 488. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-026-03375-6
23. Bida I., Moliszewska E., Matik K., Ślusarczyk A., Pawliczek D., Havryliuk O. et al. The resistance of biohumus microbiome to cobalt and nickel compounds. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 10437. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-88601-4
24. Datsko O., Melnyk O., Kovalenko I. et al. Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2025. Vol. 53. Article 14328. DOI: https://doi.org/10.15835/nbha53114328
25. Shumilova O., Sukhodolov A., Osadcha N. et al. Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*. 2025. Vol. 387. P. 1181–1186. DOI: https://doi.org/10.1126/science.adn8655
26. Використання вдосконаленої фітотехнології із застосуванням міскантусу для відновлення пост-військових земель: посібник / за ред. В. Підліснюк. Тернопіль: ФОП Осадца Ю. В., 2026. 95 с. URL: https://library.tnpu.edu.ua/images/stories/vudannja_tnpu/2026_vudannja_pdf/Herc_26.pdf
27. Pichtel J. Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: a review. *Applied and Environmental Soil Science*. 2012. Article 617236. DOI: https://doi.org/10.1155/2012/617236
28. Bondar K. M., Kyrychenko A., Tashyrev O., Poliachenko I., Bakhmutov V., Sachko A. et al. Fate of post-blast residue in soils from an armed conflict zone determined by magnetic, microbiological, and ecotoxicological assessments. Environmental Geochemistry and Health. 2026. Vol. 48. Article 595. DOI: https://doi.org/10.1007/s10653-026-03497-x
29. Dziubii O., Semerád J., Chrzanowski Ł., Cajthaml T. Soil contamination by military explosives: a review of environmental fate, toxicity, and preliminary findings from war-affected Ukraine. Journal of Hazardous Materials Advances. 2026. Vol. 23. Article 101472. DOI: https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2026.101472
30. ISO 17402:2008. Soil quality. Requirements and guidance for the selection and application of methods for the assessment of bioavailability of contaminants in soil and soil materials. Geneva: International Organization for Standardization, 2008. URL: https://www.iso.org/standard/38349.html
31. FAO. A Framework for Land Evaluation. FAO Soils Bulletin 32. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1976. URL: https://www.fao.org/4/x5310e/x5310e00.htm
32. Karlen D. L., Mausbach M. J., Doran J. W., Cline R. G., Harris R. F., Schuman G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*. 1997. Vol. 61, № 1. P. 4–10. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
33. Doran J. W., Zeiss M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*. 2000. Vol. 15, № 1. P. 3–11. DOI: https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6
34. US EPA. Introduction to Phytoremediation. EPA/600/R-99/107. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000. URL: https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30003T7G.TXT
35. Mench M., Lepp N., Bert V., Schwitzguébel J.-P., Gawronski S. W., Schröder P., Vangronsveld J. Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859. *Journal of Soils and Sediments*. 2010. Vol. 10, № 6. P. 1039–1070. DOI: https://doi.org/10.1007/s11368-010-0190-x
36. Pidlisnyuk V., Erickson L., Stefanovska T. et al. Potential phytomanagement of military polluted sites and biomass production using biofuel crop *Miscanthus* × *giganteus*. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 249. P. 330–337. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.018
37. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K. et al. Comparative assessment of using *Miscanthus* × *giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: a case of military and mining sites. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26, № 13. P. 13320–13333. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-019-04707-z
38. Wenning R. J., Tomasi T. D. Using US Natural Resource Damage Assessment to understand the environmental consequences of the war in Ukraine. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2023. Vol. 19, № 2. P. 366–375. DOI: https://doi.org/10.1002/ieam.4716
39. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*. 2013. Vol. 91, № 7. P. 869–881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075
40. Назаренко І. І., Польчина С. М., Нікорич В. А. Ґрунтознавство: підручник. Чернівці: Книги – ХХІ, 2004. 400 с.
41. FAO; ITPS. Status of the World's Soil Resources. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. 650 p. URL: https://openknowledge.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf
42. Certini G., Scalenghe R., Woods W. I. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 127. P. 1–15. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009
43. FAO; UNEP. Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. 846 p. DOI: https://doi.org/10.4060/cb4894en
44. ДСТУ ISO 17616:2010. Якість ґрунту. Настанови щодо вибору та оцінювання біологічних аналізів для екотоксикологічного характеризування ґрунтів і ґрунтових матеріалів. Київ: Держспоживстандарт України, 2012. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=54430
45. Miroshnychenko I., Voitovych O., Miroshnychenko M., Volosheniuk O. Dynamics of Chernozem's self-cleaning from oil pollution over two years. International Journal of Environmental Studies. 2023. Vol. 80, № 2. P. 410–420. DOI: https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2147726
46. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022. 236 p. URL: https://wrb.isric.org/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf

47. Datsko O., Zakharchenko E., Butenko Y. et al. Ecological assessment of heavy metal content in Ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, № 11. P. 100–108. DOI: https://doi.org/10.12911/22998993/192669
48. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин: постанова Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text
49. Про затвердження Методики визначення розміру шкоди, завданої землі, ґрунтам внаслідок надзвичайних ситуацій та/або збройної агресії та бойових дій під час дії воєнного стану: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 4 квітня 2022 р. № 167. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0406-22#Text
50. Про схвалення Національної стратегії протимінної діяльності на період до 2033 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках: розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.06.2024 № 616-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-%D1%80#Text
51. Directive (EU) 2025/2360 of the European Parliament and of the Council of 12 November 2025 on soil monitoring and resilience (Soil Monitoring Law). Official Journal of the European Union. 26.11.2025. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2025/2360/oj
52. Мельниченко В. Фіторемедіація ґрунтів, забруднених внаслідок військово-техногенного навантаження. Наукові доповіді НУБіП України. 2024. Т. 20, № 4. С. 72–84. DOI: https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72
53. Stroud J. L. Soil health pilot study in England: outcomes from an on-farm earthworm survey. *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14. Article e0203909. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203909
54. Stefanovska T., Skwiercz A., Zhukov O., Pidlisnyuk V. Soil nematodes as a monitoring tool of bioenergy crop production management: the case of *Miscanthus* × *giganteus* cultivation on different soil types. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32. P. 217–224. DOI: https://doi.org/10.15421/012423
55. Sys C., Van Ranst E., Debaveye J. Land Evaluation. Part II: Methods in Land Evaluation. Agricultural Publications № 7. Brussels: General Administration for Development Cooperation, 1991. 274 p. URL: https://biblio.ugent.be/publication/223204
56. Самохвалова В. Л., Фатєєв А. І., Зуза С. І. та ін. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*. 2015. № 1. С. 92–100. DOI: https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272192
57. Mahar A., Wang P., Ali A., Awasthi M. K., Lahori A. H., Wang Q., Li R., Zhang Z. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 126. P. 111–121. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023
58. Panagos P., Van Liedekerke M., Yigini Y., Montanarella L. Contaminated Sites in Europe: Review of the Current Situation Based on Data Collected through a European Network. Journal of Environmental and Public Health. 2013. Article 158764. DOI: https://doi.org/10.1155/2013/158764
59. Mamirova A., Pidlisnyuk V. The economic and environmental aspects of *Miscanthus* × *giganteus* phytomanagement applied to non-agricultural land. *Agronomy*. 2024. Vol. 14. Article 791. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14040791
60. Розмінуємо Україну. Підсумки гуманітарного розмінування за березень. 10.04.2026. URL: https://demine.gov.ua/news/pidsumky-humanitarnoho-rozminuvannia-za-berezen
61. ДСТУ ISO 11269-1:2004. Якість ґрунту. Визначення дії забрудників на флору ґрунту. Частина 1. Метод визначання інгібіторної дії на ріст коренів. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72106
62. ДСТУ ISO 11269-2:2002. Якість ґрунту. Визначення дії забруднювачів на флору ґрунту. Частина 2. Вплив хімічних речовин на проростання та ріст вищих рослин. Київ: Держстандарт України, 2004. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=58940
63. Alasmary Z., Hettiarachchi G. M., Roozeboom K. L. et al. Phytostabilization of a contaminated military site using Miscanthus and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*. 2021. Vol. 50, № 5. P. 1220–1232. DOI: https://doi.org/10.1002/jeq2.20268
64. Nebeská D., Pidlisnyuk V., Stefanovska T. et al. Impact of plant growth regulators and soil properties on *Miscanthus* × *giganteus* biomass parameters and uptake of metals in military soils. *Reviews on Environmental Health*. 2019. Vol. 34, № 3. P. 283–291. DOI: https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0088
65. Burdová H., Nebeská D., Suhail Al Souki K. et al. *Miscanthus* × *giganteus* stress tolerance and phytoremediation capacities in highly diesel contaminated soils. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 344. Article 118475. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118475
66. Nebeská D., Trögl J., Ševců A. et al. *Miscanthus* × *giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 224. Article 112630. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630
67. Nurzhanova A. A., Pidlisnyuk V., Berzhanova R. et al. PGPR-driven phytoremediation and physiobiochemical response of *Miscanthus* × *giganteus* to stress induced by the trace elements. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, № 42. P. 96098–96113. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-023-29031-5
68. Pidlisnyuk V., Mamirova A., Newton R. A. et al. Miscanthus phytotechnology of Cu- or Zn-spiked soils supported by contaminated Miscanthus biochar — is this a viable option for valorization? *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. Vol. 32, № 12. P. 7737–7759. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-025-36097-w
69. Kononchuk O., Pidlisnyuk V., Mamirova A. et al. Evaluation of the impact of varied biochars produced from M. × giganteus waste and application rate on the soil properties and physiological parameters of Spinacia oleracea L. *Environmental Technology & Innovation*. 2022. Vol. 28. Article 102898. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102898
70. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 72–76. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11

Дата першого надходження статті до видання: 08.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026