УДК 504.5:631.41:546.79:633.361(477.41)
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.151.53

ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЕСПАРЦЕТУ ПІЩАНОГО В УМОВАХ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОЛІССЯ

Врадій О.І. *– к.с.-г.н., доцент,*
доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,
Вінницький національний аграрний університет
orcid.org/0000-0001-7383-3829
Матусяк М.В. *– к.с.-г.н., доцент,*
доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства,
Вінницький національний аграрний університет
orcid.org/0000-0001-8099-7290
Салямон А.В. *– аспірант кафедри екології*
та охорони навколишнього середовища,
Вінницький національний аграрний університет
orcid.org/0009-0006-9236-7652

У статті висвітлено результати комплексних радіоекологічних досліджень щодо оцінки фіторемедіаційного потенціалу еспарцету піщаного (Onobrychis arenaria (Kit.) DC.) за умов вирощування на радіоактивно забруднених дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах Житомирського Полісся (м. Коростень). Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку витривалих фітомеліорантів для відновлення малопродуктивних, деградованих та радіоактивно забруднених земель Поліського регіону.

У ході експерименту було розраховано питому активність ^{137}Cs та ^{90}Sr у різних органах рослини, коефіцієнти переходу (Кп), а також показники динаміки винесення радіонуклідів з урожаєм сухої речовини залежно від віку плантації (1–3 роки вегетації). Встановлено, що інтенсивність поглинання ^{90}Sr органами еспарцету піщаного у 3–5 разів перевищує аналогічні показники для ^{137}Cs. Це пояснюється фізіологічною компенсацією дефіциту обмінного кальцію (Ca^{2+}) у бідних дерново-підзолистих ґрунтах Полісся шляхом активного поглинання його хімічного аналога – радіостронцію.

Дослідженням виявлено наявність потужних внутрішніх фізіологічних бар'єрів рослини. Зокрема, зафіксовано виражений кореневий бар'єр щодо Cs: питома активність радіоцезію у підземній біомасі становить 420 ± 38 Бк/кг (Кп = 0,42), тоді як у стеблах вона знижується до 110 ± 12 Бк/кг (Кп = 0,11), а в листі дорівнює 185 ± 16 Бк/кг (Кп = 0,19). Також встановлено функціонування генеративного бар'єру для обох токсикантів, що виражається у мінімальному накопиченні радіонуклідів у суцвіттях (95 ± 9 Бк/кг для ^{137}Cs та 320 ± 28 Бк/кг для ^{90}Sr) і забезпечує біологічний захист репродуктивних органів.

Доведено, що показники вилучення радіонуклідів суттєво зростають із віком плантації пропорційно до збільшення врожайності сухої речовини: від 2,8 т/га на 1-й рік вегетації до 7,8 т/га на 3-й рік. На 3-й рік вегетації досягається максимальний винос з урожаєм: для ^{137}Cs – 1170 кБк/га (0,117 % від запасу в ґрунті), а для ^{90}Sr – 4875 кБк/га (0,975 %). У середньому за рік вегетації відчуження ^{90}Sr становить 0,708 %, а ^{137}Cs –0,085 % від вихідного запасу в орному шарі. Обґрунтовано доцільність залучення еспарцету піщаного у фіторемедіаційні системи відновлення забруднених земель Полісся як культури з високою фітостабілізуючою здатністю щодо ^{137}Cs та помірним фітоекстракційним потенціалом щодо ^{90}Sr.

Ключові слова: *еспарцет піщаний (Onobrychis arenaria), фіторемедіація, радіоактивне забруднення, дерново-підзолисті ґрунти, Полісся, коефіцієнт переходу, винос біомаси, фітостабілізація.*

© Врадій О.І., Матусяк М.В., Салямон А.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Vradii O.I., Matusyak M.V., Saliamon A.V. Phytoremediation potential of Onobrychis arenaria under radioactive contamination of Polissya

The article highlights the results of comprehensive radioecological studies evaluating the phytoremediation potential of Onobrychis arenaria (Kit.) DC. grown on radioactively contaminated sod-podzolic sandy loam soils of Zhytomyr Polissya (Korosten). The relevance of the study is driven by the need to identify resilient phytomeliorants for restoring low-productivity, degraded, and radioactively contaminated lands in the Polissya region.

In the course of the experiment, the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in various plant organs, transfer coefficient (Kt), and radionuclide removal dynamics relative to dry matter yield were calculated depending on the age of the plantation (1–3 years of vegetation). It was established that the intensity of ^{90}Sr uptake by Onobrychis arenaria organs is 3 to 5 times higher than that of ^{137}Cs. This is explained by physiological compensation for the deficiency of exchangeable calcium (Ca^{2+}) in the poor sod-podzolic soils of Polissya through active uptake of its chemical analogue, radiostrontium.

The study revealed strong internal physiological barriers in the plant. In particular, a pronounced root barrier for ^{137}Cs was observed: the specific activity of radiocesium in the below-ground biomass reaches 420 ± 38 Bq/kg} (Kt = 0.42), whereas in stems it decreases to 110 ± 12 Bq/kg (Kt = 0.11), and in leaves it equals 185 ± 16 Bq/kg (Kt = 0.19). Furthermore, a generative barrier operates for both toxicants, manifested by minimal radionuclide accumulation in inflorescences (95 ± 9 Bq/kg for ^{137}Cs and 320 ± 28 Bq/kg for ^{90}Sr), which provides biological protection to the reproductive organs.

It was proven that radionuclide removal parameters significantly increase with the age of the plantation in proportion to the increase in dry matter yield: from 2.8 t/ha in the 1st year of vegetation to 7.8 t/ha in the 3rd year. Maximum removal with yield is achieved in the 3rd year of vegetation: 1170 kBq/ha (0.117 % of the soil reserve) for ^{137}Cs and 487 kBq/ha (0.975 %) for ^{90}Sr. On average, per growing year, the removal of ^{90}Sr constitutes 0.708 % and ^{137}Cs constitutes 0.085% of the initial reserve in the arable layer. The expediency of integrating Onobrychis arenaria into phytoremediation systems for restoring contaminated lands in Polissya as a crop with high phytostabilizing capacity regarding ^{137}Cs and moderate phytoextraction potential regarding ^{90}Sr is substantiated.

Key words: *Onobrychis arenaria, phytoremediation, radioactive contamination, sod-podzolic soils, Polissya, transfer factor, biomass removal, phytostabilization.*

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями. Аварія на Чорнобильській АЕС зумовила масштабне та тривале радіоактивне забруднення значних територій України, серед яких найбільш уразливим виявився регіон Українського Полісся [1, с. 73]. Специфічні ґрунтово-кліматичні умови цієї зони – переважання дерново-підзолистих, піщаних та супіщаних ґрунтів із низьким умістом гумусу, високою кислотністю та обмеженою ємністю поглинання – створюють передумови для високої рухливості радіонуклідів, насамперед ^{137}Cs та ^{90}Sr. Це призводить до їхнього інтенсивного залучення у трофічні ланцюги та хронічного забруднення сільськогосподарської продукції, що залишається гострою екологічною та економічною проблемою навіть через десятиліття після катастрофи [2, с. 260].

У зв'язку з цим виникає нагальна потреба впровадження ефективних, екологічно безпечних та економічно вигідних технологій очищення та відновлення забруднених угідь. Серед сучасних підходів особливу увагу привертає фіторемедіація – метод використання вищих рослин для вилучення (фітоекстракція), локалізації (фітостабілізація) або деградації екотоксикантів у ґрунтовому покриві [3, с. 34]. Попри значну кількість досліджень у галузі радіоекології, пошук нових рослинних культур, які поєднують у собі високу стійкість до несприятливих чинників Полісся, здатність до акумуляції радіонуклідів та подальшу господарську цінність, триває [4, с. 222].

Перспективним об'єктом для фіторемедіаційних технологій в умовах радіоактивно забруднених бідних ґрунтів є еспарцет піщаний (*Onobrychis arenaria*).

Як посухостійка, невибаглива до родючості ґрунту бобова культура із потужною стрижневою кореневою системою, еспарцет здатний не лише адаптуватися до деградованих піщаних ландшафтів Полісся, а й покращувати структуру ґрунту шляхом азотфіксації. Проте потенціал еспарцету піщаного як фіторемедіанта, закономірності накопичення ним радіонуклідів у надземній та підземній біомасі, а також бар'єрні механізми системи «ґрунт–рослина» в специфічних умовах Поліського регіону залишаються вивченими недостатньо, що й зумовлює актуальність цього дослідження [5, с. 151].

Робота безпосередньо пов'язана з реалізацією Національної програми ліквідації наслідків Чорнобильської катастрофи, Стратегією екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України, а також із планами науково-дослідних робіт щодо оптимізації природокористування та відновлення родючості деградованих і радіоактивно забруднених земель Полісся [6, с. 223].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи та практичні аспекти використання вищих рослин для очищення забруднених екосистем (фіторемедіації) активно розробляються як вітчизняними, так і закордонними вченими протягом останніх кількох десятиліть [7, с. 44]. Загальні закономірності поведінки радіонуклідів у навколишньому середовищі, процеси їхньої міграції у системі «ґрунт–рослина» та принципи ведення агропромислового виробництва на радіоактивно забруднених територіях закладені у фундаментальних працях таких відомих дослідників, як І. М. Гудков, Б. С. Пристер, В. О. Кашпаров, О. О. Краснов, М. М. Лазарєв та В. В. Тарасевич [8, с. 154; 9, с. 230; 10, с. 398].

У контексті специфіки Українського Полісся значний внесок у дослідження радіоекологічного моніторингу та оцінки поведінки ^{137}Cs і ^{90}Sr у лісових та аграрних біогеоценозах зробили науковці Житомирської та Поліської радіоекологічних шкіл (зокрема, П.П. Надточій, С.М. Краснов та ін.). Їхніми роботами доведено, що легкий гранулометричний склад, підвищена кислотність та низький вміст калію і гумусу в дерново-підзолистих ґрунтах Поліського регіону критично підвищують коефіцієнти переходу (Кп) радіонуклідів у рослинницьку продукцію [11, с. 53; 12, с. 19; 13, с. 69].

Сучасний етап досліджень фіторемедіаційного потенціалу змістився у бік пошуку та селекції конкретних фітоекстракторів. Світовий досвід свідчить про високу ефективність використання для очищення ґрунтів від важких металів та радіонуклідів технічних і сидеральних культур, таких як гірчиця сарептська (*Brassica juncea*), соняшник однорічний (*Helianthus annuus*) та деякі види амаранту (*Amaranthus*). Проте більшість із цих культур вимагають високого рівня родючості ґрунту, що обмежує їхнє ефективне застосування на деградованих піщаних землях Полісся [14, с. 21].

Останнім часом прискіпливу увагу дослідників привертають представники родини Бобових (*Fabaceae*). У працях вітчизняних дослідників інститутів НААН України та НАН України показано, що бобові культури (зокрема, люпин жовтий, конюшина лучна, люцерна) володіють унікальним поєднанням фітостабілізаційних властивостей та здатності покращувати агрохімічні параметри бідних ґрунтів завдяки симбіотичній азотфіксації. Роботи, спрямовані на вивчення еспарцету (*Onobrychis*), здебільшого розглядають його як цінну кормову культуру (дослідження селекційного та агротехнічного спрямування) [15, с. 67].

Водночас, дикорослі та культурні форми еспарцету, зокрема еспарцет піщаний (*Onobrychis arenaria*), за даними окремих ботанічних та екологічних моніторингів, демонструють екстремальну витривалість до посухи, низького вмісту

поживних речовин та здатність розвивати глибоку кореневу систему на піщаних субстратах. Попри наявність поодиноких публікацій щодо накопичення важких металів видами роду *Onobrychis*, комплексні дослідження його фіторемедіаційного потенціалу щодо радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr в умовах хронічного забруднення ландшафтів Полісся наразі практично відсутні [16, с. 9].

Таким чином, попри глибоке вивчення загальних процесів радіоактивного забруднення Полісся, поза увагою дослідників залишається кількісна оцінка параметрів накопичення та розподілу радіонуклідів між підземними та надземними органами еспарцету піщаного за умов вирощування на бідних дерново-підзолистих піщаних ґрунтах. Не встановлено коефіцієнти переходу екотоксикантів у біомасу цієї культури та не обґрунтовано баланс винесення чи локалізації радіонуклідів, що стримує розробку прикладних фіторемедіаційних технологій із використанням даного фітомеліоранта [17, с. 350].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність значної наукової бази з питань фіторемедіації територій, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, особливості використання еспарцету піщаного (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.) у зоні Українського Полісся залишаються недостатньо вивченими. До найменш опрацьованих та дискусійних частин цієї наукової проблеми належать суперечливість між акумуляційною здатністю та фітостабілізаційним потенціалом еспарцету. У науковій літературі бракує єдиної думки щодо ролі еспарцету піщаного у поводженні з радіонуклідами. Залишається невирішеним питання: чи виступає він ефективним фітоекстрактором, що виносить значну кількість ^{137}Cs та ^{90}Sr із ґрунту в надземну масу (яку потім необхідно спеціально утилізувати), чи його основна роль полягає у фітостабілізації – закріпленні радіонуклідів у потужній кореневій системі для запобігання їх міграції у суміжні середовища.

Специфіка радіоекологічного відгуку культури на дерново-підзолистих піщаних ґрунтах Полісся. Більшість досліджень поведінки багаторічних бобових трав у зоні радіоактивного забруднення проведені на більш зв'язаних та родючих типах ґрунтів. Особливості накопичення та коефіцієнти переходу (Кп) радіонуклідів у системі «дерново-підзолистий піщаний ґрунт – еспарцет піщаний» вивчені слабо, хоча саме ці ґрунти характеризуються низькою ємністю вбирання, високою рухливістю ^{137}Cs і ^{90}Sr та гострим дефіцитом калію і кальцію (фізіологічних аналогів радіонуклідів).

Вплив симбіотичного апарату на радіотолерантність та міграцію радіонуклідів. Еспарцет піщаний як бобова культура формує потужний симбіоз із бульбочковими бактеріями (*Rhizobium* spp.). Проте вплив азотфіксуючої здатності та активності симбіотичного апарату на стійкість рослин до хронічного іонізуючого випромінювання, а також на вибірковість поглинання радіоактивних елементів корінням в умовах Полісся практично не досліджувався.

Оцінка якості та безпеки супутньої продукції. Невирішеною науково-практичною проблемою є встановлення екологічних меж використання біомаси еспарцету, вирощеного на радіоактивно забруднених землях. Недостатньо вивчено, чи забезпечує скошування еспарцету на різних фазах вегетації одержання сировини (наприклад, для технічних цілей чи сидератів), показники радіоактивного забруднення якої не перевищують допустимі рівні, та як це впливає на загальний радіоекологічний баланс агроекосистеми Полісся.

Ефективне вирішення цих питань дозволить обґрунтувати екологічно безпечні параметри залучення еспарцету піщаного до фіторемедіаційних технологій відновлення радіоактивно забруднених земель Полісся України.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Експериментальну частину роботи виконували в умовах Полісся (м. Коростень). Посів еспарцету піщаного здійснювали за загальноприйнятою технологією у чотириразовій повторності. Проби ґрунту для лабораторного аналізу відбирали методом «конверта»: з глибини орного шару (22–25 см) кожної дослідної ділянки вилучали п'ять окремих зразків.

Після очищення від рослинних решток відібрану ґрунтову масу ретельно гомогенізували. З отриманої суміші шляхом точкового відбору формували середню пробу масою 500 г для подальшого радіоекологічного аналізу. Готові зразки поміщали в марковані поліетиленові пакети та транспортували до лабораторії. Збір надземної вегетативної маси та насіння проводили методом точкових проб.

Визначення питомої активності радіонуклідів (^{137}Cs, ^{90}Sr) у зразках ґрунту, фітомаси та насіння еспарцету піщаного здійснювали гамма-спектрометричним методом за допомогою приладу «СЕГ-05». Вимірювання виконували на базі сертифікованої лабораторії Житомирської філії ДУ «Держґрунтохорона» Інституту сільського господарства Полісся НААНУ.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Оцінка фіторемедіаційного потенціалу еспарцету піщаного (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.) проводилася в умовах радіоактивно забруднених територій Житомирського Полісся на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах. Головними критеріями оцінки ефективності виступали коефіцієнт переходу (Кп, що показує відношення питомої активності радіонукліда в сухій речовині рослин до його щільності забруднення або питомої активності у ґрунті), а також індекс біоконцентрації (BCI).

Експериментальні дослідження показали, що еспарцет піщаний демонструє виражену селективність щодо поглинання та розподілу радіонуклідів між підземними та надземними органами. Отримані середні дані радіоекологічного моніторингу систематизовано у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри накопичення радіонуклідів органами еспарцету піщаного на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах

Орган рослини	Питома активність ^{137}Cs, Бк/кг сух. маси	Коефіцієнт переходу (Кп) ^{137}Cs, (Бк/кг)/(кБк/м2)	Питома активність ^{90}Sr, Бк/кг сух. маси	Коефіцієнт переходу (Кп) ^{90}Sr, (Бк/кг)/(кБк/м2)
Коренева система	420 ± 38	0,42	890 ± 74	1,78
Стебла	110 ± 12	0,11	510 ± 43	1,02
Листя	185 ± 16	0,19	740 ± 61	1,48
Суцвіття	95 ± 9	0,10	320 ± 28	0,64

Примітка: щільність забруднення дослідної ділянки становила: за ^{137}Cs – 1000 кБк/м^2 (27 Кі/км^2); за ^{90}Sr – 500 кБк/м^2 (13,5 Кі/км^2).

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що інтенсивність переходу ^{90}Sr у всі органи еспарцету піщаного в 3–5 разів перевищує аналогічні показники для ^{137}Cs. Це безпосередньо пов'язано з хімічною природою елементів. На бідних дерново-підзолистих піщаних ґрунтах Полісся, які мають низький вміст обмінного кальцію (Ca^{2+}), рослини еспарцету активно поглинають його хімічний аналог – радіостронцій (^{90}Sr), компенсуючи дефіцит макроелемента.

Фізіологічний аналіз розподілу радіонуклідів у біомасі еспарцету піщаного дозволяє зробити важливі наукові висновки щодо механізмів його радіо толерантності. Найвищі рівні накопичення обох радіонуклідів зафіксовані в підземній частині рослин. Для ^{137}Cs концентрація в корінні становить 420 Бк/кг, що майже в 4 рази перевищує вміст у стеблах. Це вказує на потужний кореневий бар'єр еспарцету, який зв'язує іони цезію у внутрішньоклітинних структурах коріння (вакуолях) і обмежує їх ксилемний транспорт до генеративних органів.

Мінімальні концентрації радіонуклідів виявлено в суцвіттях (95 Бк/кг для ^{137}Cs та 320 Бк/кг для ^{90}Sr). Це є біологічно обумовленим захисним механізмом репродуктивної системи рослини, що запобігає пошкодженню насіннєвого матеріалу під дією внутрішнього іонізуючого випромінювання.

Формування потужної системи бульбочкових бактерій (*Rhizobium* spp.) на коренях еспарцету забезпечує рослини додатковим пулом пластичних речовин, що підвищує їх загальну фізіологічну стійкість. Активний азотний обмін сприяє ущільненню клітинних стінок коріння, що створює додатковий механічний та хімічний бар'єр для міграції ^{137}Cs у надземні органи.

На основі співвідношення накопичення радіонуклідів у підземній та надземній масі розраховано сумарний ремедіаційний ефект культури. Завдяки потужній стрижневій кореневій системі, яка проникає вглиб ґрунтового профілю на 1,5–2,0 м, еспарцет піщаний виконує подвійну екологічну функцію. Рослина надійно локалізує радіонукліди у кореневій зоні, зв'язуючи їх у фракціях органічної речовини ґрунту під час щорічного відмирання дрібних корінців. Це запобігає вимиванню токсикантів у ґрунтові води. Хоча Кп ^{137}Cs для надземної біомаси є порівняно низьким (0,10–0,19), високий вихід сухої речовини еспарцету (до 6–8 т/га) дозволяє виносити суттєву абсолютну кількість радіонуклідів з верхнього гумусового горизонту за один укіс.

Еспарцет піщаний на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах Полісся виявляє високу пристосованість до умов радіоактивного забруднення. Специфіка його ремедіаційного потенціалу полягає у вираженій фітостабілізуючій здатності щодо ^{137}Cs (завдяки кореневому бар'єру) та помірній фітоекстракційній спроможності щодо ^{90}Sr. Отримані дані дозволяють рекомендувати використання еспарцету піщаного для залучення у фіторемедіаційні сівозміни як культури-захисника та поліпшувача структури малопродуктивних радіоактивно забруднених ґрунтів.

Для розрахунку сумарного екологічного ефекту фіторемедіації важливим є не лише визначення концентрації елементів у рослині, а й оцінка їхнього абсолютного виносу з одиниці площі разом із відчужуваною надземною біомасою. Оскільки еспарцет піщаний є багаторічною культурою, продуктивність його надземної маси та обсяги вилучення радіонуклідів суттєво змінюються за роками вирощування (табл. 2).

Найменший ремедіаційний ефект зафіксовано на першому році вегетації еспарцету піщаного, що зумовлено повільним розвитком надземної маси (2,8 т/га) та формуванням стрижневого кореня. Починаючи з другого року, урожайність сухої речовини зростає у 2,3–2,8 рази, що пропорційно збільшує абсолютні обсяги очищення орного горизонту.

Розрахунки показують, що темпи фітоекстракції ^{90}Sr є на порядок вищими порівняно з ^{137}Cs. У середньому за рік з урожаєм відчужується 0,708 % від загального запасу радіостронцію в ґрунті, тоді як для радіоцезію цей показник становить лише 0,085 %.

Таблиця 2

Динаміка винесення ^{137}Cs та ^{90}Sr з урожаєм надземної біомаси еспарцету піщаного за роками вегетації

Рік вегетації	Урожайність сухої речовини, т/га	Винос ^{137}Cs з урожаєм, кБк/га	Частка вилучення ^{137}Cs від запасу в ґрунті, %	Винос ^{90}Sr з урожаєм, кБк/га	Частка вилучення ^{90}Sr від запасу в ґрунті, %
1-й рік	2,8 ± 0,2	420	0,042	1750	0,350
2-й рік	6,4 ± 0,5	960	0,096	4000	0,800
3-й рік	7,8 ± 0,6	1170	0,117	4875	0,975
Середнє за рік	**5,7**	**850**	**0,085**	**3542**	0,708

Примітка: Розрахунок частки вилучення проведено відносно вихідного запасу радіонуклідів у орному (0–20 см) шарі ґрунту дослідної ділянки.

За умов тривалого вирощування еспарцету піщаного (до 5 років на одному місці) сумарне вилучення ^{90}Sr з біомасою може досягати 4–5 % від його вихідного вмісту у ґрунті. Це підтверджує доцільність використання культури у програмах реабілітації земель, оскільки вилучена надземна маса після скошування та безпечного спалювання (з утилізацією попелу як радіоактивного відходу) дозволяє поступово знижувати щільність забруднення територій Полісся.

Висновки з даного дослідження та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі. На основі проведених досліджень та отриманих експериментальних результатів щодо оцінки фіторемедіаційного потенціалу еспарцету піщаного (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.) в умовах радіоактивного забруднення Житомирського Полісся сформульовано такі наукові висновки та визначено перспективні напрями подальшої роботи.

Встановлено, що еспарцет піщаний виявляє значно вищу інтенсивність поглинання радіостронцію порівняно з радіоцезієм на дерново-підзолистих супіщаних ґрунтах Полісся. Коефіцієнти переходу (Кп) ^{90}Sr в органи рослини у 3–5 разів перевищують аналогічні показники для ^{137}Cs, що зумовлено фізіологічним поглинанням радіостронцію як хімічного аналога дефіцитного в цих ґрунтах кальцію.

Доведено наявність потужного кореневого бар'єру в еспарцету піщаного щодо ^{137}Cs (питома активність у корінні становить 420 ± 38 Бк/кг проти 110 ± 12 Бк/кг у стеблах). Водночас зафіксовано надійну дію генеративного бар'єру для обох радіонуклідів: питома активність у суцвіттях є мінімальною (95 Бк/кг для ^{137}Cs та 320 Бк/кг для ^{90}Sr), що захищає репродуктивну систему рослини від інтенсивного внутрішнього опромінення.

Обсяги вилучення радіонуклідів з урожаєм сухої речовини еспарцету піщаного прямо залежать від віку плантації. Максимальну ремедіаційну здатність зафіксовано на 3-й рік вегетації за врожайності 7,8 т/га, коли винос ^{137}Cs досягає 1170 кБк/га (0,117 % від запасу в ґрунті), а ^{90}Sr – 4875 кБк/га (0,975 %). У середньому за рік вегетації культура забезпечує відчуження 0,708 % радіостронцію та 0,085 % радіоцезію, що робить еспарцет піщаний перспективним фітоекстрактором для реабілітації забруднених земель.

Перспективним є дослідження впливу різних штамів бульбочкових бактерій (*Rhizobium* spp.) та мікоризних грибів на рухливість радіонуклідів у ризосфері еспарцету. Це дозволить розробити технології мікробіологічної активації або, навпаки, блокування надходження ^{137}Cs та ^{90}Sr у рослини.

Необхідно детально вивчити процеси термічної переробки (спалювання, піроліз) отриманої фіторемедіаційної сировини еспарцету піщаного з метою мінімізації вторинного викиду радіонуклідів в атмосферу та локалізації попелу як слаборадіоактивного відходу.

Потребує оцінки довгостроковий вплив вирощування еспарцету піщаного як сидеральної культури на процеси самоочищення та відновлення родючості дерново-підзолистих піщаних ґрунтів за рахунок фіксації атмосферного азоту та збагачення ґрунту органічною речовиною.

Доцільним є створення моделей інтеграції еспарцету піщаного у короткоротаційні ремедіаційні сівозміни сумісно з іншими фітотехнологічними культурами для комплексного очищення територій Українського Полісся.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Razanov S., Koruniak O., Dydiv A., Holubieva T., Symochko L., Balkovskyi V., Alekseev O., Vradii O., Ohorodnichuk H., Polishchuk M., Kolisnyk O., Mazur O., Mazur O. Radioprotective and sorption properties of beespine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES).* 2023. Vol. 13 (2). P. 71–76. https://doi.org/10.31407/ijees13.2

2. Vradii O., Mudrak H., Alieksieiev O. Application of biological preparations on the crops of perennial leguminous grasses as a means of providing soils with atmospheric nitrogen. *Ecology, Biotechnology, Agriculture and Forestry in the 21st century: problems and solutions.* Monograph. Edited by S. Stankevych, O. Mandych. Estonia. Tallinn: Teadmus OÜ, 2024. P. 252–269.

3. Alieksieiev O., Vradii O., Verheles P. Substantiation of the interaction of the symbiotic system Bradyrhizobium – Glycine max (L.) Merr. With the microbiome and study of agrochemical factors. *Erbe der europäischen Wissenschaft. Monografische Reihe «Europäische Wissenschaft»*. Buch 47. Teil 1. 2026. P. 6–42. DOI: 10.30890/2709-2313.2026-47-01

4. Первачук М.В., Врадій О.І. Інтенсифікація процесу фіксації атмосферного азоту під впливом мікробних препаратів на посівах багаторічних бобових трав. *Сільське господарство та лісівництво.* 2016. № 4 (1). С. 220–230.

5. Врадій О.І. Застосування біологічних препаратів на посівах багаторічних бобових трав як засіб забезпечення ґрунтів атмосферним азотом. *Сільське господарство та лісівництво.* 2017. № 6. Т. 1. С. 149–158.

6. Врадій О.І. Біологічні препарати як чинник посилення мікробіологічної діяльності агрофітоценозу бобових культур. *Сільське господарство та лісівництво.* 2017. Вип. № 7. Т. 1. С. 220–230.

7. Ткачук О.П., Врадій О.І. Баланс поживних речовин у ґрунті при вирощуванні зернобобових культур. *Екологічні науки.* 2022. № 2 (41). С. 43–47. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.7

8. Ткачук О.П., Врадій О.І. Параметри кореневих систем бобових багаторічних трав як чинник впливу на агроекологічний стан ґрунту. *Екологічні науки.* 2023. № 1 (46). С. 153–161. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.26

9. Alieksieiev O.O., Vradii O.I. Organic agriculture as an element of soil preservation and restoration. *Сільське господарство та лісівництво.* 2023. № 3 (30). С. 228–239. doi: 10.37128/2707-5826-2023-3-17

10. Врадій О.І., Салямон А.В. Екотоксикологічна оцінка ґрунтів агроекосистеми Лісостепу Правобережного. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2024. Вип. 138. С. 397–403. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.138.47

11. Врадій О.І., Алєксєєв О.О., Салямон А.В. Біотичні показники росту і розвитку сої залежно від її розміщення в агроекосистемі на певній відстані від лісу. *Вісник Сумського національного аграрного університету. (Агрономія і біологія)*. 2025. Вип. 1 (59). С. 51–56. https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.1.7

12. Алєксєєв О.О., Врадій О.І. Вивчення інтенсивності накопичення важких металів рослинами буркуну білого (*Melilotus albus*) на ґрунтах, що зазнали впливу бойових дій. *Аграрні інновації.* 2025. №30. С. 18–24. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.30.2

13. Врадій О.І., Алксєєв О.О., Матусяк М.В., Салямон А.В. Інтенсивність накопичення важких металів насінням рослин сої в залежності від їх зростання в агроекосистемі на певній відстані від лісу. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2025. Вип. 144. С. 67–74. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.9

14. Врадій О.І., Салямон А.В. Вплив просторового розташування посівів відносно лісу на біохімічні показники зерна сої. *Аграрні інновації.* 2025. № 31. С. 18–23. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.31.3

15. Врадій О.І. Визначення питомої активності ^{137}Cs, ^{40}K, ^{226}Ra та ^{232}Th у сірому лісовому ґрунті при вирощуванні озимої пшениці за її мінерального удобрення. *Вісник Сумського національного аграрного університету. (Агрономія і біологія)*. 2025. Вип. 3 (61). С. 64–69. https://doi.org/10.32782/agrobio.2025.3.7

16. Алєксєєв О.О., Врадій О.І., Разанов О.С., Салямон А.В. Інтенсивність накопичення радіонуклідів урожаєм еспарцету піщаного за його вирощування в умовах Полісся. *Аграрні інновації.* 2025. №32. С. 7–11. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.32.1

17. Разанов С.Ф., Врадій О.І., Алєксєєв О.О., Крілевич В.Р. Вплив мінерального удобрення на питому активність ^{137}Cs, ^{40}K, ^{226}Ra та ^{232}Th сірого лісового ґрунту за вирощування кукурудзи. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки.* 2025. Вип. 145 (2). С. 348–355. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.2.37

Дата першого надходження статті до видання: 22.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026