

УДК 631.42:539.163.3:633.17(477.83)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.40>

ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИНЕСЕННЯ АМАРАНТОМ ЦЕЗІЮ-137 ІЗ СІРОГО ЛІСОВОГО ҐРУНТУ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ

Разанов С.Ф. – д.с.-г.н.,

професор кафедри лісового та садово-паркового господарства,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-4883-2696

Разанова А.М. – д.філос. з екології,

старший викладач кафедри лісового та садово-паркового господарства,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-3546-3692

Дудів А.І. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри сталого природокористування та захисту довкілля,

Львівський національний університет ветеринарної медицини

та біотехнологій імені С.З. Гжицького

orcid.org/0000-0002-4436-9008

Мазурак І.В. – к.с.-г.н.,

в.о. доцента кафедри технологій у рослинництві,

Львівський національний університет ветеринарної медицини

та біотехнологій імені С.З. Гжицького

orcid.org/0009-0006-2838-5282

Мищенко Б.Д. – аспірант кафедри екології

та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0009-0001-8219-3058

Проблема радіоактивного забруднення ґрунтів внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС залишається актуальною для аграрного сектору України. Цезій-137, що зберігає радіоактивність протягом десятків років, продовжує мігрувати в агроєкосистемах, впливаючи на якість сільськогосподарської продукції. В умовах обмеженої доступності дорогих методів рекультивациі особливої значущості набуває фіторе mediaція – біологічний процес вилучення радіонуклідів шляхом їх накопичення в рослинній біомасі. Амарант (*Amaranthus* spp.) вирізняється високою врожайністю та широким потенціалом застосування як у тваринництві, так і в харчовій промисловості. Однак рівень накопичення цезію-137 цією культурою, вирощеною на сірих лісових ґрунтах Західного регіону України, вивчено недостатньо. Метою дослідження було визначення питомої активності цезію-137 у надземній вегетативній масі й насінні амаранту, коефіцієнтів небезпеки та розрахунок обсягів винесення радіонуклідів з ґрунту.

Польовий дослід проведено на сірих лісових ґрунтах Львівської області. Встановлено, що середня урожайність вегетативної маси амаранту становила 22,4 т/га, насіння – 2,2 т/га. При цьому винесення цезію-137 з ґрунту вегетативною масою досягало в середньому 336215 Бк/га, тоді як із насінням – лише 9086 Бк/га, що у 37 разів менше. Питома активність цезію-137 у вегетативній масі в середньому становила 14,9 Бк/кг, у насінні – 4,17 Бк/кг, що відповідно у 40 і 120 разів нижче від гранично допустимих норм. Коефіцієнти небезпеки для обох видів продукції не перевищували 0,025 та 0,008 відповідно. Результати дослідження свідчать про можливість використання амаранту не тільки як джерела кормової сировини, а також для фіторе mediaції, зокрема, вилучення радіонуклідів із ґрунту. Отримані дані є науковим обґрунтуванням для розроблення біоекологічних підходів до реабілітації забруднених територій, зокрема, в умовах помірного радіоактивного фону.

Ключові слова: амарант, урожайність, цезій-137, ґрунт, вегетативна маса, насіння, фіторе mediaція, радіонукліди, питома активність.

Razanov S.F., Razanova A.M., Dydiv A.I., Mazurak I.V., Mishchenko B.D. Intensity of Cesium-137 removal from grey forest soil by amaranth under conditions of the Western region of Ukraine

*The issue of radioactive soil contamination resulting from the Chornobyl Nuclear Power Plant disaster remains highly relevant for Ukraine's agricultural sector. Cesium-137, which retains radioactivity for decades, continues to migrate within agroecosystems, adversely affecting the quality of agricultural products. In the context of limited access to costly remediation technologies, phytoremediation gains particular importance – a biological process of extracting radionuclides through their accumulation in plant biomass. Amaranth (*Amaranthus* spp.) is distinguished by its high productivity and broad application potential in both animal husbandry and the food industry. However, the level of cesium-137 accumulation in this crop, when cultivated on grey forest soils of the Western region of Ukraine, remains insufficiently studied. The aim of the research was to determine the specific activity of cesium-137 in the aboveground vegetative biomass and seeds of amaranth, to calculate the hazard coefficients, and to assess the amount of radionuclide removed from the soil.*

The field experiment was conducted on grey forest soils in Lviv Oblast. It was found that the average yield of amaranth vegetative biomass was 22.4 t/ha, while seed yield reached 2.2 t/ha. Under these conditions, the average removal of cesium-137 from the soil by vegetative biomass amounted to 336,215 Bq/ha, whereas its removal by seeds was only 9,086 Bq/ha – 37 times less. The average specific activity of cesium-137 in the vegetative mass was 14.9 Bq/kg, and in seeds – 4.17 Bq/kg, which is 40 and 120 times lower, respectively, than the permissible limits. The hazard coefficients for both types of produce did not exceed 0.025 and 0.008, respectively. The results of the study indicate the potential of amaranth not only as a source of fodder biomass but also as an effective tool for phytoremediation, particularly in extracting radionuclides from the soil. The obtained data provide a scientific basis for developing bioecological approaches to the rehabilitation of contaminated areas, especially under conditions of moderate radioactive background.

Key words: amaranth, yield, cesium-137, soil, vegetative biomass, seeds, phytoremediation, radionuclides, specific activity.

Постановка проблеми. Сучасне аграрне виробництво функціонує в умовах зростаючого техногенного навантаження, зокрема, через радіоактивне забруднення ґрунтів, спричинене аварією на Чорнобильській АЕС. Внаслідок катастрофи було уражено понад 3,5 млн га сільськогосподарських угідь, з яких 1,5 млн га припадає на ліси. Радіонукліди, що перебувають в обмінній формі, активно мігрують в агроєкосистемах, знижуючи якість продовольчої сировини та підвищуючи ризики для здоров'я населення [1].

Паралельно, зміни кліматичних умов, зокрема, підвищення температури, нерівномірність і дефіцит опадів змінюють структуру польових сівозмін. Зростає потреба у впровадженні у виробництво культур, стійких до нових кліматичних умов і здатних забезпечувати стабільний урожай. Однією з таких культур є амарант (посуhostійка, високопродуктивна та екологічно пластична рослина).

Ураховуючи інтенсивне формування вегетативної маси амаранту та її потенційне використання у тваринництві, важливо оцінити його здатність до фітореMediaції (вилучення радіонуклідів із ґрунту разом з урожаєм). Особливо актуальним є вивчення накопичення цезію-137 у амаранті, вирощеному на сірих лісових ґрунтах Західного регіону України, де рівень зволоження забезпечує добрі умови для розвитку культури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Низка наукових праць присвячена вивченню впливу сільськогосподарських технологій на міграцію радіонуклідів у системі ґрунт – рослина – продукція [2-3]. Встановлено, що застосування калійних і фосфорних добрив, вапнування та внесення сорбентів (цеолітів, сапонітів, бентонітів) знижують інтенсивність переходу радіонуклідів до рослинності [4-6]. Проте ці заходи потребують значних матеріальних витрат і можуть призводити до додаткового техногенного навантаження на ґрунт.

Одним із найбільш ефективних і екологічно безпечних підходів до відновлення екологічного стану агроландшафтів, забруднених радіонуклідами, є застосування фітореMediaції – біологічного процесу вилучення токсичних речовин із ґрунтового середовища шляхом накопичення їх у біомасі певних рослин [7-9]. Даний підхід визнано ефективним і екологічно безпечним у контексті післяаварійного землекористування, зокрема, після катастрофи на Чорнобильській АЕС [10-11].

У численних дослідженнях доведено, що значна частина цезію-137, який перебуває в обмінній формі в ґрунті, може бути ефективно вилучена з агроecosистем за умов вирощування культур, здатних до фітореMediaції [12-13]. Особливу увагу в цьому контексті привертає амарант – культура, що вирізняється високою екологічною пластичністю, посухостійкістю, інтенсивним нарощуванням вегетативної маси [14].

Зелена маса амаранту вирізняється високим вмістом біологічно активних речовин. За концентрацією вітамінів вона перевищує багато традиційних овочевих культур. У сухій речовині амаранту кількість аскорбінової кислоти може досягати 443 мг на 100 г, що співставно з показниками білоголової капусти, молоді картоплі, цибулі та навіть цитрусових. Крім того, в амаранті у значних кількостях містяться макро- і мікроелементи, зокрема калій, кальцій, фосфор, бор, кремній, марганець, титан, цинк та залізо. Листя амаранту активно застосовують для приготування фіточаїв, а також як сировину для виготовлення біологічно активних добавок [15]. Рослина може використовуватись як повноцінна сировина, так і у вигляді добавки для покращення харчової цінності продуктів. У багатьох країнах широколисті форми амаранту з великою площею листової поверхні (до 100 м²/га) культивуються як овочева культура [16].

З одного гектара посівів амаранту при врожайності зеленої маси 75 т/га можна отримати до 3 тонн білка, що значно перевищує аналогічні показники у сої (0,6-0,8 т), гороху і ріпаку (0,4-0,5 т), а також пшениці і ячменю (0,2-0,3 т). Білок амаранту за вмістом незамінних амінокислот наближається до тваринного білка, що визначає його цінність як високоякісної харчової та кормової сировини [14]. Це підтверджує перспективність використання амаранту у виробництві продуктів харчування, кормів, а також у фармацевтичній і косметичній промисловості.

За даними сучасних досліджень, у біомасі амаранту виявлено наявність радіонуклідів, зокрема, цезію-137 [17]. Проте, інформація щодо інтенсивності його накопичення амарантом, вирощеним на сірих лісових ґрунтах Західного регіону України, є обмеженою. Незважаючи на велику кількість досліджень щодо накопичення радіонуклідів рослинами, конкретні дані про динаміку вилучення цезію-137 саме амарантом на сірих лісових ґрунтах, які характерні для цього регіону, представлені недостатньо. Це створює науковий запит на вивчення процесів винесення радіонуклідів надземною масою амаранту та обґрунтування можливостей його використання у стратегії очищення забруднених територій.

Мета дослідження – оцінити інтенсивність накопичення та винесення цезію-137 надземною вегетативною масою й насінням амаранту, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Західного регіону України.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження з оцінювання інтенсивності накопичення радіонукліду цезію-137 у надземній вегетативній масі та насінні амаранту проведено на сірих лісових ґрунтах в умовах Західного регіону України (Львівська область). За класифікацією радіоекологічної ситуації, ця територія належить до зони посиленого радіоекологічного контролю, оскільки рівень забруднення ґрунтів цезієм-137 не перевищує 1 Кі/км².

Польовий дослід було закладено з чотирма повтореннями. Технологія вирощування амаранту відповідала загальноприйнятим агрономічним стандартам для польових культур. Вибір ґрунтових зразків для радіологічного аналізу здійснювали методом «конверта», а зразки надземної вегетативної маси та насіння – методом точкових проб з наступним об'єднанням у середні зразки.

Визначення питомої активності цезію-137 у ґрунті, вегетативній масі та насінні здійснювалося методом γ -спектрометрії з використанням високочутливого напівпровідникового детектора. Отримані результати обробляли з використанням стандартних статистичних методів.

Коефіцієнт небезпеки (Кнеб) цезію-137 у вегетативній масі та насінні амаранту визначали як відношення питомої активності радіонукліду у відповідному зразку до гранично допустимого рівня (ДР), встановленого санітарними нормами для рослинної продукції. Це дозволило оцінити ступінь потенційної небезпеки споживання продукції амаранту в умовах легкого радіоактивного забруднення.

Результати досліджень. На рисунку 1 представлено результати визначення питомої активності радіонукліду цезію-137 у зразках сірого лісового ґрунту за чотирма варіантами дослідів. Значення питомої активності коливаються в межах від 0,15 до 0,19 Бк/кг. Найменший показник спостерігається у варіанті 1 (0,15 Бк/кг), тоді як максимальне значення зафіксовано у варіанті 2 (0,19 Бк/кг). Варіанти 3 і 4 мають однаковий рівень (по 0,18 Бк/кг), що свідчить про незначну варіацію рівня забруднення ґрунту в межах дослідної ділянки.

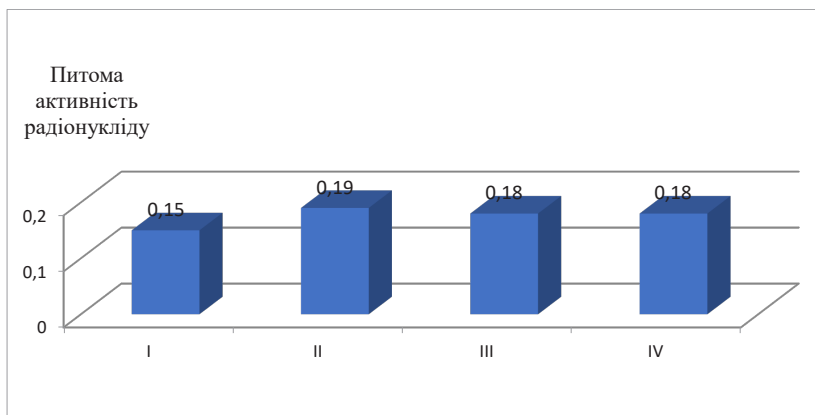


Рис. 1. Питома активність сірого лісового ґрунту, Бк/кг

Рисунок 2 ілюструє рівень урожайності вегетативної маси амаранту за різними варіантами дослідів на сірих лісових ґрунтах. Найвищу урожайність зеленої маси зафіксовано у варіанті I – 22,7 т/га, що свідчить про сприятливі умови для росту та активне нарощування біомаси. Дещо нижчі показники отримано у варіантах II (22,4 т/га) та IV (22,5 т/га), а найменшу урожайність виявлено у варіанті III – 22,2 т/га.

Загалом, коливання між варіантами були незначними (у межах 0,5 т/га), що вказує на стабільне формування вегетативної маси амаранту в умовах дослідження. Отримані результати свідчать про здатність культури ефективно формувати надземну біомасу навіть за наявності незначного радіоактивного забруднення, що є важливою передумовою для її потенційного використання у фіторе mediaції.

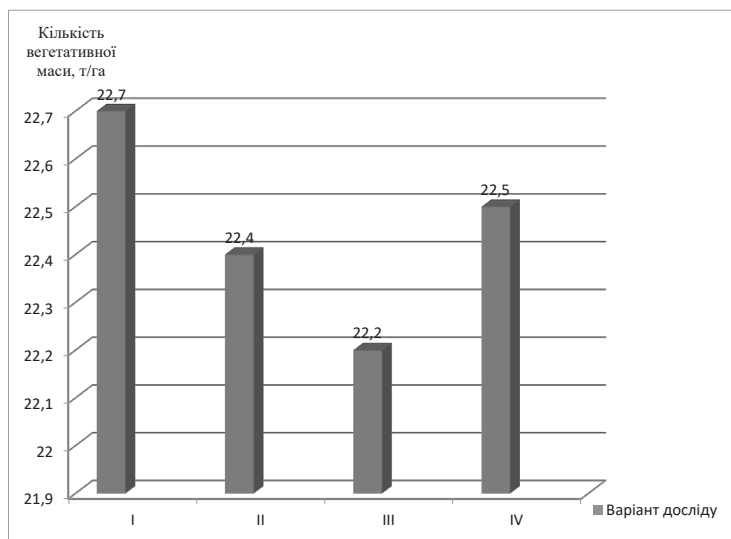


Рис. 2. Урожайність вегетативної маси амаранту, т/га

На рисунку 3 подано урожайність насіння амаранту за варіантами досліджу. Так, найвищий показник спостерігався у варіанті III – 2,3 т/га, що свідчить про сприятливі умови для розвитку рослин. У варіантах I та IV урожайність була дещо нижчою – 2,2 т/га, а найменший показник відмічено у варіанті II – 2,0 т/га.

Загальний розподіл урожайності свідчить про стабільне формування насіннєвої продукції амаранту за умов дослідження. Отримані результати підтверджують здатність цієї культури формувати товарні врожаї насіння на сірих лісових ґрунтах Західного регіону України.

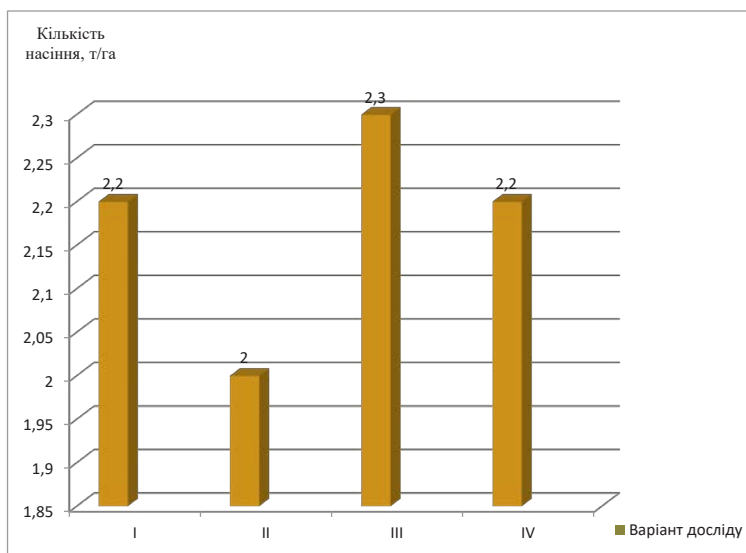


Рис. 3. Урожайність насіння амаранту, т/га

Результати досліджень, відображені в таблиці 1 показують, що питома активність цезію-137 у надземній вегетативній масі амаранту за чотирма варіантами дослідів були в межах від 13,9 до 16,2 Бк/кг. В середньому по варіантах дослідів питома активність цезію-137 у надземній вегетативній масі амаранту склала $14,9 \pm 0,87$ Бк/кг, що нижче від допустимого рівня у 40,2 рази.

Характеризуючи коефіцієнт небезпеки питомої активності цезію-137 у надземній вегетативній масі амаранту, слід зазначити, що його значення знаходилося в межах 0,023-0,027, а середній показник по варіантах дослідів склав $0,025 \pm 0,0014$. Отримані значення суттєво нижчі від гранично допустимого рівня, який становить 1,0 – у середньому в 40 разів. Це свідчить про безпечність надземної вегетативної маси амаранту та її придатність для використання як кормової сировини у тваринництві.

Таблиця 1

Питома активність цезію-137 у надземній вегетативній масі амаранту, Бк/кг

Варіант дослідження	ДР	Фактична питома активність	В середньому по групі	Коефіцієнт небезпеки	В середньому по групі
I	600	14,5	$14,9 \pm 0,87$	0,024	$0,025 \pm 0,0014$
II	600	16,2		0,027	
III	600	13,9		0,023	
IV	600	15,3		0,025	

Характеризуючи інтенсивність виносення цезію-137 із сірого лісового ґрунту за вирощування амаранту (табл. 2), слід зазначити, що урожайність зеленої маси культури становила від 22,2 до 22,7 т/га, у середньому – 22,4 т/га. За такої врожайності виносення цезію-137 з ґрунту вегетативною масою амаранту коливалося від 308580 до 362880 Бк/га.

Таблиця 2

Виносення цезію-137 з сірого лісового ґрунту з вегетативною масою амаранту

Варіант дослідження	Урожайність, т/га	Фактична питома активність вегетативної маси амаранту, Бк/кг	Винесено з ґрунту цезію-137, Бк/га
I	22,7	14,5	329150
II	22,4	16,2	362880
III	22,2	13,9	308580
IV	22,55	15,3	344250

У середньому по варіантах дослідів цей показник становив 336215 Бк/га. Отримані результати свідчать про здатність амаранту ефективно вилучати радіонукліди з ґрунтового середовища, що дає підстави для подальшого вивчення культури у контексті фіторе mediaції забруднених територій.

Питома активність цезію-137 у насінні амаранту (табл.3) в середньому за варіантами дослідження становила 4,17 Бк/кг, що у 120 разів нижче встановленого допустимого рівня. Коефіцієнт небезпеки для насіння амаранту становив 0,008, що у 125 разів нижче гранично допустимого значення (1,0). Отримані результати підтверджують безпечність насіння амаранту та обґрунтовують можливість його використання у тваринництві та харчовій промисловості.

Таблиця 3

Питома активність цезію-137 у насінні амаранту, Бк/кг

Варіант дослідження	ДР	Фактична питома активність	В середньому по групі	Коефіцієнт небезпеки	В середньому по групі
I	500	4,68	4,17±0,21	0,009	0,008±0,0002
II	500	3,76		0,007	
III	500	4,0		0,008	
IV	500	4,24		0,008	

За результатами проведених досліджень встановлено, що винесення цезію-137 із сірого лісового ґрунту з насінням амаранту (табл. 4) варіювало в межах від 7520 Бк/га до 10296 Бк/га, що в середньому склало 9086 Бк/га.

Таблиця 4

Винесення цезію-137 з сірого лісового ґрунту з насінням амаранту

Варіант дослідження	Урожайність, т/га	Фактична питома активність насіння амаранту, Бк/кг	Винесено з ґрунту цезію-137, Бк/га
I	2,2	4,68	10296
II	2,0	3,76	7520
III	2,3	4,0	9200
IV	2,2	4,24	9328

У порівнянні з винесенням цезію-137 надземною вегетативною масою, використання насіння амаранту забезпечує в 37 разів менший рівень вилучення цезію-137, ніж використання вегетативної маси. Це підтверджує доцільність застосування амаранту саме як культури для фіторе mediaційного очищення ґрунтів у системах кормовиробництва, де використовується вся надземна біомаса.

Висновки. У результаті досліджень встановлено, що за вирощування амаранту на сірих лісових ґрунтах із рівнем забруднення цезієм-137 до 0,175 Ки/км², питома активність цього радіонуклідів у надземній вегетативній масі була нижчою за допустимі рівні у 40,2 рази, а в насінні – у 120 разів, що свідчить про безпечність отриманої продукції. Урожайність вегетативної маси амаранту без застосування добрив становила 22,4 т/га, а насіння – 2,2 т/га. Загальне винесення цезію-137 із ґрунту вегетативною масою досягало 336215 Бк/га, що суттєво перевищує винесення цезію-137 насінням, яке становило 9086 Бк/га. Таким чином, амарант може розглядатися як перспективна культура для фіторе mediaційного сільськогосподарських угідь, забруднених цезієм-137, із можливістю подальшого використання надземної біомаси як кормової сировини за умови дотримання радіологічного контролю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Разанов С.Ф., Куценко М.І. Оцінка рівня накопичення радіонуклідів сільськогосподарськими бобовими нектаропилконосними рослинами в умовах Північного Полісся. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 3. С. 198–207. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-3-17>
2. Zhu Y.G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of Experimental Botany*. 2000. Vol. 51, № 351. P. 1635–1645. DOI: <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.351.1635>

3. Singh G., Bhadange S., Bhawna F., Shewale P., Dahiya R., Aggarwal A., Arya S.K. Phytoremediation of radioactive elements, possibilities and challenges: special focus on agricultural aspects. *International Journal of Phytoremediation*. 2022. Vol. 25, № 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2043239>
4. Yamaguchi N., Hikono A., Saito T. Effects of zeolite and vermiculite addition on exchangeable radiocaesium in soil with accelerated ageing. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 203. P. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.02.011>
5. Mwalongo D.A., Haneklaus N.H., Carvalho F.P., et al. Influence of phosphate fertilizers on the radioactivity of agricultural soils and tobacco plants in Kenya, Tanzania, and Uganda. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 83004–83023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27543-8>
6. Mondal M., Biswas B., Garai S., Sarkar S., Banerjee H., Brahmachari K., Bandyopadhyay P.K., Maitra S., Brestic M., Skalicky M., et al. Zeolites Enhance Soil Health, Crop Productivity and Environmental Safety. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, № 3. Article 448. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11030448>
7. Sun X., Kobayashi S., Tokue A., Itabashi H., Mori M. Enhanced Radiocesium Uptake by Rice with Fermented Bark and Ammonium Salt Amendments. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019. Vol. 202. P. 59–65.
8. Tamaoki M., Yabe T., Furukawa J., Watanabe M., Ikeda K., Yasutani I., Nishizawa T. Comparison of Potentials of Higher Plants for Phytoremediation of Radioactive Cesium from Contaminated Soil. *Environmental Control in Biology*. 2016. Vol. 54, № 1. P. 65–69.
9. Dursun S., Symochko L., Mankolli H. Bioremediation of heavy metals from soil: an overview of principles and criteria of using. *Агроекологічний журнал*. 2020. № 3. С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2020.211521>
10. Snitynskyi V., Razanov S., Hnativ P., Bakhmat O., Kutsenko M., Kolisnyk O. Phytoremediation of ^{137}Cs contaminated sodpodzolic soil in Northern Polissia white sweet clover (*Melilotus albus*). *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81, № 1. P. 223–229. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2270305>
11. Снітинський В.В., Ткачук О.П., Разанова А.М., Коруняк О.П. Ефективність фітореMediaції забрудненого важкими металами ґрунту за вирощування розторопші плямистої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 28(1). С. 164–171. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-11>
12. Куценко М.І. Інтенсивність накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії пижмолистої. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2024. Вип. 139. Ч. 1. С. 273–279. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.35>
13. Razanov S., Kutsenko M., Klymenko M., Bakhmat M., Klymenko O., Bakhmat O., Holubieva T., Kovalchuk N., Mazurak O. Assessment of Phytoremediation of ^{137}Cs Contaminated Soils During the Cultivation of Nectar-Pollinating Plants. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24, № 5. P. 316–321. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/161767>
14. Гопцій Т.І., Воронков М.Ф., Бобро М.А. та ін. Амарант: селекція, генетика та перспективи вирощування: монографія. Харків: ХНАУ, 2018. 362 с.
15. Гудковська Н.Б. Урожайність та вміст білка в зеленій масі амаранту залежно від способів та строків сівби в Лівобережному Лісостепу України. *Овочівництво і багаторічництво*. 2016. Вип. 62. С. 68–76.
16. Янюк Т.І., Грюнвальд Н.В. Виробництво амаранту в Україні: стан і перспективи. *Продовольчі ресурси*. 2022. Т. 10, № 18. С. 179–192. DOI: <https://doi.org/10.31073/foodresources2022-18-18>
17. Тетерук О.О., Ковальов В.Б., Ландін В.П., Фещенко В.П. Перспективи вирощування конопель, сої та амаранту на радіоактивно забруднених територіях. *Збалансоване природокористування*. 2018. № 4. С. 37–45.