



УДК 631.4:638.132(477.41/.42)
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.23>

ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ДЕРНОВО-ПІДЗОЛИСТОГО ҐРУНТУ ЗА ВИРОЩУВАННЯ НЕКТАРОПИЛКОНОСНИХ РОСЛИН В УМОВАХ ПОЛІССЯ

С. Ф. Разанов¹, М. І. Куценко²

Ґрунтове середовище характеризується накопиченням різноманітних речовин, у тому числі і токсичних, таких як радіонукліди. У процесі експлуатації земельних ресурсів кількість токсичних речовин постійно змінюється внаслідок їх колообігу. Частина токсикантів у ґрунті надходить природним шляхом з породою та атмосферними опадами, а частина – в результаті техногенної діяльності населення.

Останнім часом більшість радіоактивних речовин надходить у ґрунт, зокрема в орний його прошарок, внаслідок використання атомної енергетики, особливо під час різноманітних аварій та хімізації галузі рослинництва. За таких умов виникає потреба в контролі за радіоактивними речовинами в ґрунтах та проведенні заходів щодо підвищення їх екологічної безпеки. Одним із високоефективних екологічних заходів щодо зниження вмісту в ґрунтах радіоактивних елементів є фіторемедіація.

Ми виявили, що нектаропилконосні рослини, такі як буркун білий, розторопша плямиста, головачень круглоголовий, еспарцет піщаний, люпин вузьколистий, фацелія пажитколиста та вика яра, мають певну схильність до накопичення у своїй біомасі ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra та ²³²Th, що може бути ефективним при комплексному підході до відновлення порушених ґрунтів сільськогосподарських угідь, які зазнали техногенного забруднення.

У результаті проведених досліджень встановлено, що ефективність фіторемедіації дерново-підзолистого ґрунту залежала від ботанічного походження рослин, урожайності та виду радіоактивних речовин. Найвищий рівень вивезення з ґрунту радіоактивних речовин з урожаєм нектаропилконосних рослин спостерігався за ⁴⁰K. Сумарна маса радіоактивних речовин ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra та ²³²Th, яка виноситься з урожаєм та пилконосними рослинами, становить до 7 978 374,2 Бк з 1 гектару.

У зростанні регресії вивезення з дерново-підзолистого ґрунту радіоактивних речовин з урожаєм нектаропилконосних рослин спостерігається така послідовність: фацелія пажитколиста → вика

¹ доктор сільськогосподарських наук, професор,
професор кафедри лісового та садово-паркового господарства
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: razanovsergej65@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4883-2696

² аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища
(Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця)
e-mail: nicolaskutsenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9373-1405

яра → буркун білий → еспарцет піщаний → головатень круглоголовий → розторопиша плямиста → люпин вузьколистий.

Ключові слова: дерново-підзолистий ґрунт, нектаропилконосні рослини, фіторе mediaція, вегетативна маса, насіння, радіоактивні речовини.

PHYTOREMEDIATION OF SOD-PODZOLIC SOIL BY GROWING NECTAR-POLLEN-BEARING PLANTS IN THE CONDITIONS OF POLISSYA

S. F. Razanov, M. I. Kutsenko

The soil environment is characterized by the accumulation of various substances, including toxic ones such as radionuclides. During the exploitation of land resources, the amount of toxic substances is constantly changing due to their circulation. Some of the toxicants enter the soil naturally with rock and atmospheric precipitation, and some as a result of the technogenic activity of the population.

In the recent period, it has been noted that the majority of radioactive substances enter the soil, in particular its arable layer, as a result of the use of nuclear energy, especially during various accidents and chemicalization of the crop sector. Under such conditions, there is a need to control radioactive substances in soils and take measures to improve their environmental safety. One of the highly effective environmental measures to reduce the content of radioactive elements in soils is phytoremediation.

Our research has revealed that nectar-pollinated plants such as: melilotus albus, milk thistle, great globe thistle, sand sainfoin, narrow-leaved lupine, tansy and spring vetch have a certain tendency to accumulate ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th in their biomass, which can be effective in an integrated approach to restoring disturbed soils of agricultural lands that have been subjected to technogenic pollution.

As a result of the research, it was found that the effectiveness of phytoremediation of sod-podzolic soil depended on the botanical origin of the plants, yield and type of radioactive substances. The highest level of removal of radioactive substances from the soil with the yield of nectar-pollinated plants was observed at ^{40}K . The total mass of radioactive substances ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra and ^{232}Th , which is carried out with crops and pollen-bearing plants, is up to 7978374.2 Bq per 1 hectare.

In the increasing regression of the removal of radioactive substances from sod-podzolic soil with the harvest of nectar-pollen-bearing plants, the following sequence is observed: Phacelia tansy → spring vetch → melilotus albus → sand sainfoin → great globe thistle → milk thistle → narrow-leaved lupine.

Key words: sod-podzolic soil, nectar-pollinated plants, phytoremediation, vegetative mass, seeds, radioactive substances.

Вступ

Наслідки токсичного забруднення ґрунту надзвичайно численні та далекосяжні. Вони значно впливають на екосистему, зокрема на біорізноманіття уражених територій, знижуючи кількість і варіативність видів рослин. Окрім цього, забруднення сприяє процесам так званої деградації ландшафту, перетворюючи ґрунти на безплідну і непридатну для подальшого сільськогосподарського чи комерційного використання територію.

Аграрії, прагнучи підвищити врожайність, часто вдаються до застосування надмірних норм мінеральних добрив. Ці речовини, безумовно, стимулюють ріст рослин, але водночас сприяють забрудненню ґрунтів різними токсикантами.

Потрапляння токсичних речовин у ґрунт і подальше проникнення їх у підземні водонасінні горизонти створює критичну небез-

пеку як для доступу до питної води, так і для забезпечення зрошувальних потреб сільського господарства.

Одним із головних наслідків забруднення територій є погіршення якості ґрунту, що призводить до втрати поживних речовин, критичної для його родючості. За таких умов ґрунт стає неспроможним підтримувати вирощування сільськогосподарських культур або забезпечувати середовище для дикої фауни, що в екстремальних випадках може ініціювати процес опустелювання. Водночас особливу загрозу становлять ризики для здоров'я людини: через забруднений харчовий ланцюг і водні ресурси населення може зазнавати серйозних негативних наслідків для організму. Серед найбільш поширених захворювань, викликаних вживанням заражених продуктів чи води, виділяють респіраторні порушення, вроджені аномалії та онкологічні хвороби.

Серед низки токсикантів ґрунтів сільськогосподарського призначення на деяких територіях, особливо у зоні техногенного навантаження аварії на Чорнобильській АЕС та інтенсивного землеробства, є радіонукліди, серед яких – Цезій-137 (^{137}Cs), Калій-40 (^{40}K), Радій-226 (^{226}Ra) та Торій-232 (^{232}Th) (Прістер і Лещенко, 1996).

Цезій-137 є одним із ключових джерел радіоактивного забруднення біосфери. Він присутній у радіоактивних осадах, відходах та викидах, пов'язаних із обробкою матеріалів атомних електростанцій. Цезій інтенсивно поглинається ґрунтом та донними відкладами, а у водних середовищах здебільшого перебуває у вигляді іонів. Цей радіонуклід також потрапляє в рослинність і біологічні організми, включно з людиною (Nabadwip et al., 2017; Velasco & Anjos, 2021).

В організм людини Цезій-137 проникає переважно через дихальну систему та травний тракт. Близько 80% цього елемента після потрапляння накопичується в м'язових тканинах, 8% – у кістках, а решта 12% рівномірно розподіляється між іншими тканинами (Разанов та ін., 2021).

Калій-40 є нестабільним ізотопом калію, який має атомний номер 19 та масове число 40. Період його напіврозпаду становить близько 1,25 мільярда років, а активність одного грама хімічно чистого ізотопу досягає $2,652 \times 10^5$ Бк.

Цей ізотоп є природною складовою частиною калію і має ізотопну поширеність 0,0117%.

Присутність Калію-40 в організмі людини є джерелом природної радіоактивності, яка досягає 4–5 кБк (вміст залежить від статі та віку, оскільки концентрація калію у тканинах може варіюватися). Середньорічна ефективна доза внутрішнього опромінення через розпад Калію-40 становить близько 180 мкЗв. Зовнішнє річне опромінення в районах зі звичайним радіаційним фоном оцінюється в середньому на рівні 120 мкЗв. Водночас сукупна середньосвітова річна доза від усіх джерел іонізуючого випромінювання сягає близько 2200 мкЗв (Nabadwip et al., 2017).

Торій-232 – природний радіоактивний ізотоп хімічного елемента торію з масовим числом 232 та майже стовідсотковою ізотопною поширеністю. Це найбільш довговічний ізотоп торію. Торій-232 є альфа-випромінювачем, його період напіврозпаду становить близько $1,4 \times 10^{10}$ років.

Процеси видобування торієвих руд, їх переробки з метою отримання металевого торію та подальшого застосування у промисловості супроводжуються професійними ризиками. Це зумовлено тим, що торій завжди виділяє продукти свого розпаду у різних пропорціях. Гранично допустима концентрація ^{232}Th у повітрі робочих приміщень становить 2×10^{-15} кюрі на літр. Хоча токсичність торію порівняно невелика, його потрапляння до організму може спричинити розвиток злоякісних новоутворень через значний проміжок часу (Bangotra et al., 2016).

Радій – радіоактивний елемент II групи періодичної системи елементів із порядковим номером 88. Найбільше значення має ізотоп ^{226}Ra з періодом напіврозпаду 1620 років, який є одним із продуктів розпаду урану. ^{226}Ra у розсіяному стані присутній у всіх об'єктах мертвої та живої природи, а його видобування здійснюється з урано-радієвих руд.

Радій-226 використовується для отримання радону, який входить до складу радонових ванн. У минулому радій широко застосовувався у кюрі-терапії для лікування пухлин шляхом опромінення. Проте потрапляння ^{226}Ra до організму людини становить серйозну небезпеку. У таких випадках необхідно реалізовувати спеціальні заходи для якнайшвидшого виведення цього радіоактивного ізотопу. Гранично допустима кількість ^{226}Ra в організмі людини не повинна перевищувати 0,1 мккюрі (Akozcan et al., 2018).

ґрунти є джерелом накопичення як природних, так і штучних радіоізотопів, звідки ці токсиканти мігрують через рослинну продукцію в живі організми, спричиняючи низку порушень (Uosif et al., 2024), тому очищення ґрунтів, які зазнали радіоактивного забруднення, є одним із важливих заходів зниження опромінення населення. На даний час інтерес становить очищення ґрунтів від радіоізотопів за рахунок фітореMediaції.

Технології фітореMediaції базуються на природній здатності певних видів рослин поглинати, акумулювати та переробляти елементи й хімічні сполуки, які забруднюють навколишнє середовище. Завдяки цим властивостям рослини використовуються для вилучення, стабілізації, розкладання або випаровування забруднюючих речовин із ґрунту, води чи повітря (Burger & Lichtscheidl, 2018).

ФітореMediaція як метод екологічної дезактивації забруднюючих речовин вини-

кла у 1980-х роках ХХ століття і ґрунтується на застосуванні рослин, грибів і водоростей для очищення довкілля. Цей підхід забезпечує природний спосіб відновлення якості повітря, ґрунтів чи водойм, що виключає потребу у хімічних реагентах. На відміну від традиційних методів дезактивації, які часто передбачають використання хімічних речовин або переміщення забруднень до інших територій, фіторе mediaція є екологічно безпечнішою альтернативою.

Серед її основних переваг можна виокремити ефективність, безпечність для довкілля, економічну доступність, а також здатність до масштабування навіть на великих територіях. Цей метод особливо актуальний для вирішення проблем із забрудненням сільськогосподарських угідь. Окрім усунення наслідків деградації ґрунтів, він сприяє збереженню продовольчої безпеки.

Фіторе mediaція дозволяє ефективно очищувати ґрунт від вуглеводнів, бензолів, важких металів, радіонуклідів, фенолів, розчинників та інших забруднювачів. При цьому метод характеризується порівняно низькою вартістю та високою універсальністю у застосуванні.

Матеріал і методи

Для проведення дослідження використовували дерново-підзолисті ґрунти перелогів. Розмір площі ділянок – 25 м² кожна. Нектаропилконосні рослини вирощували без мінерального удобрення ґрунтів.

Відбір ґрунтів для радіологічних досліджень проводили методом конверту, який передбачає відбір зразків з кожного поля у п'яти різних місцях (по квадрату і по центру) на глибині переорювання ґрунту. Відбір зразків ґрунту із змішаної з п'яти точок партії робили методом точкових проб по 0,5 кг. Вміст радіонуклідів (¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra та ²³²Th) проводили гамма-спектрометричним методом на пристрої гамма-спектрофотометр СЕГ-05 у сертифікованій лабораторії смт. Чабани Київської області у Державній установі «Держґрунтохорона».

Дослідження проводили в умовах території Коростенського району Житомирської області.

Відбір вегетативної маси нектаропилконосних рослин (буркун білий, розторопша плямиста, головатень круглоголовий, еспарцет піщаний, люпин вузьколистий, фацелія пижмолиста та вика яра) проводився по завершенню фази дозрівання насіння. Площа скошування становила 1 м² у декількох точках по кожній культурі. Після обмо-

лоту насіння з отриманої загальної партії відбирали зразки вегетативної маси та насіння методом точкових проб – по 5 кг.

Характеристика рослин-фіторе mediaнтів. Буркун білий належить до сімейства бобових та є медоносною культурою. Рослина поглинає велику кількість азоту з повітря, підвищуючи тим самим родючість ґрунту. Має добре розвинену розгалужену кореневу систему, яка здатна проникати в ґрунт на глибину до 4 м (Ткачук, 2017, 2021). Залишає в ґрунті 120 т/га сухої речовини коренів і стерні. Висота рослини сягає від 80 см до 2 м залежно від вологості ґрунту. В умовах посушливих регіонів буркун білий є більш низькорослим. Стебла рослини прямі, іноді можуть бути розлогими, зелені, знизу червонуваті, добре розгалужені.

Еспарцет піщаний є цінною медоносною рослиною. З посіву 1 га можна отримати 150 кг високоякісного меду. Стебла еспарцету сягають 60–120 см заввишки, мають ребристу форму. Листки складні з непарноперистими листочками (Петриченко і Лихочвор, 2020). Квітки рожевого кольору, суцвіття – китиця. Запилення рослини відбувається перехресно. Плід еспарцету представлений однонасінними бобами, які мають сітчасту поверхню. Насіння ниркоподібне, блискуче, зелено-жовте. Маса 1000 насінин еспарцету піщаного становить 14–16 г (Зінченко та ін., 2001).

Коренева система еспарцету добре розвинена, глибина залягання одного кореня в ґрунті може сягати понад 4 м у глибину (Разанов та ін., 2018).

Вика яра є однією з найпоширеніших однорічних бобових рослин. Росте в поліському, лісостеповому і степовому регіонах України.

Кормова цінність вики є досить високою і не поступається іншим багаторічним бобовим травам: на 100 кг сухої маси припадає 46 кормових одиниць. У кожній кормовій одиниці міститься 123 г перетравного протеїну.

За вищого рівня агротехніки урожайність зеленої маси вико-вівсяної суміші становить 200–300 т, сіна – 40–60 т/га (Петриченко і Лихочвор, 2020).

Вика має добре розвинену кореневу систему. Стебла рослини тонкі, повзучі, висотою більше 120 см. Листки парноперисті, на кінцях мають вусики. Квітки червонувато-фіолетові або червоні, сидять у пазухах листків.

У сучасному сільськогосподарському виробництві люпин відіграє важливу роль як кормова культура для худоби та як сидеральна культура, що використовується для збагачення ґрунту зеленим добривом. Розмежування між кормовими та сидеральними видами люпину зумовлене різною концентрацією гірких токсичних речовин – алкалоїдів – у рослинах.

Завдяки своїй добре розвиненій кореневій системі, яка здатна ефективно засвоювати важкорозчинні сполуки поживних елементів із ґрунту, а також через активну співпрацю з бульбочковими бактеріями, кормовий люпин демонструє високу продуктивність. Урожай зеленої маси може досягати 350 центнерів на гектар і більше з середнім вмістом азоту близько 0,6%. При заорюванні цієї зеленої маси в ґрунт як добрива ґрунт збагачується 180–200 кг/га біологічного азоту та отримує 35–40 т/га органічної речовини (Зінченко та ін., 2001; Петриченко і Лихочвор, 2020). Це робить люпин цінною культурою для підвищення родючості ґрунту і раціонального ведення землеробства.

Розторопша плямиста – це культура, яку висівають рано навесні. Оптимальний період посіву збігається зі строками сівби пізніх ярових культур, що забезпечує рівномірні сходи вже на 8–10-й день при середньодобовій температурі +10°C. Найкраще ця рослина росте на пухких, слабокислих (рН 5,5–6,0) супіщаних ґрунтах.

Сировину, тобто плоди, збирають у третій декаді серпня, коли насіння досягає стиглості. Цей момент визначають за висиханням і пожовтінням суцвіть (кошиків), які починають розпадатися. Оскільки насіння досягає поступово та легко висипається з кошиків, збір проходить у кілька етапів (Климчук та ін., 2011).

Фацелія належить до родини водолистникових і є однорічною рослиною. Її стебло пряме, соковите й крихке, має висоту від 60 до 90 см і утворює до двадцяти бокових пагонів. Суцвіття складається з 4–9 дзвоникоподібних квіток. Перші квіти розпускаються вже через місяць після висівання насіння в ґрунт, а цвітіння триває безперервно протягом двох місяців (Петриченко і Лихочвор, 2020).

Головатень круглоголовий належить до родини айстрових (складноцвітих) і є багаторічною трав'янистою рослиною заввишки до 2 метрів, яка має широкий ареал поширення. Порівняно з головатенем звичайним

цей вид дає значно більші врожаї, тому його ввели в лікарську культуру. Він є єдиним джерелом ехінопсину – отруйного алкалоїду хінолінового ряду (C₁₀H₉NO).

Результати і обговорення

Результати досліджень (табл. 1) показали, що сумарне винесення з дерново-підзолистого ґрунту радіоактивних речовин вегетативною масою розторопші плямистої становить 3 692 637 Бк з 1 га площі, з них: ¹³⁷Cs – 2,46%, ⁴⁰K – 91,4%, ²²⁶Ra – 3,85% та ²³²Th – 2,29%. За вирощування буркуну білого з вегетативною масою виносяться з ґрунту 1 909 208 Бк/га радіоактивних речовин, з них: ¹³⁷Cs – 1,99%, ⁴⁰K – 87,22%, ²²⁶Ra – 5,37% та ²³²Th – 5,42%. З вегетативною масою головатню круглоголового сумарне винесення радіоактивних речовин становить 3 213 472 Бк/кг, з них: ¹³⁷Cs – 3,53%, ⁴⁰K – 85,77%, ²²⁶Ra – 5,35% та ²³²Th – 5,33%. За вирощування люпину вузьколистого з вегетативною масою з ґрунту із розрахунку на 1 га виносяться 7 965 774 Бк/га радіоактивних речовин, з них: ¹³⁷Cs – 39,85%, ⁴⁰K – 50,3%, ²²⁶Ra – 4,37% та ²³²Th – 5,38%. Вирощування фацелії пижмолистої на дерново-опідзолених ґрунтах сприяло винесенню з вегетативною масою сумарної кількості радіоактивних речовин, яка становила 1 138 940 Бк/га, з них: ¹³⁷Cs – 21,0%, ⁴⁰K – 58,9%, ²²⁶Ra – 5,45% та ²³²Th – 14,6%. З вегетативною масою еспарцету піщаного з ґрунту виносяться 5 016 397 Бк/га, з них: ¹³⁷Cs – 9,65%, ⁴⁰K – 81,13%, ²²⁶Ra – 2,49%. Вегетативна маса вики ярої виносить з 1 га площі 1 665 510 Бк, з них: ¹³⁷Cs – 49,47%, ⁴⁰K – 37,8%, ²²⁶Ra – 1,14% та ²³²Th – 1,26%.

За результатами досліджень (табл. 2) встановлено, що з насінням розторопші плямистої з дерново-підзолистого ґрунту виносяться 2020,1 Бк з 1 гектару радіоактивних речовин, з них з ¹³⁷Cs – 18,5%, ⁴⁰K – 92,12%, ²²⁶Ra – 3,88% та ²³²Th – 2,14%. З насінням буркуну білого з ґрунту виносяться 1444,1 Бк з 1 га, з них 1,85% – ¹³⁷Cs, 89,25% – ⁴⁰K, 4,71% – ²²⁶Ra та 4,43% – ²³²Th. За вирощування головатню круглоголового з 1 гектару площі виносяться з насінням 3184,9 Бк радіоактивних речовин, із яких 2,89% – ¹³⁷Cs, 89,39% – ⁴⁰K, 4,10% – ²²⁶Ra та 3,61 – ²³²Th. З насінням люпину вузьколистого з ґрунту виносяться 12592,2 Бк з 1 га радіоактивних речовин, із яких 36,87% – ¹³⁷Cs, 52,05% – ⁴⁰K, 4,37% – ²²⁶Ra та 6,68% – ²³²Th. Сумарне винесення радіоактивних речовин з насінням фацелії пижмолистої становить

Таблиця 1

Винесення з дерново-підзолистого ґрунту радіоактивних речовин з вегетативною масою нектаропилконосних рослин, Бк/кг (середнє за 2021–2023 р.)

Нектаропилконосні рослини	Урожайність вегетативної висушеної маси, ц/га	Вміст радіоактивних речовин у вегетативній масі (із розрахунку на суху речовину)				Винесення з ґрунту вегетативною масою рослин радіоактивних речовин			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Розторопша плямиста	240,5	18,9	672	29,6	17,6	90909	3232320	142376	84656
Буркун білий	183,8	11,5	503	31,0	31,3	38065	1664930	102610	103603
Головатень круглоголовий	261,0	20,7	503	31,4	31,3	113436	2756440	172072	171524
Люпин вузьколистий	217,9	767,44	968,92	84,18	103,59	3177036	4011246	348588	428904
Фацелія пижмолиста	97,4	60,4	458,6	27,8	188,0	93620	710830	43090	291400
Еспарцет піщаний	137,9	91,36	767,9	23,66	63,57	239468	2011808	62094	166632
Вика яра	129,3	400,0	306,0	92,3	10,2	824000	630360	190138	21012

Таблиця 2

Винесення з дерново-підзолистого ґрунту радіоактивних речовин з насінням нектаропилконосних рослин, Бк (середнє за 2021–2023 р.)

Нектаропилконосні рослини	Урожайність насіння, ц/га	Вміст радіоактивних речовин у насінні нектаропилконосних рослин (із розрахунку на суху речовину)				Винесення з ґрунту насінням радіоактивних речовин			
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Розторопша плямиста	3,7	10,1	503	21,2	11,7	37,4	1861	78,4	43,3
Буркун білий	3,2	7,2	403	21,3	20,0	23,0	1289	68,1	64,0
Головатень круглоголовий	6,5	14,2	438	20,1	17,7	92,3	2847	130,6	115,0
Люпин вузьколистий	10,8	430	607	51	78	4644	6555	550,8	842,4
Фацелія пижмолиста	2,3	37,8	304	19,2	107	86,9	699,2	44,1	246,1
Еспарцет піщаний	3,7	52	531,2	14,2	38,9	192,4	1965,4	52,5	143,9
Вика яра	8,3	272	209	70,3	6,4	2257	1734,7	581,8	53,1

1076,3 Бк/га, з яких 8,07% – ¹³⁷Cs, 64,96% – ⁴⁰K, 4,09% – ²²⁶Ra та 22,86% – ²³²Th. З насінням еспарцету піщаного виноситься 2354,2 Бк/га, з яких 8,17% – ¹³⁷Cs, 83,48% – ⁴⁰K, 2,23% – ²²⁶Ra та 6,11% – ²³²Th. При вирощуванні вики ярої з 1 га ґрунту виноситься з насінням 4626,6 Бк радіоактивних речовин, з яких 48,48% – ¹³⁷Cs, 37,49% – ⁴⁰K, 12,57% – ²²⁶Ra та 1,14% – ²³²Th.

Результати досліджень показали, що з вегетативною масою і насінням нектаропилконосних рослин виноситься з 1 гектару ґрунту з розторопшою плямистою 3552283,1 Бк радіоактивних речовин,

з яких ¹³⁷Cs – 2,56%, ⁴⁰K – 91%, ²²⁶Ra – 4,0% та ²³²Th – 2,88%; буркуном білим 1910652 Бк, з яких ¹³⁷Cs – 2,0%, ⁴⁰K – 87,2%, ²²⁶Ra – 5,37% та ²³²Th – 5,42%, головатнем круглоголовим 3216656,9 Бк, з яких ¹³⁷Cs – 3,52%, ⁴⁰K – 85,8%, ²²⁶Ra – 5,35% та ²³²Th – 5,33%; люпином вузьколистим 7978374,2 Бк, з яких ¹³⁷Cs – 39,8%, ⁴⁰K – 50,4%, ²²⁶Ra – 4,32% та ²³²Th – 5,38%; фацелією пижмолистою 1140016,3 Бк, з яких ¹³⁷Cs – 8,2%, ⁴⁰K – 62,4%, ²²⁶Ra – 3,7% та ²³²Th – 25,6%; еспарцетом піщаним 2420209,7 Бк, з яких ¹³⁷Cs – 9,9%, ⁴⁰K – 83,2%, ²²⁶Ra – 6,8% та ²³²Th – 6,9%; викою ярою 1670136,8 Бк,

з яких ^{137}Cs – 49,4%, ^{40}K – 37,8%, ^{226}Ra – 11,4% та ^{232}Th – 1,26%. Комплексне винесення радіоактивних речовин з ґрунту з вегетативною масою і насінням нектаропилконосних рослин коливалось від 1670136,8 Бк/га до 7978374,2 Бк/га. Найвищий рівень винесення з ґрунту з вегетативною масою та насінням нектаропилконосних рослин радіоактивних речовин спостерігався за вирощування люпину вузьколистого (рис. 1).

Вміст у дерново-підзолистому ґрунті після трирічного вирощування розторопші плямистої знизився по ^{137}Cs на 15,7%, ^{40}K на 14,2%, ^{226}Ra на 14,9% та ^{232}Th на 18%; буркуну білого по ^{137}Cs на 15,3%, ^{40}K на 14,2%, ^{226}Ra на 9,4% та ^{232}Th на 15,1%; головатню круглолового вміст ^{137}Cs знизився на 16,9%, ^{40}K на 11,3%, ^{226}Ra на 13,7% та ^{232}Th на 16,1%; люпину вузьколистого по ^{137}Cs на 20,5%, ^{40}K на 16,8%, ^{226}Ra на 17,3% та ^{232}Th на 21,0%; фацелії пижмолистої по ^{137}Cs на

13,3%, ^{40}K на 8,1%, ^{226}Ra на 9,0% та ^{232}Th на 11,7%; еспарцету піщаного по ^{137}Cs на 12,5%, ^{40}K на 9,6%, ^{226}Ra на 9,6% та ^{232}Th на 11,2%; вики ярої по ^{137}Cs на 13,8%, ^{40}K на 8,1%, ^{226}Ra на 10,1% та ^{232}Th на 10,2%.

Тобто результати досліджень показали, що вирощування нектаропилконосних культур на дерново-підзолистому ґрунті сприяло зниженню вмісту обмінних форм радіоактивних речовин внаслідок фітореMediaції порівняно з ґрунтом, який протягом досліджуваного періоду перебував під перелогом (табл. 3).

Висновки

За результатами досліджень встановлено інтенсивність винесення з дерново-підзолистого ґрунту ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra та ^{232}Th з урожаєм нектаропилконосних рослин (буркун білий, розторопша плямиста, головатень круглолової, еспарцет піщаний, люпин вузьколистий, фацелія пижмолиста та вика

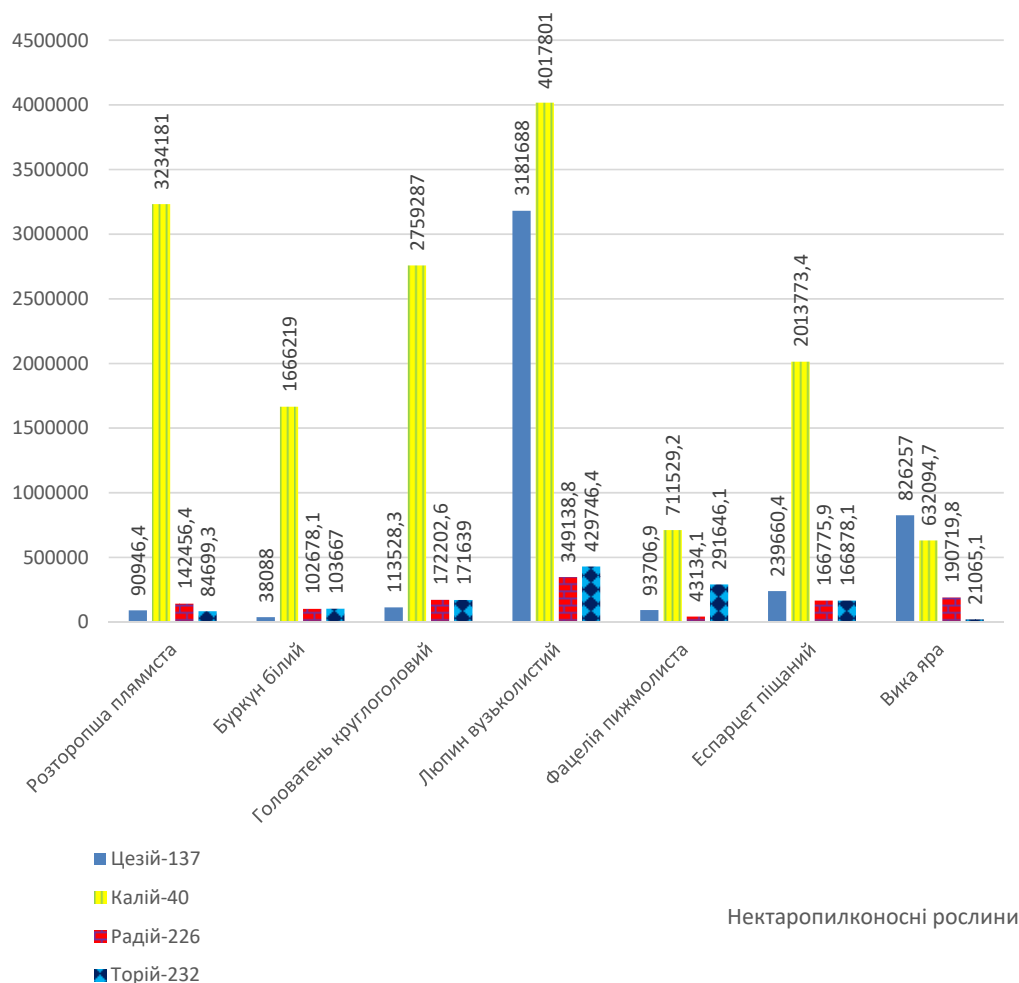


Рис. 1. Порівняльна оцінка винесення радіоактивних речовин нектаропилконосними рослинами з дерново-підзолистого ґрунту, Бк/га

Таблиця 3

Зміни вмісту радіоактивних речовин у дерново-підзолистому ґрунті за трирічного вирощування нектаропилконосних речовин, Бк/кг

Нектаропилконосні рослини	Ґрунти, не задіяні під вирощування нектаропилконосних рослин (переліг)				Ґрунти, задіяні під вирощування нектаропилконосних рослин			
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Розторопша плямиста	248	257	16,7	20,5	209	392	14,2	16,8
Буркун білий	248	257	16,7	20,5	210	414	18,0	17,4
Головатень круглоголовий	248	257	16,7	20,5	206	415	14,4	17,2
Люпин вузьколистий	248	257	16,7	20,5	197	380	13,8	16,1
Фацелія пижмолиста	248	257	16,7	20,5	215	420	15,2	18,1
Еспарцет піщаний	248	257	16,7	20,5	217	413	15,1	18,2
Вика яра	248	257	16,7	20,5	217	420	15,0	18,4

яра) та ефективність очищення його від даних токсикантів.

Встановлено, що з урожаєм цих нектаропилконосних рослин з ґрунту виноситься даних радіонуклідів від 1670136,8 до 7978374 Бк/га.

Рівень винесення з урожаєм нектаропилконосних рослин радіоактивних речовин залежав від їх ботанічного походження. Виявлено, що з вегетативною та насінневою масою люпину вузьколистого спостерігалось вище винесення з ґрунту сумарної кількості (¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra та ²³²Th) порівняно з розторопшею плямистою у 2,24 раза, буркуном

білим у 4,1 раза, головатнем круглоголовим у 2,4 раза, фацелією пижмолистою у 6,9 раза, еспарцетом піщаним у 3,3 раза та викою ярою у 4,7 раза.

Зниження концентрації радіоактивних речовин у ґрунті внаслідок фітореMediaції при вирощуванні нектаропилконосних рослин становило по ¹³⁷Cs від 12,5 до 20,5%, ⁴⁰K – від 8,1 до 16,8%, ²²⁶Ra – від 9,0% до 17,3% та ²³²Th – від 10,2% до 21,0%.

Перспективою подальших досліджень є вивчення ефективності використання одержаної вегетативної маси нектаропилконосних рослин для виробництва біопалива.

Список використаної літератури

- Зінченко О.І., Салатенко В.Н., Білоножко М.А. Рослинництво : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2001. 591 с.
- Климчук О.В., Поліщук І.С., Мазур В.А. Лікарські рослини. Технологія вирощування. Вінниця : ВНАУ, 2011. 188 с.
- Петриченко В.Ф., Лихочвор В.В. Рослинництво. Нові технології вирощування польових культур : підручник. 5-те вид. Львів : НВФ «Українські технології», 2020. 806 с.
- Прістер Б.С., Лещенко С.О. Рекомендації по веденню сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення територій України в результаті аварії на ЧАЕС на період 1996–1998 років. Київ : Ярмарок, 1996. 56 с.
- Разанов С.Ф., Огороднічук Г.М., Коминар М.Ф. Вплив обробітку ґрунту на накопичення Цезію-137 в квітковому пилку та в продуктах переробки його медоносною бджолою. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 3 (22). С. 161–173. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2021-3-13>.
- Разанов С.Ф., Ткачук О.П., Гончарук І.І., Кравченко В.С. Зміна структури ґрунту при вирощуванні бобових багаторічних трав. *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2018. № 92 (1). С. 206–214.
- Ткачук О.П. Вплив бобових багаторічних трав на агроecологічний стан ґрунту. *Збалансоване природокористування*. 2017. № 1. С. 127–130.
- Akozcan S., Kulahcı F., Mercan Ye. A suggestion to radiological hazards characterization of ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K and ¹³⁷Cs: spatial distribution modelling. *Journal of Hazardous Materials*. 2018. Vol. 353. P. 476–489. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.042>.
- Bangotra P., Mehra R., Kaur K., Jakhu R. Study of natural radioactivity (²²⁶Ra, ²³²Th and ⁴⁰K) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazards. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. Vol. 171. Issue 2. P. 277–281. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw074>.
- Burger A., Lichtscheidl I. Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential

for bioremediation. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 618. P. 1459–1485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298>.

Nabadwip S.S., Arunkumar S.B., Priya D.T. Study of natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazard parameters. *Radiation Protection and Environment*. 2017. № 40 (3–4). P. 154–158. https://doi.org/10.4103/rpe.RPE_29_17.

Tkachuk O. Biological features of the distribution of root systems of perennial legume grasses in the context of climate change. *Scientific Horizons*. 2021. № 24 (2). P. 69–76. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.69-76](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.69-76).

Uosif M.A.M., Mostafa A.M.A., Ene A., Alrowaili Z.A., Elsaman R., Zakaly H.M.H. Natural radioactivity variation with some soil properties. *Romanian Reports in Physics*. 2024. Vol. 76. № 3. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.705>.

Velasco H., Anjos R.M. A review of ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-plant transfer factors in tropical plants. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 235–236. P. 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106650>.

References

Zinchenko, O.I., Salatenko, V.N., & Bilonozhko, M.A. (2001). *Roslynyntstvo: pidruchnyk* [Crop production]. Kyiv: Ahrarna osvita [in Ukrainian].

Klymchuk, O.V., Polishchuk, I.S., & Mazur, V.A. (2011). *Likarski roslyny. Tekhnolohiia vyroshchuvannia* [Medicinal plants. Cultivation technology]. Vinnytsia : VNAU [in Ukrainian].

Petrychenko, V.F., & Lykhochvor, V.V. (2020). *Roslynyntstvo. Novi tekhnolohii vyroshchuvannia polovykh kultur* [New technologies for growing field crops]. 5nd ed. Lviv : NVF “Ukrainski tekhnolohii” [in Ukrainian].

Prister, B.S., & Leshchenko, S.O. (1996). *Rekomendatsii po vedenniu silskoho hospodarstva v umovakh radioaktyvnoho zabrudnennia terytorii Ukrainy v rezultati avarii na ChAES na period 1996-1998 rokiv* [Recommendations for conducting agriculture in the conditions of radioactive contamination of the territory of Ukraine as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant for the period 1996-1998]. Kyiv : Yarmarok [in Ukrainian].

Razanov, S.F., Ohorodnichuk, H.M., & Komynar, M.F. (2021). Vplyv obrobitku hruntu na nakopychennia tseziiu-137 v kvitkovomu pylku ta v produktakh pererobky yoho medonosnoi bdzholoiu [Annotation effect of soil treatment on cesium-137 accumulation in flower pollen and in its processing products by honey bees]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo [Agriculture and forestry]*, 3 (22), 161–173. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2021-3-13> [in Ukrainian].

Razanov, S.F., Tkachuk, O.P., Honcharuk, I.I., & Kravchenko, V.S. (2018). Zmina struktury hruntu pry vyroshchuvanni bobovykh bahatorichnykh trav [Changing the structure of the soil during the cultivation of legumes perennial grasses]. *Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva [Collected Works of Uman National University of Horticulture]*, 92 (1), 206–214 [in Ukrainian].

Tkachuk, O.P. (2017). Vplyv bobovykh bahatorichnykh trav na ahroekolohichni stan hruntu [Impact of leguminous perennial grasses on agroecological condition of the soil]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia [Balanced nature using]*, 1, 127–130 [in Ukrainian].

Akozcan, S., Kulahcı, F., & Mercan, Ye. (2018). A suggestion to radiological hazards characterization of ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs : spatial distribution modelling. *Journal of Hazardous Materials*, 353, 476–489. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.042> [in English].

Bangotra, P., Mehra, R., Kaur, K., & Jakhu, R. (2016). Study of natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazards. *Radiation Protection Dosimetry*, 171 (2), 277–281. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw074> [in English].

Burger, A., & Lichtscheidl, I. (2018). Stable and radioactive cesium: A review about distribution in the environment, uptake and translocation in plants, plant reactions and plants' potential for bioremediation. *Science of The Total Environment*, 618, 1459–1485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.298> [in English].

Nabadwip, S.S., Arunkumar, S.B., & Priya, D.T. (2017). Study of natural radioactivity (^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K) in soil samples for the assessment of average effective dose and radiation hazard parameters. *Radiation Protection and Environment*, 40 (3–4), 154–158. https://doi.org/10.4103/rpe.RPE_29_17 [in English].

Tkachuk, O. (2021). Biological features of the distribution of root systems of perennial legume grasses in the context of climate change. *Scientific Horizons*, 24 (2), 69–76. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.69-76](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.69-76) [in English].

Uosif, M.A.M., Mostafa, A.M.A., Ene, A., Alrowaili, Z.A., Elsaman, R., & Zakaly, H.M.H. (2024). Natural radioactivity variation with some soil properties. *Romanian Reports in Physics*, 76, 3. <https://doi.org/10.59277/RomRepPhys.2024.76.705> [in English].

Velasco, H., & Anjos, R.M. (2021). A review of ^{137}Cs and ^{40}K soil-to-plant transfer factors in tropical plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 235–236, 106650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106650> [in English].

Отримано: 20.01.2025
Прийнято: 05.02.2025