



УДК 504.5:631.43:631.543

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.24>

## ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ ШЛЯХОМ ВИРОЩУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

А. Д. Романчук<sup>1</sup>, Н. Г. Матвійчук<sup>2</sup>, Б. В. Матвійчук<sup>3</sup>

Відновлення родючості ґрунтів та захист їх від забруднення є складною науковою проблемою сьогодення, що потребує застосування різноманітних фізичних, хімічних і біологічних засобів.

Важливим теоретичним і прикладним аспектом є розробка нових методів відновлення для зменшення деградації ґрунтів під впливом хімічного забруднення. У публікації проаналізовано екологічні характеристики енергетичних культур *Miscanthus giganteus* L. та *Phalaris arundinacea* L. як фіторемедіаторів ґрунтів, забруднених важкими металами, пестицидами та нафтопродуктами. Дослідження показало, що вирощування енергетичних культур на техногенно забруднених ґрунтах призводить до неоднорідних змін агрохімічного та фізико-хімічного складу ґрунту.

Реакція ґрунтового розчину, вміст вуглецю та гумусу мало змінилися за 2021–2023 роки. При вирощуванні *Phalaris arundinacea* L. на забруднених нафтопродуктами та пестицидами землях вміст ввібраних основ, легкогідролізованого азоту та рухомого фосфору суттєво збільшився, тоді як вміст обмінного калію, кальцію та рухомої сірки зменшився. І навпаки, вирощування *Miscanthus giganteus* L. призвело до зменшення вмісту макроелементів і збільшення вмісту обмінного кальцію та рухомої сірки. Вирощування енергетичних культур призвело до значного зниження вмісту токсичних речовин у забрудненому ґрунті, зокрема вмісту рухомих форм та масової частки важких металів. Найбільше зниження спостерігалось для рухомого хрому, який зменшився на 0,55 мг/кг за вирощування очеретянки звичайної та 1,06 мг/кг за вирощування міскантусу гігантського на ділянках, забруднених нафтопродуктами, та на 3,65 мг/кг і 5,25 мг/кг на ділянках, забруднених пестицидами, відповідно. Загальний вміст стибію зменшився на 60 мг/кг за вирощування очеретянки звичайної та 69,61 мг/кг за вирощування міскан-

<sup>1</sup> доктор сільськогосподарських наук, професор,  
директор науково-дослідного інституту проблем сталого розвитку,  
(Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир)  
e-mail: ludmilaromanchuk14@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4790-8414

<sup>2</sup> кандидат сільськогосподарських наук,  
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: natamatviychuk400@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-2226-814X

<sup>3</sup> кандидат сільськогосподарських наук,  
доцент кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття  
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)  
e-mail: bogdanmatviychuk@ukr.net  
ORCID: 0000-0003-2226-814X

тусу гігантського на ділянках, забруднених нафтопродуктами, і на 65,68 мг/кг та 78,35 мг/кг відповідно на ділянках, забруднених пестицидами. На досліджених площах вирощування енергетичних культур концентрація кадмію знизилася на 0,131–0,193 мг/кг при вирощуванні очеретянки звичайної та на 0,187–0,312 мг/кг при вирощуванні міскантусу гігантського. Також значно зменшився вміст органічних забруднювачів. На ділянках, забруднених нафтопродуктами, ГХГ (сума ізомерів) знизилась на 0,099 мг/кг при культивуванні очеретянки звичайної та на 0,121 мг/кг при культивуванні міскантусу гігантського, на забруднених пестицидами – відповідно на 0,12 і 0,143 мг/кг. При вирощуванні очеретянки звичайної вміст нафтопродуктів знизився на 565,52 мг/кг на ділянках, забруднених нафтопродуктами, та на 1364,14 мг/кг – забруднених пестицидами, а при вирощуванні міскантусу гігантського – на 564,15–1160,08 мг/кг. Вміст фенолу було виявлено лише на забруднених пестицидами територіях і зменшено вдвічі завдяки вирощуванню енергетичних культур. Отже, вважаємо доцільним вирощування енергетичних культур *Miscanthus x giganteus* та *Phalaris arundinacea*, оскільки вони є перспективними фітотехнологіями для підвищення агрономічної цінності ґрунту.

**Ключові слова:** фіторе mediaція, *Miscanthus x giganteus*, *Phalaris arundinacea*, важкі метали, токсиканти, органічні забруднювачі, нафтопродукти.

## PHYTOREMEDIATION OF SOILS BY CULTIVATION ENERGY CROPS

**L. D. Romantschuk, N. G. Matviichuk, B. V. Matviichuk**

Restoring soil fertility and protecting it from pollution is a complex scientific problem today, which requires the use of various physical, chemical and biological means. An important theoretical and applied aspect is the development of new remediation methods to reduce soil degradation under the influence of chemical pollution. The publication analyzes the ecological characteristics of energy crops *Miscanthus giganteus* L. and *Phalaris arundinacea* L. as phytoremediators of soils contaminated with heavy metals, pesticides, and petroleum products. The study showed that the cultivation of energy crops on technogenically polluted soils leads to heterogeneous changes in the agrochemical and physicochemical composition of the soil. The reaction of the soil solution, the content of carbon and humus has changed little in 2021–2023. When growing *Phalaris arundinacea* L. on soils contaminated with petroleum products and pesticides, the content of absorbed bases, easily hydrolyzed nitrogen and mobile phosphorus increased significantly, while the content of exchangeable potassium, calcium and mobile sulfur decreased. Conversely, the cultivation of *Miscanthus giganteus* L. led to a decrease in the content of macroelements and an increase in the content of exchangeable calcium and mobile sulfur. Cultivation of energy crops led to a significant decrease in the content of toxic substances in contaminated soil, in particular, the content of mobile forms and the mass fraction of heavy metals. The greatest reduction was observed for mobile chromium, which was reduced by 0,55 mg/kg for common warbler and 1,06 mg/kg for miscanthus giant in oil-contaminated sites, and by 3,65 mg/kg and 5,25 mg/kg in areas contaminated with pesticides, respectively. The total content of stibium decreased by 60 mg/kg in the cultivation of common reed and 69,61 mg/kg in the cultivation of miscanthus giant in the oil-contaminated plots, and by 65,68 mg/kg and 78,35 mg/kg, respectively, in the contaminated plots pesticides. On the investigated areas of growing energy crops, the concentration of cadmium decreased by 0,131–0,193 mg/kg when growing common reed and by 0,187–0,312 mg/kg when growing miscanthus giant. The content of organic pollutants also decreased significantly. The content of organic pollutants also decreased significantly. On the areas contaminated with petroleum products, HCG (sum of isomers) decreased by 0,099 mg/kg during the cultivation of common reed and by 0,121 mg/kg during the cultivation of *Miscanthus giganteus*, on those contaminated with pesticides by 0,12 and 0,143 mg/kg, respectively. When growing common reed, the content of oil products decreased by 565,52 mg/kg in areas contaminated with oil products and by 1364,14 mg/kg in areas contaminated with pesticides, and when growing giant miscanthus – by 564,15–1160,08 mg/kg. Phenol content was found only in pesticide-contaminated areas and was reduced by half due to the cultivation of energy crops. Therefore, we consider it expedient to grow the energy crops *Miscanthus x giganteus* and *Phalaris arundinacea*, as they are promising phytotechnologies for increasing the agronomic value of the soil.

**Key words:** phytoremediation, *Miscanthus x giganteus*, *Phalaris arundinacea*, heavy metals, toxicants, organic pollutants, petroleum products.

## Вступ

Техногенне забруднення довкілля має глобальний характер. Господарська діяльність людини призвела до деградації земель, їх забруднення нафтопродуктами, пестицидами, радіонуклідами та важкими металами, які належать до найшкідливіших хімічних забруднювачів для навколишнього середовища. Вони мігрують трофічними ланцюгами з вираженим кумулятивним ефектом, у зв'язку з чим токсичність їх може проявлятися раптово на окремих ланках трофічних ланцюгів. До земель несільськогосподарського призначення належать забруднені ґрунти поблизу гірничодобувних і металургійних виробництв, кар'єри, полігони твердих побутових відходів та інші маргінальні території, особливістю яких є перевищення ГДК неорганічних (важкі метали, зокрема Pb, Cr, Al, Zn, Ni та ін.) та органічних (поліциклічні ароматичні вуглеводні, пірен, фенатрен, поліфенольні сполуки та ін.) сполук (Самохвалова, 2014; Moubasher et al., 2015; Пацула та ін., 2018).

Актуальним та важливим як у теоретичному, так і в практичному аспекті є розроблення нових способів ремедіації забруднених ґрунтів. Фіторемедіація є одним із найефективніших методів дезактивації забруднюючих речовин у ґрунті за допомогою рослин. Вона не вимагає екскавації ґрунту, сприяє збереженню та відновленню навколишнього середовища, поліпшенню якості ґрунтів, захисту їх від ерозії і може застосовуватися на великих площах (Meers et al., 2010; Basumatary et al., 2012; de Abreu et al., 2012; Ласло, 2014; Самохвалова, 2014; Pandey et al., 2015). Фіторемедіація ґрунтів шляхом вирощування енергетичних культур є одним з основних способів вирішення проблем для зниження площ забруднених земель та покращання стану біоенергетики (Witters et al., 2012; Кулик та ін., 2020; Борецька та ін., 2021).

Світовою науковою спільнотою підраховано, що вартість очищення ґрунту, забрудненого важкими металами, радіонуклідами, нафтою чи пестицидами, за допомогою рослин, що використовують лише енергію сонця, становить лише 5% від витрат на інші способи відновлення. Отже, фіторемедіація є більш екологічно доцільним і дешевим методом відновлення ґрунтів порівняно з фізико-хімічними і технічними способами навіть з урахуванням обмеженості часових ресурсів для досягнення кінцевої мети. Традиційно фіторемедіація та фіторекуль-

тивація земель здійснюється з метою підвищення продуктивності і стійкості землеробства, забезпечення гарантованого виробництва продукції на основі збереження і підвищення родючості земель. Вона також застосовується при створенні необхідних умов для залучення до агровиробництва малопродуктивних земель та формування раціональної структури земельних угідь (Цицюра та ін., 2022).

Фіторемедіація охоплює широкий спектр забрудників, таких як неорганічні хімічні речовини, включаючи важкі метали, металоїди, багато органічних речовин, зокрема стійкі органічні забруднювачі та радіоактивні елементи. Фіторемедіація набула великої популярності за останні 20 років і вважається прийнятною технологією в багатьох країнах через її економічну ефективність порівняно з традиційними методами. Низка компаній займається фіторемедіацією різних забруднених об'єктів, а по всьому світу успішно завершено кілька проєктів з фіторемедіації. Використання неїстівних багаторічних енергетичних культур для рекультивації забруднених земель розглядається як стійкий підхід фіторемедіації з економічною віддачею (Del Grosso et al., 2014; Pandey et al., 2016).

В Україні налічується близько 3,5 млн га земель, виведених із сівозмін через їх низьку родючість, схильність до ерозії, забрудненість важкими металами, радіонуклідами та токсикантами (Блюм та ін., 2010). Вирощування швидкозростаючих високоврожайних енергетичних культур на даних землях збереже ґрунти від ерозії, збільшить потужність гумусного шару і загалом покращить екологічний та енергетичний стан країни. На думку вчених, найбільш енергетично ефективними є три види енергетичних культур, а саме: швидкозростаюча верба прутівидна (*Salix viminalis*), міскантус гігантус (*Miscanthus x giganteus*), сорго (*Sorghum*). Для їх вирощування в Україні створюються високопродуктивні плантації з тривалим терміном експлуатації. Культури характеризуються високим показником приросту фітомаси. Насадження енергетичних культур залишаються продуктивними 20–30 років, а врожайність становить 30–50 т/га сухої маси на рік. Позитивною особливістю енергетичних культур є стійкість до морозів, шкідників і збудників хвороб. Вони можуть зростати на ґрунтах різного типу, на заболочених і непродуктивних землях, забруднених важкими

металами та радіонуклідами. Крім того, ці культури здатні адсорбувати з ґрунту у великій кількості важкі метали та радіонукліди, що сприяє очищенню забруднених ґрунтів та покращанню їх екологічного стану. Найбільший досвід у вирощуванні енергетичних культур мають такі країни, як Швеція, Англія, Ірландія, Польща, Данія. В Україні, незважаючи на велику кількість малоприсадибних для ведення товарного сільськогосподарського виробництва земель, промислових посадок енергетичних культур поки що недостатньо (Блюм та ін., 2010; Рахметов, 2011; Гелетука і Желєзна, 2014; Федорчук та ін., 2017).

Енергетичні рослини впливають на екологічний стан і довкілля таким чином: один гектар плантацій енергетичних рослин поглинає з повітря понад 200 тон  $\text{CO}_2$  за 3 роки; ідеально підходять для засадження радіоактивно забруднених та порушених земель після видобування ельмінітових руд, малопродуктивних чи виведених з обробітку; ефективно застосовуються у протиерозійних заходах для укріплення ґрунтів, збагачують їх макроелементами та мікроелементами, поживними речовинами; енергетичні рослини є природними фільтрами для очищення ґрунтів від пестицидів; плантації енергетичних рослин є природними фільтрами для видалення відходів агропромислового виробництва, застосовуються як буферні зони в місцях накопичення біологічних відходів фермерських господарств (Гелетука і Желєзна, 2014).

Ступінь деградації ґрунтів великий, а процес ремедіації – складний, витратний і повільний. Ґрунтознавці стверджують, що для відновлення продуктивності виснаженого і пошкодженого ґрунту необхідні значні інвестиції. Рекультивацію забруднених земель необхідно розпочинати з розроблення способів їх використання в агропромисловому виробництві, що дало би змогу швидко відновлювати такі землі та отримувати з них безпечну продукцію (Грабак і Будикіна, 2014).

У Європейських країнах починаючи з 2013 року наявна єдина сільськогосподарська політика ЄС, яка зобов'язує фермерів, які володіють понад 15 га орних земель, виділяти не менше 5% відповідних площ для екологічних та енергетичних потреб. До земель такого призначення належать, наприклад, чисті пари, буферні смуги, ландшафтні елементи, лісонасадження тощо. На цих екологічно спрямованих землях фер-

мери зобов'язані вирощувати багаторічні енергетичні культури без застосування пестицидів і мінеральних добрив. Після підготовки Єврокомісією звіту з даного питання у 2017 році частка земель, призначених для екологічних та енергетичних потреб, повинна зрости до 7% (Федорчук та ін., 2017).

Наразі в Україні є кілька компаній, що займаються вирощуванням енергетичних культур на комерційному рівні. Ще низка компаній планує найближчим часом вийти на цей ринок. Підвищення цін на енергоносії негативно впливає на економіку України, екологію, добробут громадян. Саме це і є передумовою того, що Україна змушена шукати альтернативні джерела енергії. Для цього планується збільшення площ для вирощування енергетичних культур. Площі під вирощування енергокультур необхідно збільшувати з 130 тис. га в 2020 р. до 700 тис. га в 2030 р. і в перспективі довести до 3,5 млн га (Гелетука і Желєзна, 2014).

Так, важкі метали й хімічні забруднювачі середовища, накопичуючись і просуваячись по харчовому ланцюгу (ґрунт – рослина – тварина – людина), уражають різні органи тварин і людини, викликаючи захворювання.

З огляду на це систематичне сільськогосподарське використання земельного фонду потребує наявного контролю за станом його родючості, ступенем еродованості, реакцією та сольовим режимом ґрунтового середовища, а також рівнем забруднення важкими металами, радіонуклідами, нафтопродуктами, пестицидами. У зв'язку з цим ведення землеробства на забруднених ґрунтах є одним з актуальних питань для агрономів та екологів. Забруднені токсикантами ґрунти потребують спеціальних засобів детоксикації ґрунту, що могли б не допустити надходження їх у рослинницьку продукцію.

Отже, дослідження реабілітації ґрунту, забрудненого органічними пестицидами та нафтопродуктами, за вирощування рослин *Miscanthus x giganteus* та *Phalaris arundinacea* є досить актуальним.

#### **Матеріал і методи**

Дослідження проводилося протягом 2021–2023 років у рамках проєкту CERESiS (ContaminatEd Land Remediation through Energy crops for Soil поліпшення до рідкого біопалива) H2020 Project (GA 101006717) в досліді, який був закладений у 2021 році у стаціонарному досліді в зоні Полісся

України. Для вивчення питання очищення забруднених ґрунтів від важких металів, залишків пестицидів, нафтопродуктів було закладено дослідні ділянки енергетичних рослин *Miscanthus x giganteus* та *Phalaris arundinacea* на забруднених нафтопродуктами (ділянка № 1) та органічними пестицидами (ділянка № 2) ґрунтах.

Ґрунт дослідних ділянок ясно-сірий опідзолений глеюватий. Глибина залягання ґрунтових вод становить орієнтовно 2,5 м, верхня межа капілярної кайми – 152 см. Дослід закладено у 3-кратній повторності, розміщення повторень в один ярус. Загальна площа ділянки – 540 м<sup>2</sup>, площа посівної ділянки – 135 м<sup>2</sup>, облікової – 100 м<sup>2</sup>. Згідно зі схемою досліду вносили рекомендовані норми фосфорно-калійних добрив – суперфосфат Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> – 18,4% та каліймагnezію (K<sub>2</sub>O – 40,2%), азотних добрив – аміачну селітру (N – 34,4%).

Перед закладанням дослідів та впродовж років досліджень було проведено відбір зразків ґрунту з забруднених ділянок – ділянка № 1 забруднена нафтопродуктами та ділянка, № 2 забруднена пестицидами – згідно з ДСТУ 4287:2004, ДСТУ ISO 10381:2004. Стандартний відбір зразків включав створення одного зразку з мінімум 25 субзразків, взятих ґрунтовим буром на глибину кореневої системи рослин (0,1–0,9м) з стандартизованою підготовкою ґрунтової проби (фракція < 2 мм, висушена на повітрі). Було проведено дослідження

відібраних зразків згідно з чинними ДСТУ та методиками за встановленими показниками: вміст вуглецю; органічної речовини; N; P; K; Ca; S; сума ввібраних основ; органічні забруднювачі; феноли; валові форми важких металів; рухомі форми важких металів; загальні форми поживних елементів; нафтопродукти.

### Результати та обговорення

Ґрунт – унікальний незамінний природний ресурс, накопичувач сонячної енергії, основа життя рослин, тварин і людини, а також природний індикатор забруднення навколишнього середовища.

Перед закладанням дослідів у 2021 році на дослідних ділянках проведено фізико-хімічний та агрохімічний аналіз ґрунту. Ґрунт дослідних ділянок характеризувався нейтральною реакцією середовища, високим показником суми ввібраних основ, дуже низьким вмістом гумусу та фосфору, дуже високим – обмінного калію легкогідролізованого азоту, зразок № 1 (ділянка, забруднена нафтопродуктами) – дуже високим та зразок № 2 (ділянка, забруднена пестицидами) – високим вмістом рухомої сірки, підвищеним – обмінного кальцію.

За результатами досліджень встановлено, що такі показники, як реакція ґрунтового розчину, вміст вуглецю та гумусу, протягом 2021–2023 років майже не змінилися за вирощування енергетичних культур на забруднених ділянках (рис. 1). Однак при вирощуванні очеретянки звичайної значно

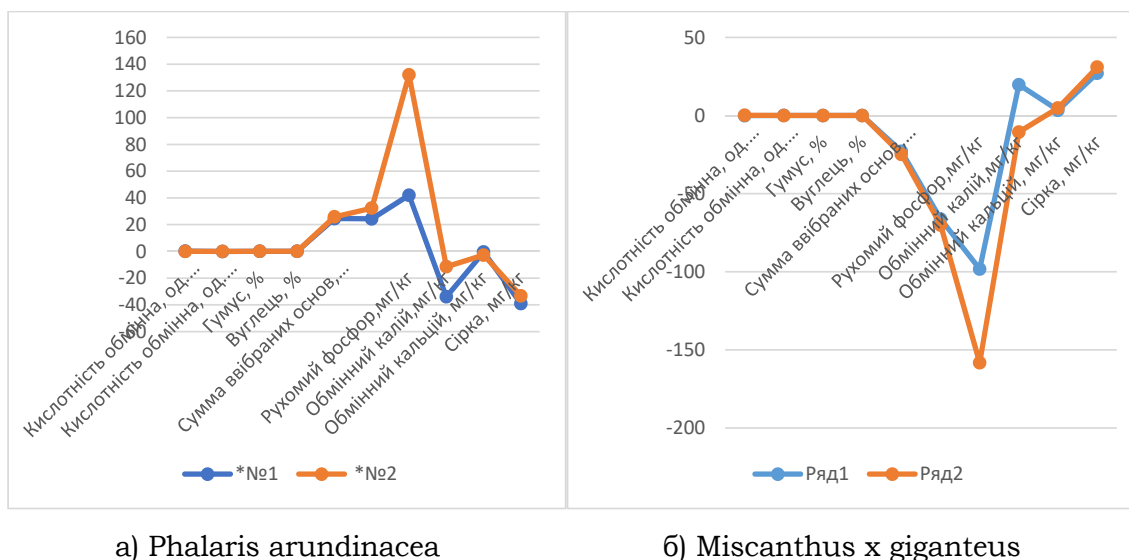


Рис. 1. Зміна агрохімічних та фізико-хімічних показників ґрунту за вирощування енергетичних культур, 2021–2023 рр.

Примітка: № 1 – ділянка, забруднена нафтопродуктами; № 2 – ділянка, забруднена пестицидами.  
Джерело: розроблено авторами.

збільшилася сума ввібраних основ – на 24,5–25,8 ммоль/100 г, вміст легкогідролізованого азоту – на 24,3–32,3 мг/кг, рухомого фосфору – на 42–132 мг/кг ґрунту. Показники обмінного калію, кальцію та рухомої сірки дещо зменшилися за рахунок виносу з ґрунту рослинами та недостатнім внесенням з мінеральними добривами (рис. 1а).

При вирощуванні *Miscanthus x giganteus* за рахунок великої вегетативної маси винос макроелементів був значно більшим, ніж внесення їх з мінеральними добривами: сума ввібраних основ знизилася на 22,9–24,8 ммоль/100 г, вміст легкогідролізованого азоту – на 66,3–70,1 мг/кг, рухомого фосфору – на 98,3–158,3 мг/кг, обмінного калію – на 10,6 мг/кг ґрунту. Вміст таких макроелементів, як обмінний кальцій, збільшився на 3,4–4,8 мг/кг, рухома сірка – на 27,1–31,0 мг/кг ґрунту (Romantschuk et al., 2024).

Як відзначають інші дослідники, вирощування міскантусу позитивно впливає і на родючість ґрунту, оскільки впродовж чотирьох років вирощування у ґрунті накопичується майже 20 т/га кореневищ, що еквівалентно 7–10 т/га органічних добрив і значно покращує родючість ґрунту (Блюм та ін., 2010; Гелетуха і Желєзна, 2014; Федорчук та ін., 2017).

У світі існує кілька органічних і неорганічних забрудників, але забруднення ґрунту важкими металами викликає велике занепокоєння. У Європейському Союзі забруднення ґрунтів важкими металами становить понад 37% випадків, за ними йдуть 33,7% випадків мінеральних масел, 13,3% випадків поліциклічних ароматичних вуглеводнів та інші (Vis & Berg, 2010; Del Grosso et al., 2014; Pandey et al., 2016; Кулик та ін., 2020).

Забруднення ґрунтів важкими металами становить глобальний інтерес з боку сучасної науки у зв'язку з підвищенням техногенного впливу на навколишнє природне середовище. небезпека від важких металів визначається тим, що на відміну від органічних забруднювачів вони не руйнуються, а переходять з однієї форми в іншу, зокрема, включаються у склад солей, оксидів, металлоорганічних сполук. За прогнозами, у перспективі важкі метали можуть стати більш небезпечними, ніж відходи атомних електростанцій, і поділити перше місце з пестицидами. За останні роки забруднення ними навколишнього середовища збільшилося у 2,5–3 рази, а у біохімічні цикли щорічно

надходить  $3 \times 10^5$  тонн свинцю,  $2 \times 10^3$  тонн кадмію (Kovalyova & Mozharivska, 2020).

Відзначимо, що період напіврозпаду та напівочищення ґрунту від пестицидів, нафтопродуктів та важких металів становить десятки років, тому на даний час першочерговим завданням багатьох вчених, безумовно, є пошук засобів та заходів для фітореабілітації ґрунтів (Скачок та ін., 2019).

У наших дослідженнях на ділянках перед закладанням досліду було відмічено перевищення ГДК рухомих форм вмісту хрому: на ділянці, забрудненій нафтопродуктами, – на 0,8 мг/кг, на ділянці, забрудненій пестицидами, – на 6,55 мг/кг. Вміст і інших сполук важких металів був також досить високим.

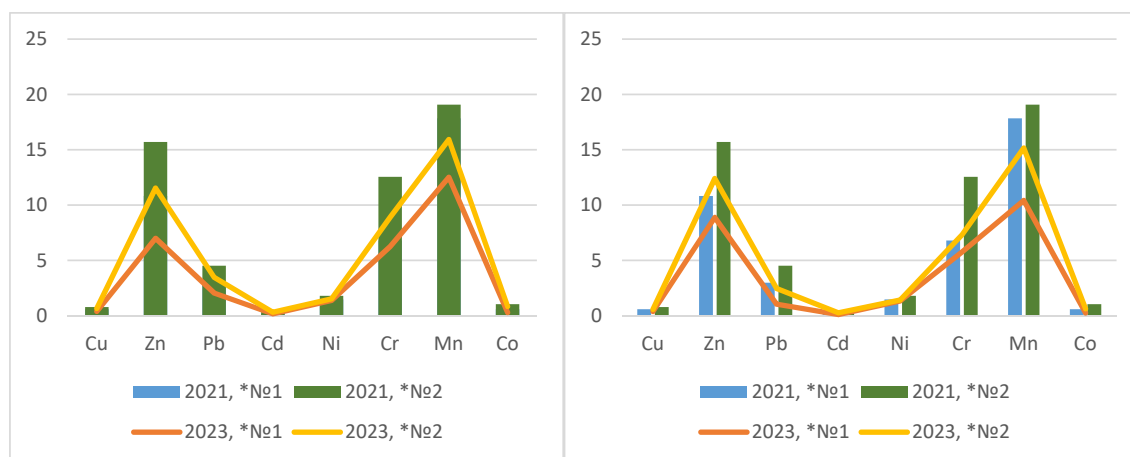
Встановлено, що валовий вміст стибію був досить високим і значно перевищував ГДК: на ділянці, забрудненій нафтопродуктами, він становив 172,11 мг/кг, на ділянці, забрудненій пестицидами, – 161,15 мг/кг. Також визначено невелике перевищення допустимого рівня кадмію на ділянці, забрудненій органічними пестицидами, на 0,39 мг/кг.

За результатами досліджень встановлено, що вміст токсикантів у ґрунті внаслідок вирощування енергетичних культур значно знижувався.

Зокрема, значно знижувався вміст рухомих форм важких металів за вирощування очеретянки звичайної: міді на 0,192 мг/кг на 1 ділянці (забруднення нафтопродуктами) та на 0,134 мг/кг на 2 ділянці (забруднення пестицидами); цинку на 3,83 та 4,17 мг/кг; свинцю на 0,94 та 1,05 мг/кг; кадмію на 0,041 та 0,057 мг/кг; нікелю на 0,092 та 0,274 мг/кг; хрому на 0,55; 3,65 мг/кг; марганцю на 5,33 та 3,15 мг/кг; кобальту на 0,301 та 0,201 мг/кг відповідно (рис. 2а).

За нашими дослідженнями встановлено, що порівняно з очеретянкою звичайною міскантус гігантський завдяки більшій біомасі виносив з ґрунту значно більше важких металів, крім цинку. Вміст міді – на 0,208 мг/кг на 1 ділянці (забруднена нафтопродуктами) та 2 ділянці (забруднена пестицидами); цинку – на 1,94 та 3,31 мг/кг; свинцю – на 1,94 та 2,06 мг/кг; кадмію – на 0,097 та 0,108 мг/кг; нікелю – на 0,152 та 0,382 мг/кг; хрому – на 1,06 та 5,25 мг/кг; марганцю – на 7,43; 3,92 мг/кг; кобальту – на 0,338 та 0,408 мг/кг відповідно (рис. 2б).

Також значно знижувався валовий вміст важких металів при вирощуванні енерге-



а) *Phalaris arundinacea*

б) *Miscanthus x giganteus*

Рис. 2. Зміна вмісту рухомих сполук хімічних елементів протягом 2021–2023 рр. за вирощування енергетичних культур, мг/кг

Примітка: № 1 – ділянка, забруднена нафтопродуктами; № 2 – ділянка, забруднена пестицидами.

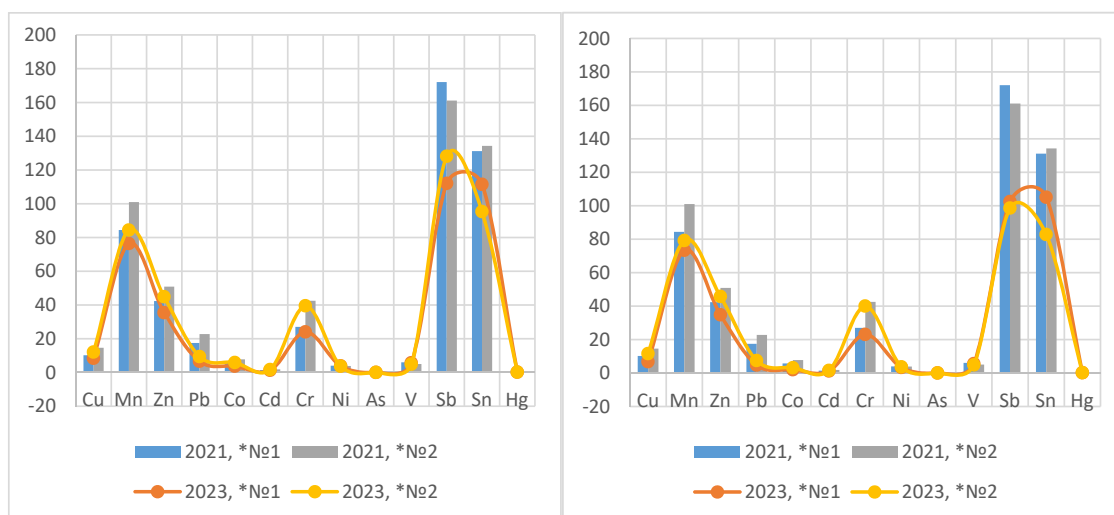
Джерело: розроблено авторами.

тичних культур на забруднених ґрунтах (Romanchuk et al., 2025).

Концентрація міді на досліджуваних ділянках, де вирощували енергетичні рослини, знижувалася: за вирощування очеретянки звичайної на 17%, за вирощування міскантусу гігантського на 33–20%; марганцю – на 10–16% та 13–32%; цинку – на 16–12% та 18–10%; свинцю – 62–59% та 73–67%; кобальту – 35–24% та 65–59%; кадмію – на 9–10% та 13–17%; хрому – на

11–7% та 15–6%; нікелю – на 3% та 17–4%; арсену – на 20–16% та 10–12%; ванадію – на 5–2% та 7–4%; стибію – 35–20% та 40–39%; стануму – 15–29% та 20–38%; ртуті – на 38–49% та 47–54% відповідно (рис. 3а, б).

Інші вчені підтверджують зменшення вмісту важких металів у ґрунтах при вирощуванні енергетичних культур, а саме рухомих сполук свинцю, кадмію, міді та цинку (Kovalyova & Mozharivska, 2020).



а) *Phalaris arundinacea*

б) *Miscanthus x giganteus*

Рис. 3. Зміна вмісту масової частки хімічних елементів протягом 2021–2023 рр. за вирощування енергетичних культур, мг/кг

Примітка: № 1 – ділянка, забруднена нафтопродуктами; № 2 – ділянка, забруднена пестицидами.

Джерело: розроблено авторами.



Поряд зі здатністю енергетичних рослин до фітореMediaції забруднених важкими металами ґрунтів встановлено, що вони мають потенціал до розкладання органічних забруднювачів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Доведено, що кореневі екsudати культур мають деструкційну здатність, адже вони розкладають пірен і фенатрен (Wanat et al., 2013; Gawronski et al., 2017). Виявлено, що поліфенольні сполуки, флавоноїди, присутні в ризосфері, наприклад *M. Giganteus*, стимулюють зростання мікроорганізмів, які утилізують поліциклічні ароматичні вуглеводні (Wanat et al., 2013; Barbosa et al., 2015).

При визначенні органічних забруднювачів у ґрунті ДДТ та його метаболіти не були виявлені на дослідних ділянках.

Гептахлор був виявлений на ділянці, забрудненій пестицидами, а завдяки вирощуванню енергетичних культур його вміст у ґрунті впродовж 2021–2023 рр. знизився після *Phalaris arundinacea* на 0,001 мг/кг, після *Miscanthus x giganteus* – на 0,002 мг/кг.

ГХЦГ (сума ізомерів) на 1 ділянці, забрудненій нафтопродуктами, становила 0,245 мг/кг, на 2 ділянці, забрудненій пестицидами, – 0,28 мг/кг, що перевищувало ГДК понад удвічі. На 1 ділянці вміст їх зменшився на 0,099 мг/кг при вирощуванні очеретянки та на 0,121 мг/кг при вирощуванні міскантусу, на 2 ділянці відповідно – на 0,12 та 0,143 мг/кг.

Вміст в ґрунті 2,4-Д-аміної солі не змінювався під час вирощування енергетичних культур і знаходився на рівні 2021 року 0,05 мг/кг.

Вміст нафтопродуктів на 1 ділянці, яка була забруднена нафтопродуктами, перед закладанням дослідів перевищував допустимий рівень більше ніж у 4 рази, на 2 ділянці, забрудненій пестицидами, – на 191 мг/кг. При вирощуванні очеретянки звичайної їх вміст знизився на ділянці, яка була забруднена нафтопродуктами, на 1364,14 мг/кг; на ділянці, забрудненій пестицидами, – на 565,52 мг/кг. Вирощування міскантусу гігантського також значно знижувало їх вміст в ґрунті – на 1160,08–564,15 мг/кг відповідно.

Вміст фенолів на ділянці, забрудненій нафтопродуктами, становив 0,5 мг/кг та знизився вдвічі за рахунок вирощування енергетичних культур. На ділянці, забрудненій пестицидами, їх вмісту не було виявлено.

### Висновки

Вирощування енергетичних рослин як фітореMediaнтів на забруднених землях доз-

воляє не лише знизити рівень деградації, а й підвищити агрономічну цінність цих ґрунтів. Висока продуктивність біомаси енергетичних культур може перетворити технологію фітореMediaції на прибуткову галузь для біоенергетичної промисловості. Енергетичні культури накопичують органіку в ґрунті, збільшуючи вміст карбону в ньому, інтенсивно поглинають вуглекислий газ і зменшують наслідки глобального потепління.

За результатами досліджень встановлено, що реакція ґрунтового розчину, вміст вуглецю та гумусу впродовж 2021–2023 років майже не змінилися за вирощування енергетичних культур на забруднених нафтопродуктами та пестицидами ділянках. При вирощуванні очеретянки звичайної на забруднених ґрунтах значно збільшилася сума ввібраних основ, вміст легкогідролізованого азоту, рухомого фосфору та дещо зменшився вміст обмінного калію, кальцію та рухомої сірки. На дослідних ділянках за вирощування міскантусу гігантського вміст макроелементів дещо знизився за рахунок великої вегетативної маси та недостатнього внесення з мінеральними добривами, водночас вміст обмінного кальцію та рухомої сірки дещо збільшився.

Вміст рухомих форм важких металів у ґрунті внаслідок вирощування енергетичних культур значно знижувався. Зокрема, вміст хрому знизився: на ділянці, забрудненій пестицидами, на 0,55 мг/кг при вирощуванні очеретянки та на 1,06 мг/кг при вирощуванні міскантусу; на ділянці, забрудненій нафтопродуктами, відповідно – на 3,65 та 5,25 мг/кг.

Також значно знижувався вміст масової частки важких металів, найбільше стибію: на ділянці, яка була забруднена пестицидами, – на 60 мг/кг при вирощуванні очеретянки та на 69,61 мг/кг ґрунту при вирощуванні міскантусу; на ділянці, яка була забруднена нафтопродуктами, – на 65,68 та 78,35 мг/кг. Концентрація кадмію на досліджуваних ділянках, де вирощували енергетичні рослини, знижувалася у межах 0,131–0,193 мг/кг при вирощуванні очеретянки звичайної та на 0,187–0,312 мг/кг при вирощуванні міскантусу гігантського відповідно.

Вміст ГХЦГ (суми ізомерів) на ділянці, забрудненій пестицидами, зменшився на 0,099 мг/кг при вирощуванні очеретянки на 0,121 мг/кг при вирощуванні міскантусу; на ділянці, забрудненій



нафтопродуктами, відповідно – на 0,12 та 0,143 мг/кг.

Що стосується вмісту нафтопродуктів, то кращий результат відмічено на ділянках при вирощуванні очеретянки звичайної: їх вміст знизився на ділянці, яка була забруднена нафтопродуктами на 1364,14 мг/кг; на ділянці, забрудненій пестицидами, на 565,52 мг/кг. Вирощування міскантусу гігантського також значно знижувало їх вміст в ґрунті – на 1160,08–564,15 мг/кг.

Вміст фенолів на ділянці, забрудненій нафтопродуктами, становив 0,5 мг/кг та

знизився удвічі за рахунок вирощування енергетичних культур.

Отримані результати дослідження реабілітації ґрунту, забрудненого органічними пестицидами та трансформаторним маслом, за вирощування рослин *Miscanthus x giganteus* та *Phalaris arundinacea* показали, що вони здатні акумулювати як важкі метали, так і органічні забруднювачі та нафтопродукти, тому потрібно продовжувати дані дослідження та вивчати накопичення у фітомасі енергетичних культур токсичних речовин та можливість їх використання.

### Список використаної літератури

Блюм Я.Б., Гелетука Г.Г., Григорюк І.П. та ін. Новітні технології біоенергоконверсії. Київ : Аграр Медіа Груп, 2010. 326 с.

Борецька І.Ю., Джура Н.М., Романюк О.І. ФітореMediaція техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>.

Гелетука Г.Г., Железна Т.А. Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. *Аналітична записка Біоенергетичної асоціації України*. 2014. № 7. С. 12–16.

Грабак Н.Х., Будикіна Ю.І. Техногенно забруднені землі та шляхи їх безпечного використання в агропромисловому комплексі. *Наукові праці Вінницького національного аграрного університету. Серія «Екологія»*. 2014. № 220 (232). С. 83–87.

Кулик М.І., Галицька М.А., Самойлік М.С., Жорник І.І. ФітореMediaційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України. *Agrology*. 2019. № 2 (1). С. 65–73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020>.

Ласло О.О. Відновлення порушених земель сільськогосподарського призначення за допомогою біореMediaції. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. 2014. № 1 (65). С. 94–100.

Пацула О.І., Фецюх А.Б., Буньо Л.В. Використання *Salix viminalis* L. для фітореMediaції ґрунтів, забруднених важкими металами. *Екологічні науки*. 2018. № 2 (20). С. 101–106.

Рахметов Д.Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні. Київ : Аграр Медіа Груп, 2011. 398 с.

Самохвалова В.Л. Біологічні методи реMediaції ґрунтів, забруднених важкими металами. *Біологічні студії*. 2014. № 8 (1). С. 217–236.

Скачок А.М., Потапенко Л.В., Горбаченко Н.І. Агроекологічна ефективність елементів технології вирощування міскантусу на радіоактивно забруднених ґрунтах. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 9. С. 59–66.

Федорчук М.І., Коковіхін С.В., Каленська С.М. та ін. Агротехнологічні аспекти вирощування енергетичних культур в умовах Півдня України. Херсон, 2017. С. 42–45.

Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фітореMediaції та фіторекультиватії у сучасних системах землеробства. Вінниця : ТОВ «Друк», 2022. 1200 с.

Barbosa B., Boléo S., Sidella S., Costa J., Duarte M.P., Mendes B., Cosentino S.L., Fernando A.L. Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Research*. 2015. № 8 (4). P. 1500–1511. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9688-9>.

Basumatary B., Saikia R., Bordoloi S. Phytoremediation of crude oil contaminated soil using nut grass *Cyperus rotundus*. *Journal of Environmental Biology*. 2012. № 33 (5). P. 891–896.

de Abreu C.A., Coscione A.R., Pires A.M., Paz-Ferreiro J. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration*. 2012. № 123. P. 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2012.04.013>.

Gawronski S.W., Gawronska H., Lomnicki S., Sæbo A. Plants in Air Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*. 2017. № 83. P. 319–346. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.008>.

- Kovalyova S., Mozharivska I. Heavy metal concentration in soils while growing energy crops in the radioactively contaminated territory. *Scientific Horizons*. 2020. № 03 (88). P. 121–126. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-88-3-121-126>.
- Meers E., Van Slycken S., Adriaensen K., Ruttens A., Vangronsveld J., Du Laing G., Witters N., Thewys T., Tack F.M.G. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*. 2010. № 78 (1). P. 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.015>.
- Moubasher H.A., Hegazy A.K., Mohamed N.H., Moustafa Y.M., Kabieli H.F., Hamad A.A. Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015. № 98. P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.11.019>.
- Pandey V.C., Bajpai O., Singh N. Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. № 54. P. 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078>.
- Pandey V.C., Pandey D.N., Singh N. Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants. *Journal of Cleaner Production*. 2015. № 86. P. 37–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.030>.
- Romanchuk L.D., Matviichuk N.H., Abramova I.V., Matviichuk B.V., Tryboi O. Removal of heavy metals by energy crops when grown on technologically contaminated soils. *Ecological Engineering and Environmental Technology*. 2025. № 26 (1). P. 92–102. <https://doi.org/10.12912/27197050/195635>.
- Romantschuk L., Matviichuk N., Mozharivska I., Matviichuk B., Ustyenko V., Tryboi O. Phytoremediation of Soils by Cultivation *Miscanthus x Giganteus* L. and *Phalaris arundinacea* L. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2024. № 6 (25). P. 137–147. <https://doi.org/10.12912/27197050/186902>.
- Stephen Del Grosso, Pete Smith, Marcelo Galdos, Astley Hastings, William Parton. Sustainable energy crop production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2014. № 9–10. P. 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.07.007>.
- Vis M.W., D. van den Berg. *Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments*. Best Practices and Methods Handbook. Italy, 2010. Vol. I. 220 p.
- Wanat N., Austruy A., Joussein E., Soubrand M., Hitmi A., Gauthier-Moussard C., Lenain J.-F., Vernay P., Munch J.C., Pichon M. Potentials of *Miscanthus x giganteus* grown on highly contaminated Technosols. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. № 126–127. P. 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.001>.
- Witters N., Mendelsohn R. O., Van Slycken S., Weyens N., Schreurs E., Meers E., Tack F., Carleer R., Vangronsveld J. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass and Bioenergy*. 2012. № 39. P. 454–469. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.08.016>.

## References

- Blum, Ya.B., Heletukha, H.H., & Hryhoriuk, I.P. (2010). Novitni tekhnolohii bioenerhokonversii [The latest technologies of bioenergy conversion]. Kyiv : Ahrar Media Hrup [Agrar Media Group] [in Ukrainian].
- Boretska, I.Iu., Dzhura, N.M., & Romaniuk, O.I. (2021). Fitoremediatsiia tekhnohenno zabrudnennykh gruntiv z vykorystanniam enerhetychnykh kultur [Phytoremediation of technologically polluted soils using energy crops]. *Ekolohichni nauky [Environmental sciences]*, 6 (39), 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11> [in Ukrainian].
- Heletukha, H.H., & Zheliezna, T.A. (2014). Perspektyvy vykorystannia vidkhodiv silskoho hospodarstva dlia vyrobnytstva enerhii v Ukraini [Prospects of using agricultural waste for energy production in Ukraine]. *Analitichna zapyska BAU [Analytical note of BAU]*, 7, 12–16 [in Ukrainian].
- Hrabak, N.Kh., & Budykina, Yu.I. (2014). Tekhnohenno zabrudneni zemli ta shliakhy yikh bezpechnoho vykorystannia v ahropromyslovomu kompleksi [Technogenically polluted lands and ways of their safe use in the agro-industrial complex]. *Naukovi pratsi. Ekolohiia [Scientific works. Ecology]*, 220 (232), 83–87 [in Ukrainian].
- Kulyk, M.I., Galytska, M.A., Samoylik, M.S., & Zhornyk, I.I. (2019). Fitoremediatsiini aspekty vykorystannia enerhetychnykh kultur v Ukraini [Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine]. *Ahrolohiia [Agrology]*, 2 (1), 65–73. <https://doi.org/10.32819/2617-6106.2018.14020> [in Ukrainian].

- Laslo, O.O. (2014). Vidnovlennia porushenykh zemel silskohospodarskoho pryznachennnia za dopomohoiu bioremediatsii [Restoration of disturbed agricultural lands using bioremediation]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia* [Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management], 1 (65), 94–100 [in Ukrainian].
- Patsula, O.I., Fetsiukh, A.B., & Buno, L.V. (2018). Vykorystannia *Salix viminalis* L. dlia fitoremediatsii gruntiv, zabrudnennykh vazhkymy metalamy [Use of *Salix viminalis* L. for phytoremediation of soils contaminated with heavy metals]. *Ekolohichni nauky* [Environmental sciences], 2 (20), 101–106 [in Ukrainian].
- Rakhmetov, D.B. (2011). Teoretychni ta prykladni aspekty introduktsii rosllyn v Ukraini [Theoretical and applied aspects of plant introduction in Ukraine]. Kyiv : Ahrar Media Hrup [in Ukrainian].
- Samokhvalova, V.L. (2014). Biolohichni metody remediatsii gruntiv, zabrudnennykh vazhkymy metalamy [Biological methods of remediation of soils contaminated with heavy metals]. *Biolohichni studii* [Biological studies], 8 (1), 217–236 [in Ukrainian].
- Skachok, L.M., Potapenko, L.V., & Horbachenko, N.I. (2019). Ahroekolohichna efektyvnist elementiv tekhnolohii vyroshchuvannia miskantusu na radioaktyvno zabrudnennykh gruntakh [Agroecological efficiency of elements of miscanthus growing technology on radioactively contaminated soils]. *Visnyk ahrar. nauky* [Visnyk agrar. science], 9, 59–66 [in Ukrainian].
- Fedorchuk, M.I., Kokovikhin, S.V., & Kalenska, S.M. (2017). Ahrotekhnolohichni aspekty vyroshchuvannia enerhetychnykh kultur v umovakh pivdnia Ukrainy [Agrotechnological aspects of growing energy crops in southern Ukraine]. Kherson, 42–45 [in Ukrainian].
- Tsytsiura, Ya.H., Shkatula, Yu.M., Zabarna, T.A., & Pelekh, L.V. (2022). Innovatsiini pidkhody do fitoremediatsii ta fitorekultyvatsii u suchasnykh systemakh zemlerobstva [Innovative approaches to phytoremediation and phytoremediation in modern farming systems]. Vinnytsia : TOV “Druk” [in Ukrainian].
- Barbosa, B., Boléo, S., Sidella, S., Costa, J., Duarte, M.P., Mendes, B., Cosentino, S.L., & Fernando, A.L. (2015). Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils Using the Perennial Energy Crops *Miscanthus* spp. and *Arundo donax* L. *Bioenergy Research*, 8 (4), 1500–1511. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9688-9> [in English].
- Basumatary, B., Saikia, R., & Bordoloi, S. (2012). Phytoremediation of crude oil contaminated soil using nut grass *Cyperus rotundus*. *Journal of Environmental Biology*, 33 (5), 891–896 [in English].
- de Abreu, C.A., Coscione, A.R., Pires, A.M., & Paz-Ferreiro, J. (2012). Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2012.04.013> [in English].
- Gawronski, S.W., Gawronska, H., Lomnicki, S., & Sæbo, A. (2017). Plants in Air Phytoremediation. *Advances in Botanical Research*, 83, 319–346. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.12.008> [in English].
- Kovalyova, S., & Mozharivska, I. (2020). Heavy metal concentration in soils while growing energy crops in the radioactively contaminated territory. *Scientific Horizons*, 03 (88), 121–126. <https://doi.org/10.33249/2663-2144-2020-88-3-121-126> [in English].
- Meers, E., Van Slycken, S., Adriaensen, K., Ruttens, A., Vangronsveld, J., Du Laing, G., Witters, N., Thewys, T., & Tack, F.M.G. (2010). The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for ‘phytoattenuation’ of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment. *Chemosphere*, 78 (1), 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.08.015> [in English].
- Moubasher, H.A., Hegaz y, A.K., Mohamed, N.H., Moustafa, Y.M., Kabieli, H.F., & Hamad, A.A. (2015). Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 98, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.11.019> [in English].
- Pandey, V.C., Bajpai, O., & Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078> [in English].
- Pandey, V.C., Pandey, D.N., & Singh, N. (2015). Sustainable phytoremediation based on naturally colonizing and economically valuable plants. *Journal of Cleaner Production*, 86, 37–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.030> [in English].
- Romantschuk, L., Matviichuk, N., Mozharivska, I., Matviichuk, B., Ustymenko, V., & Tryboi, O. (2024). Phytoremediation of Soils by Cultivation *Miscanthus x Giganteus* L. and

Phalaris arundinacea L. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 6 (25), 137–147. <https://doi.org/10.12912/27197050/186902> [in English].

Romanchuk, L.D., Matviichuk, N.H., Abramova, I.V., Matviichuk, B.V., Tryboi, O. (2025). Removal of heavy metals by energy crops when grown on technologically contaminated soils. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 26 (1), 92–102. <https://doi.org/10.12912/27197050/195635> [in English].

Stephen Del Grosso, Pete Smith, Marcelo Galdos, Astley Hastings, & William Parton. (2014). Sustainable energy crop production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 9–10, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.07.007> [in English].

Vis, M.W., D. van den Berg (2010). *Biomass Energy Europe Harmonization of biomass resource assessments*. Best Practices and Methods Handbook. Italy, 1 [in English].

Wanat, N., Austruy, A., Joussein, E., Soubrand, M., Hitmi, A., Gauthier-Moussard, C., Lenain, J.-F., Vernay, P., Munch, J.C., & Pichon, M. (2013). Potentials of Miscanthus × giganteus grown on highly contaminated Technosols. *Journal of Geochemical Exploration*, 126–127, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.001> [in English].

Witters, N., Mendelsohn, R.O., Van Slycken, S., Weyens, N., Schreurs, E., Meers, E., Tack, F., Carleer, & R., Vangronsveld, J. (2012). Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass and Bioenergy*, 39, 454–469. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.08.016> [in English].

Отримано: 23.01.2025

Прийнято: 17.02.2025