

УДК 631.4(477):[338.14:338.246.8](043.2)
DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.3-66.1>

ПОТЕНЦІАЛ МІСКАНТУСУ ДЛЯ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ЗЕМЕЛЬ, ЗАБРУДНЕНИХ УНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бондар О.І.¹, Кравчук В.І.², Іваніна В.В.², Квак В.М.², Олійник Т.М.³

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ

²Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків Національної академії аграрних наук України
вул. Клінічна, 25, 03110, м. Київ

³Інститут картоплярства Національної академії аграрних наук України
вул. Ярослава Мудрого, 22, 07853, смт. Немішаєве
v_ivanina@ukr.net

Досліджено рівень забруднення дерново-підзолистого ґрунту важкими металами кадмієм (Cd), свинцем (Pb), міддю (Cu) та цинком (Zn) після вибуху ракети типу X-22/X-32 та означено потенціал міскантусу (*Miscanthus × giganteus*) для фітореємедіації забруднених земель. Упродовж 2023-2024 років міскантус вирощували у зоні інтенсивного термічного впливу (зона вигорання) в межах 1–5 м від краю воронки вибуху та контрольних ділянках, розташованих на відстані 50 м від його епіцентру. Дослідження здійснювали у трикратній повторності. Розмір дослідної ділянки – 2,8 × 5 м, облікова площа – 14 м². Ділянки розміщували з орієнтацією на північ, південь і схід від епіцентру вибуху. Отримані експериментальні дані дозволили встановити рівень забруднення ґрунту, обсяги біомаси міскантусу за період досліджень, накопичення, перерозподіл і винос важких металів біомасою та ступінь очищення (фітореємедіації) ґрунту. Встановлено, що у зоні вигорання концентрація кадмію перевищила контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, цинку – у 24,7 раза. Міскантус гігантський, висаджений на забрудненій ділянці, формував біомасу коренів у 2023 році – 1,12 кг/м², у 2024 році – 3,86 кг/м², що становило – відповідно 68% та 78% від загальної біомаси рослин. Біомаса коренів міскантусу у 2024 році була у 4,0 рази більшою, ніж у 2023 році. Порівняльний аналіз показав, що міскантус інтенсивніше накопичував важкі метали кореневою системою, ніж наземною біомасою. На другий рік вегетації винос важких металів кореневою системою із ґрунту був у 3,8–4,3 раза вищий, ніж у перший рік. За дворічного циклу вирощування міскантусу вміст кадмію у ґрунті зменшився порівняно з висхідним забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%. Отримані результати мають науково-практичне значення, є основою для обґрунтування перспектив вирощування міскантусу на землях, пошкоджених військовими діями, з метою їх фітореємедіації. Такі дані можуть використовуватися для формування прогностичних моделей з фітореємедіації ґрунтів з урахуванням кліматичних та ґрунтових умов. *Ключові слова:* важкі метали, ґрунт, забруднення, міскантус, фітореємедіація, військові дії.

The potential of miscanthus for phytoremediation of lands contaminated by military operations. Bondar O., Kravchuk V., Ivanina V., Kvack V., Oliynyk T.

The article provides an assessment of the level of contamination of sod-podzolic soil with heavy metals cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu) and zinc (Zn) after the explosion of a Kh-22/Kh-32 rocket and determines the potential of miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) for phytoremediation of contaminated lands. During 2023-2024, miscanthus was grown in the zone of intense thermal impact (burnout zone) within 1–5 m from the edge of the explosion crater and in control plots located at a distance of 50 m from its epicenter. The experiment was set up in three replications. The size of the experimental plot was 2.8 × 5 m, the accounting area was 14 m². The plots were located with an orientation to the north, south and east of the explosion epicenter. The obtained experimental data allowed us to establish the level of soil contamination, the volume of *Miscanthus* biomass during the research years, the accumulation, redistribution and removal of heavy metals by biomass, and the degree of soil purification (phytoremediation). It was found that in the burnout zone, the concentration of cadmium exceeded the control by 7.9 times, lead by 32.5 times, copper by 12.8 times, and zinc by 24.7 times. *Miscanthus* giant, planted on a contaminated site, formed a root biomass of 1.12 kg/m² in 2023 and 3.86 kg/m² in 2024, which was 68% and 78% of the total plant biomass, respectively. The biomass of *Miscanthus* roots in 2024 was 4.0 times greater than in 2023. Comparative analysis showed that *Miscanthus* accumulated heavy metals more intensively through its root system than through its aboveground biomass. In the second year of vegetation, the removal of heavy metals from the soil by the root system was 3.8–4.3 times higher than in the first year. During the two-year cycle of growing miscanthus, the content of cadmium in the soil decreased by 10.6% compared to upstream pollution, lead by 7.7%, copper by 11.8%, and zinc by 13.0%. The results obtained have scientific and practical significance, are the basis for substantiating the prospects of growing miscanthus on lands damaged by military operations for the purpose of their phytoremediation. These data can be used to form predictive models for soil phytoremediation, taking into account climatic and soil conditions. *Key words:* heavy metals, soil, pollution, miscanthus, phytoremediation, military operations.



Постановка проблеми. Унаслідок військової агресії росії значні площі території України зазнали масштабних техногенних порушень та забруднення. За оцінками аналітичних центрів, станом на 2026 рік, близько 20% території України знаходиться під окупацією та зазнало прямого впливу бойових дій [1]. Вибухи артилерійських снарядів, ракет, авіаційних бомб та інших боєприпасів спричинили механічне руйнування ґрунтового покриву та його забруднення важкими металами і токсичними органічними сполуками [2].

Особливо інтенсивне забруднення ґрунтів спостерігається у так званій зоні вигорання, що формується безпосередньо навколо епіцентру вибуху. За результатами попередніх досліджень, у межах 1–5 м від краю воронки вибуху зосереджується 30–70% усіх токсичних елементів, що потрапляють у ґрунт під час детонації боєприпасів [3]. На відстані 5–20 м рівень забруднення значно зменшується, а за межами 20 м часто відповідає природному фоновому рівню [4].

Відновлення та введення до структури аграрного виробництва пошкоджених вибухами земель потребує їх очищення від важких металів та органічних поллютантів. Найпоширенішими забруднювачами, які входять до складу боєприпасів є важкі метали кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu) та цинк (Zn) [5]. Вирощування багаторічних біоенергетичних культур на забруднених землях може бути ефективним способом їх очищення. Інтенсивність акумуляції важких металів у рослинній біомасі залежить від фізіологічних особливостей рослин, їх здатності засвоювати хімічні елементи із ґрунту, а також комплексу ґрунтових чинників, зокрема, текстури, реакції ґрунтового розчину, вмісту органічної речовини [6]. В останні роки для відновлення родючості ґрунтів широко вирощують міскантус, який має потужну кореневу систему з високою поглинальною здатністю та здатен швидко формувати наземну біологічну масу. Незважаючи на певні наукові напрацювання, досліджень щодо вирощування міскантуса з метою фітореMediaції забруднених військовими діями земель є недостатньо. Мало вивченими є питання виносу та перерозподілу важких металів у біомасі, фітореMediaційної здатності міскантуса залежно від ґрунтово-кліматичних умов та зони вирощування. Отже, необхідні дослідження та системний аналіз щодо перспективності вирощування міскантуса з метою фітореMediaції забруднених земель.

Актуальність дослідження. Пошук швидкого і ефективного способу очищення ґрунтів від важких металів є одним із пріоритетних напрямів досліджень у період військових дій та їх завершення. Аграрний сектор економіки є донором бюджету України і швидке повернення земель риллі, які зазнали пошкодження і забруднення внаслідок військових дій до системи аграрного виробництва сприятиме швидшому відновленню та розвитку держави у післявоєнний період.

Вирощування міскантуса з метою фітореMediaції ґрунтів має багатоцільове значення. Міскантус формує потужну кореневу систему, швидко поглинає із ґрунту важкі метали, наземна біомаса міскантуса має високу енергоємність і широко використовується на цілі біоенергетики. Багатофункціональність вирощування міскантуса посилює актуальність досліджень, підвищує практичну їх значимість, а отримані наукові дані є основою для розробки системи багатоцільового і ефективного очищення ґрунтів від важких металів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Більшість наукових публікацій зазначають, що ефективність фітореMediaції ґрунтів залежить від поєднання багатьох чинників, серед яких важливу роль відіграє рослина, її здатність засвоювати хімічні елементи із ґрунту, швидко формувати біомасу та бути адаптованою до умов навколишнього середовища – ґрунту та погодних умов [6, 7]. ФітореMediaція завжди має бути прив'язана до конкретних ґрунтово-кліматичних умов вирощування. У цьому дослідженні акцент зроблено на оцінці ефективності вирощування міскантуса для фітореMediaції дерново-підзолистого ґрунту зони Полісся. Дослідження виконано у форматі дворічних спостережень (2023–2024 рр.), що забезпечило можливість оцінити щорічну акумуляцію важких металів у рослинах та специфіку їх розподілу у складових біомаси міскантуса. Ці дані є важливим науковим надбанням у контексті розвитку агроєкології, моніторингу та ефективного очищення ґрунтів, а також можуть бути використані при обґрунтуванні ефективності вирощування міскантуса для потреб біоенергетики на пошкоджених військовими діями землях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чисельні наукові публікації зазначають, що надходження важких металів у біомасу рослин залежить від ланцюга ґрунт–рослина–навколишнє середовище, де підбір високопродуктивних рослин істотно впливає та посилює процес їх поглинання [8]. Серед культур, які мають високу здатність до накопичення важких металів відмічають ріпак (*Brassica napus*), арундо тростинний (*Arundo donax*) та світчґрас (*Panicum virgatum*) [9–11]. Останніми роками значну увагу дослідників привертає міскантус (*Miscanthus × giganteus*) – багаторічна біоенергетична культура з високою продуктивністю біомаси та добре розвинутою кореневою системою. Ці властивості забезпечують його здатність ефективно акумулювати та стабілізувати важкі метали у ґрунті [12–15]. Окремі публікації відмічають, що накопичення та перерозподіл важких металів в рослинах міскантуса має видову специфічність, залежить від ґрунтово-кліматичних умов вирощування і потребує проведення польових досліджень [6]. Ключовими властивостями ґрунтів, які впливають на рухомість хімічних елементів у ґрунті та інтенсивність їх поглинання рослинами є реак-

ція ґрунтового розчину, текстура, вміст органічної речовини. Зазначені фізико-хімічні характеристики визначають сорбційну здатність ґрунтів та впливають на інтенсивність надходження важких металів до біомаси рослин [16].

Отже, попри наявну наукову інформацію щодо перспективності вирощування міскантусу для фітореємедіації ґрунтів, недостатньо вивченим є комплекс питань пов'язаних з видовою специфічністю рослин міскантусу, специфікою ґрунтового покриву та особливостями умов вирощування.

Невирішені частини загальної проблеми.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених міскантусу, невирішеним залишаються питання щодо ефективності його вирощування для фітореємедіації ґрунтів зони Полісся. Недостатньо даних щодо накопичення міскантусом важких металів за вирощування на легких дерново-підзолистих ґрунтах, щодо їх перерозподілу у складових біомаси та інтенсивності очищення ґрунтів даного типу від поллютантів. Саме ці питання висвітлено у поданій статті.

Новизна. У межах дослідження (2023–2024 рр.) вперше проведено оцінку рівня забруднення дерново-підзолистого ґрунту важкими металами кадмієм (Cd), свинцем (Pb), міддю (Cu) та цинком (Zn) після вибуху ракети типу X-22/X-32 та визначено ефективність вирощування міскантусу (*Miscanthus × giganteus*) для фітореємедіації таких земель. Важливим аспектом є встановлення обсягів формування біомаси міскантусом по роках дослідження, накопичення та перерозподілу важких металів у складових біомаси, визначення ступеня очищення ґрунту від важких металів за дворічний цикл вирощування.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження проводили на земельній ділянці с. Буда-Бабенецька, що знаходиться між м. Буча і м. Бородянка. Земельна ділянка була пошкоджена вибухом ракети X-22/X-32, глибина воронки – 6 м, радіус – 14 м, зона вигорання – 5 м від краю воронки. Схема досліду включала два варіанти: 1 – ділянка розміщена на віддалі 50 м від епіцентру вибуху (контроль), 2 – забруднена ділянка розміщена у 1-5 м від границі воронки (зона вигорання).

Дослід закладено у трикратній повторності. Розмір дослідної ділянки – 2,8х5 м, облікова площа – 14 м². У зоні вигорання ділянки розміщували з орієнтацією на північ, південь та схід від епіцентру вибуху на віддалі 1-5 м від границі воронки. Контроль розміщували на віддалі 50 м з аналогічною орієнтацією та розміром ділянок.

На дослідних ділянках висаджували Міскантус гіганський сорт «Прометей». Перед висаджуванням рослин з орного 0-20 см шару відбирали зразки ґрунту у кожному повторенні та формували змішаний зразок. У змішаному зразку визначали кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu) і цинк (Zn) на атомно абсорбційному спектрометрі. Осінню, по завер-

шенню вегетації, проводили збір урожаю з усієї ділянки. У кожному повторенні відбирали зразки рослин для визначення вмісту важких металів та сухої речовини.

Ґрунт дослідної ділянки – дерново-підзолистий піщаний. В орному 0-20 см шарі вміст гумусу за Тюрнімом – 1,03%, рухомого фосфору і калію за Кірсановим – 128 та 142 мг/кг ґрунту, відповідно, рН сольове – 4,9.

Експериментальні дані опрацьовували методом дисперсійного аналізу за допомогою комп'ютерної програми Statistica, 2013.

Дане дослідження поглиблює розуміння закономірностей обігу важких металів у ланцюгу «ґрунт-рослина» та їх накопичення рослинами міскантусу за дворічного циклу вирощування на дерново-підзолистому ґрунті зони Полісся. У загальнонауковому аспекті ці результати важливі для агроєкології, ґрунтознавства, екологічної безпеки, оскільки забезпечують науково обґрунтоване планування насаджень міскантусу для фітореємедіації земель пошкоджених військовими діями.

Виклад основного матеріалу. Агрохімічний аналіз орного 0–20-см шару дерново-підзолистого ґрунту засвідчив значний рівень забруднення важкими металами у зоні вигорання (1–5 м від границі воронки вибуху). Найвищі концентрації встановлено для цинку та міді, тоді як кадмій і свинець накопичувалися у дещо менших кількостях. За рівнем накопичення метали розміщувалися у такій послідовності $Zn > Cu > Pb > Cd$ (табл. 1).

У 2023 році вміст кадмію у ґрунті забрудненої ділянки перевищував контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, а цинку – у 24,7 раза.

У 2024 році концентрація важких металів на контрольній ділянці залишалася майже незмінною порівняно з попереднім роком. Водночас на забрудненій території спостерігалось поступове зниження їхнього вмісту в ґрунті. Зокрема, концентрація кадмію порівняно з висхідним показником зменшилася на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%.

Вирощування міскантусу гігантського на дослідних ділянках супроводжувалося інтенсивним наростанням біомаси. Урожайність рослин у перший рік вегетації становила 1,451–1,436 кг/м², а у другий рік – 5,739–5,675 кг/м². При цьому рівень продуктивності рослин на забруднених ділянках практично не відрізнявся від контрольних варіантів, що відповідало звичайним річним показникам вегетації цієї рослини (табл. 2).

Упродовж обох років досліджень найбільш інтенсивне наростання біомаси спостерігалось у кореневій системі рослин. У 2023 році на забрудненій ділянці маса коренів становила 1,12 кг/м², тоді як маса стебел і листків – відповідно 0,268 та 0,048 кг/м². У 2024 році ці показники збільшилися до 3,86, 1,506 та 0,309 кг/м² відповідно.

Таблиця 1

Вміст важких металів у дерново-підзолистому ґрунті після вибуху ракети, мг/кг ґрунту

Варіант	Важкі метали			
	Cd	Pb	Cu	Zn
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	0,53 0,51	3,2 3,1	20,4 19,8	23,6 22,9
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	4,16 3,72	104 96	262 231	584 508
НіР ₀₅	0,38	7,9	18,4	35,2

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік

Таблиця 2

Врожайність біомаси міскантусу гігантського у перший і другий роки вегетації, кг/м²

Варіант	Складові біомаси			Разом
	коріння	стебло	листки	
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	1,14 3,90	0,265 1,532	0,046 0,307	1,451 5,739
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	1,12 3,86	0,268 1,506	0,048 0,309	1,436 5,675
НіР ₀₅	0,22	0,081	0,018	0,16

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік. Вміст сухої речовини у корінні – 30,2%, стеблах – 48,6%, листках – 51,3%

Таким чином, маса кореневої системи у 2023 році перевищувала масу стебел у 4,3 раза, а масу листків – у 24,8 раза. У 2024 році це співвідношення становило відповідно 2,6 та 12,5 раза. Загальна біомаса рослин у другий рік вегетації була приблизно у 4 рази більшою, ніж у перший.

Аналіз вмісту важких металів у рослинах міскантусу показав, що їхнє накопичення відбувалося переважно у кореневій системі. У середньому за два роки досліджень концентрація кадмію у коренях перевищувала його вміст у надземній біомасі у 5,2–5,7 раза, свинцю – у 17,9–20 разів, міді – у 3,6–4,8 раза, цинку – у 3,5–4,6 раза (табл. 3).

На забрудненій ділянці вміст важких металів у рослинах був значно вищим, ніж на контрольній території. Наприклад, у 2023 році концентрація кадмію у коренях становила 38,6 мг/кг, свинцю – 76,8 мг/кг, міді – 40,6 мг/кг, цинку – 161 мг/кг сухої речовини. У 2024 році ці показники зросли відповідно до 41,2; 82; 46,4 та 178 мг/кг.

Винос важких металів рослинами міскантусу з ґрунту також суттєво зростав упродовж другого року вирощування, що було пропорційно нарощуванню біомаси. У 2023 році винос кадмію становив 14,2 мг/м², свинцю – 26,7 мг/м², міді – 15,4 мг/м², цинку – 61,4 мг/м². У 2024 році ці показники зросли у 3,8–4,3 раза.

Основна частка вилучення металів із ґрунту забезпечувалася за рахунок кореневої системи рослин. Так, у другий рік вегетації частка кореневої системи у загальному виносі становила 87% для кадмію, 95% для свинцю та 83% для міді. Для цинку цей

показник був нижчим і становив 43%, тоді як 57% накопичувалося у надземній біомасі (табл. 4).

Розрахунок ефективності фіторе mediaції, зниження вмісту важких металів у ґрунті, показав, що рослини міскантусу на забрудненій ділянці за дворічного (2023-2024 рр.) циклу вирощування зменшили вміст кадмію у ґрунті порівняно з початковим забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0% (рис.1).

Отримані результати підтверджують високу здатність міскантусу до акумуляції важких металів і свідчать про перспективність використання цієї культури у технологіях фіторе mediaції земель, забруднених унаслідок військових дій.

Висновки. За даними проведених досліджень у 2023-2024 рр. встановлено, що вибух ракети типу X-22/X-32 спричинив значне забруднення орного 0–20-см шару дерново-підзолистого ґрунту важкими металами. У зоні вигорання (1–5 м від границі воронки вибуху) встановлено таку послідовність накопичення металів: Zn > Cu > Pb > Cd. Концентрація кадмію перевищувала контроль у 7,9 раза, свинцю – у 32,5 раза, міді – у 12,8 раза, цинку – у 24,7 раза.

Міскантус гігантський, висаджений у зоні вигорання, характеризувався високою продуктивністю біомаси. Урожайність становила 1,436 кг/м² у перший рік вегетації та 5,675 кг/м² у другий рік, що свідчить про інтенсивне наростання рослинної маси навіть за умов забруднення ґрунту.

Упродовж двох років досліджень основна частка важких металів акумулювалася у корене-

Таблиця 3

Вміст важких металів у рослинах міскантусу наприкінці вегетації, мг/кг сухої речовини

Варіант	Метали	Складові біомаси		
		коріння	стебло	листки
Контроль (50 м від епіцентру вибуху)	Cd	0,31	0,24	0,20
		0,33	0,24	0,21
	Pb	3,2	1,6	1,7
		3,2	1,7	1,8
Cu	4,2	3,0	3,2	
	4,5	3,0	3,2	
Zn	20,4	7,7	6,0	
	21,0	7,8	6,4	
НіР ₀₅		0,6	0,32	0,27
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	Cd	38,6	7,4	6,8
		41,2	8,4	7,4
	Pb	76,8	4,3	3,9
		82,0	4,7	4,1
Cu	40,6	11,2	8,5	
	46,4	13,4	9,6	
Zn	161	46	35	
	178	53	40	
НіР ₀₅		4,4	0,9	0,7

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік.

Таблиця 4

Винос важких металів із ґрунту рослинами міскантусу на забрудненій ділянці, мг/м²

Варіант	Метали	Складові біомаси			Разом
		коріння	стебло	листки	
Забруднена ділянка 1-5 м від границі воронки (зона вигорання)	Cd	13,2	1,0	0,2	14,2
		48,3	6,3	1,2	55,8
	Pb	26,0	0,6	0,1	26,7
		96,1	3,7	0,7	101
Cu	13,7	1,5	0,2	15,4	
	54,4	9,8	1,5	65,7	
Zn	54,5	6,0	0,9	61,4	
	108	38,8	6,5	253	

Примітка: чисельник – 2023 рік, знаменник – 2024 рік.

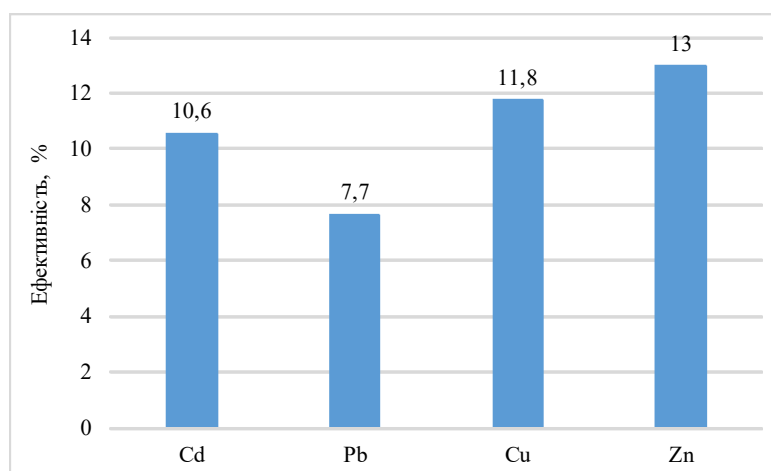


Рис. 1. Ефективність фітореємедіації важких металів рослинами міскантусу на забрудненій ділянці 1-5 м від границі воронки (зона вигорання) за 2023–2024 роки вирощування, %

вій системі рослин. Концентрація кадмію у коренях перевищувала його вміст у надземній біомасі у 5,2–5,7 раза, свинцю – у 17,9–20 разів, міді – у 3,6–4,8 раза, цинку – у 3,5–4,6 раза.

Винос важких металів рослинами міскантусу з ґрунту у 2023 році становив: кадмію – 14,2 мг/м², свинцю – 26,7 мг/м², міді – 15,4 мг/м², цинку – 61,4 мг/м². У другий рік вирощування ці показники зросли у 3,8–4,3 раза. Важкі метали міскантус виносив переважно за рахунок акумуляції у кореневій системі. На другому році вегетації акумуляція кадмію у кореневій системі від загального виносу становила 87%, свинцю – 95%, міді – 83%, за винятком цинку, якого коренева система акумулювала 43%, а решта 57% містилась у наземній біомасі.

Вирощування міскантусу на забрудненій ділянці упродовж двох років сприяло зниженню вмісту кадмію у ґрунті порівняно з початковим забрудненням на 10,6%, свинцю – на 7,7%, міді – на 11,8%, цинку – на 13,0%, що підтверджує перспективність

використання цієї культури для фітореMediaції земель, пошкоджених унаслідок військових дій.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають вагоме наукове і практичне значення, поглиблюють фундаментальні знання з питань обігу важких металів у ланцюгу «ґрунту-рослина» та їх акумуляції рослинами міскантусу. Практична цінність досліджень полягає в тому, що вони є основою для удосконалення технології фітореMediaції ґрунтів легкої текстури від важких металів, які зазнали пошкодження і екологічного забруднення внаслідок військових дій.

Перспективним напрямом є розширення досліджень з вирощування міскантусу для фітореMediaції ґрунтів інших ґрунтово-кліматичних зон. Це є фундаментом для поглиблення знань щодо механізмів трансформації важких металів кадмію, свинцю, міді та цинку у ґрунті залежно від їх властивостей, визначення доступності та інтенсивності накопичення важких металів рослинами міскантусу.

Література

1. Скільки території України окупувала росія? Аналітичний портал слово і діло. URL: <https://www.slovovidlo.ua/2025/12/17/infografika/suspilstvo/skilky-terytoriyi-ukrayiny-okupuvava-rosiya> (дата звернення 05.05.2026)
2. Yakymchuk A., Balanda O., Bzowska-Bakalarz M. Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Seria Organizacji i Zarzadzanie*. 2024. Vol. 196. P. 667–685. URL: <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2024.196.45> (date of access: 28.04.2026)
3. Allami M. H., Alobaidy A. H. M., Alsudani I. M. Assessment of ecological pollution of heavy metals in surface soils of different sites within northwest of Iraq. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 779, no. 1. 012063. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012063> (date of access: 28.04.2026)
4. Greiciute K., Juozulynas A., Surkiene G., Valeikiene V. Research on soil disturbance and pollution with heavy metals in military grounds. *Geologija*. 2007. Vol. 57. P. 14–20.
5. Datsko O., Zakharchenko E., Butenko Y., Melnyk O., Kovalenko I., Onychko V., Ilchenko V., Solokha M. Ecological Assessment of Heavy Metal Content in Ukrainian Soils. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, no. 11. P. 100–108. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/192669> (date of access: 04.05.2026)
6. Razanov S., Aliksieiev O., Bakhmat O., Bakhmat M., Lytvyn O., Aliksieieva O., Vradii O., Mazur K., Razanova A., Mazurak I. Accumulation of Chemical Elements in the Vegetative Mass of Energy Cultures Grown on Gray Forest Soils in the Western Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, no. 9. P. 282–291. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/191439> (date of access: 04.05.2026)
7. Martynova N., Kolombar T. Phytoremediation technologies promising for the restoration of agricultural lands damaged by military actions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16, no. 3. e25155. URL: <https://doi.org/10.15421/0225155> (date of access: 26.04.2026)
8. Aparicio J. D., Raimondo E. E., Saez J. M., Costa-Gutierrez S. B., Alvarez A., Benimeli C. S., Polti M. A. The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, no. 2. 107141. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.107141> (date of access: 04.05.2026)
9. Brunetti G., Farrag K., Rovira P. S., Nigro F., Senesi N. Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by *Brassica napus* from contaminated soils in the Apulia Region, Southern Italy. *Geoderma*. 2011. Vol. 160, no. 3–4. P. 517–523. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.10.023> (date of access: 28.04.2026)
10. Cojocaru P., Gusiatiu Z. M., Cretescu I. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*). *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 10693–10701. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6176-5> (date of access: 04.05.2026)
11. Gomes L., Cumbane B., Costa J., Pires J., Rodrigues C., Santos F., Fernando A. L. Phytoremediation potential of the perennial crops giant reed and switchgrass to soils contaminated with heavy metals. *In: Proceedings of the 27th European Biomass Conference and Exhibition. EUBCE*. 2019. P. 175–177. URL: <http://dx.doi.org/10.5071/27thEUBCE2019-1BV.8.3> (date of access: 26.04.2026)
12. Кравчук В. І., Квас В. М., Цвігун Г. В., Іванюта М. В., Кононюк Н. О., Атаманюк О. М., Гуменюк Ю. О. Проблематика виробництва садивного матеріалу міскантусу гігантського. *Біоенергетика*. 2022. Т. 19, № 1. С. 35–42. DOI: 10.47414/be.1-2.2022.271353 (date of access: 26.04.2026)
13. Роїк М. В., Кравчук В. І. Міскантус гігантеус: горизонти інноваційних досліджень. *Біоенергетика*. 2023. № 1–2. С. 4–6. DOI: <https://doi.org/10.47414/be.1-2.2023.290613> (дата звернення: 05.05.2026)

14. Kocon A., Jurga B. The evaluation of growth and phytoextraction potential of *Miscanthus x giganteus* and *Sida hermaphrodita* on soil contaminated simultaneously with Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24. P. 4990–5000. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-8241-5> (date of access: 28.04.2026)
15. Alasmay Z., Hettiarachchi G. M., Roozeboom K. L., Davis L. C., Erickson L. E., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trogl J. Phytostabilization of a contaminated military site using *Miscanthus* and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*. 2021. Vol. 50, no. 5. P. 1220–1232. URL: <https://doi.org/10.1002/jeq2.20268> (date of access: 26.04.2026)
16. Харитонов М. М., Мартинова Н. В., Бабенко М. Г., Клімкіна І. І. Оцінка виносу макро- та мікроелементів надземною масою міскантусу, вирощеного на техноземах. *Екологічні науки*. 2025. Т. 58, № 1. С. 117–122. DOI: 10.32846/2306-9716/2025. есо.1-58.20 (дата звернення: 05.05.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 30.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026