

УДК (UDC): 504.054:631.5:621.039

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2020-23-12>

В. В. ІЛЛЕНКО¹, канд. біол. наук, **К. Є. ШАВАНОВА¹**, канд. біол. наук,
Ю. В. РУБАН¹, **О. Ю. ПАРЕНЮК¹**, канд. біол. наук

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

e-mail: Illienkovv@gmail.com
shavanova@gmail.com
yuliyaruban24@gmail.com
olena.parenjuk@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0058-0442>
<https://orcid.org/0000-0002-6798-3123>
<https://orcid.org/0000-0002-1767-3688>
<https://orcid.org/0000-0002-9057-8441>

НАДХОДЖЕННЯ ¹³⁷Cs У РОСЛИНИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР ЗА ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНИХ БАКТЕРІАЛЬНИХ ПРЕПАРАТІВ

Мета. Оцінка ролі окремих штамів мікроорганізмів у переході ¹³⁷Cs у рослини ярої пшениці і ріпака.

Методи. Польові, лабораторні, інокуляції, гамма-спектрометрії.

Результати. Грунтові мікроорганізми можуть як знижувати, так і посилювати перехід ¹³⁷Cs із ґрунту в рослини. Мікроорганізми-інокулянти при використанні на бідних елементами живлення ґрунтах прискорюють ріст рослин у довжину, що свідчить про покращення умов їхнього зростання. У дослідженнях вдалося показати, що дана властивість не залежить від локалізації мікроорганізму на поверхні кореня, адже всі проаналізовані бактерії належали до групи таких, що колонізують ризосферу рослини. В умовах польового дослідження інокуляція насіння ріпаку штамом *A. chroococcum* УКМ В-6082 забезпечила зниження K_d ¹³⁷Cs майже на 50 % порівняно з контролем. У досліді з пшеницею достовірного зменшення накопичення ¹³⁷Cs не було. Застосування комплексів препаратів на основі штамів бактерій *Agrobacterium radiobacter* ІМВ В-7246 та *A. chroococcum* УКМ В-6082 для інокуляції насіння ріпаку й *Azotobacter chroococcum* УКМ В-6003, можна розглядати як додатковий радіозахисний спосіб блокування надходження ¹³⁷Cs у ці види сільськогосподарських рослин.

Висновки. Грунтові мікроорганізми можуть як знижувати, так і підвищувати накопичення ¹³⁷Cs в біомасі рослин і ця властивість не залежить від локалізації мікроорганізму на поверхні кореня, адже всі проаналізовані бактерії належали до групи таких, що колонізують ризосферу рослини. Запропоновано використання інокуляції насіння сільськогосподарських рослин бактеріальними препаратами за умов вирощування на забрудненому радіонуклідами ґрунті як додаткового заходу щодо зменшення накопичення радіонуклідів у зеленій масі рослин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікробні добрива, радіонукліди, контрзаходи

Illienko V. V.¹, Shavanova K. E.¹, Yuliia Ruban Y. V.¹, Parenjuk O. Y.¹

¹ National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony St., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

TRANSFER OF ¹³⁷CS TO CEREAL PLANTS DUE TO MICROORGANISMS ACTIVITY

Purpose. Evaluation of the role of individual strains of microorganisms in transfer of ¹³⁷Cs in spring wheat and rapeseed plants.

Methods. Fieldwork, laboratory experiments, inoculation, gamma spectrometry.

Results. Soil microorganisms can both reduce and enhance the transition of ¹³⁷Cs from soil to plants. Inoculating microorganisms, when used on nutrient poor soils, accelerate the growth of plants in length, which indicates an improvement in their growing conditions. Studies have shown that it does not depend on the localization of the microorganism on the root surface, because all analyzed bacteria belonged to the group colonizing the rhizosphere of the plant. In experiments with wheat, there was no significant reduction in ¹³⁷Cs accumulation. The use of drug complexes based on the bacterial strains *Agrobacterium radiobacter* IMV B-7246 and *A. chroococcum* UKM B-6082 for inoculation of rapeseed and *Azotobacter chroococcum* UKM B-6003 can be considered as an additional radioprotective method of blocking the influx of ¹³⁷Cs in these rural plants.

Conclusions. Soil microorganisms can both reduce and increase the accumulation of ¹³⁷Cs in plant biomass and this property does not depend on the localization of the microorganism on the root surface, because all

© Ілленко В. В., Шаванова К. Є., Рубан Ю. В., Паренюк О. Ю., 2020



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

analyzed bacteria belonged to the group colonizing the rhizosphere of the plant. The use of inoculation of seeds of agricultural plants with bacterial preparations under the conditions of cultivation on soil contaminated with radionuclides as an additional measure to reduce the accumulation of radionuclides in the green mass of plants is proposed.

KEY WORDS: microbial fertilizers, radionuclides, countermeasures

Ильенко В. В.¹, Шаванова Е. Е.¹, Рубан Ю. В.¹, Паренюк Е. Ю.¹

¹Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, г. Киев, 03041, Украина

ПОСТУПЛЕНИЯ ¹³⁷CS В РАСТЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР ПОД ВЛИЯНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ БАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ

Цель. Оценка роли отдельных штаммов микроорганизмов в переходе ¹³⁷Cs в растения яровой пшеницы и рапса.

Методы. Полевые, лабораторные, инокуляции, гамма-спектрометрии.

Результаты. Почвенные микроорганизмы могут как снижать, так и усиливать переход ¹³⁷Cs из почвы в растения. Микроорганизмы-инокулянты при использовании на бедных элементами питания почвах ускоряют рост растений в длину, что свидетельствует об улучшении условий их роста. В исследованиях удалось показать, что данное свойство не зависит от локализации микроорганизма на поверхности корня, ведь все проанализированные бактерии принадлежали к колонизирующим ризосферу растения. В условиях полевого опыта инокуляция семян штаммом *A. chroococcum* УКМ В-6082 обеспечила снижение K_n^{137Cs} почти на 50% по сравнению с контролем. В опытах с пшеницей достоверного уменьшения накопления ¹³⁷Cs не было. Применение комплексов препаратов на основе штаммов бактерий *Agrobacterium radiobacter* ИМО В-7246 и *A. chroococcum* УКМ В-6082 для инокуляции семян и *Azotobacter chroococcum* УКМ В-6003, можно рассматривать как дополнительный радиозащитное способ блокировки поступления ¹³⁷Cs в эти виды сельскохозяйственных растений.

Выводы. Почвенные микроорганизмы могут как снижать, так и повышать накопления ¹³⁷Cs в биомассе растений и это свойство не зависит от локализации микроорганизма на поверхности корня, ведь все проанализированы бактерии принадлежали к группе таких, что колонизируют ризосферу растения. Предложено использование инокуляции семян сельскохозяйственных растений бактериальными препаратами в условиях выращивания на загрязненной радионуклидами почве как дополнительной меры по уменьшению накопления радионуклидов в зеленой массе растений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микробные удобрения, радионуклиды, контрмеры

Вступ

Для повного розуміння шляхів міграції радіонуклідів у навколишньому середовищі, зокрема у агроєкосистемах, важливим є детальне розуміння ролі кожної з ланок екосистеми у названому процесі. Забруднені радіоізотопами цезію ґрунти, які розпадаються через β та γ -розпад, представляють довгострокову небезпеку навіть після тривалого періоду напіврозпаду (30 років для ¹³⁷Cs та 2 роки для ¹³⁴Cs) [1]. Отже, забруднення ізотопами цезію сільськогосподарських районів залишається однією з найбільших проблем через збитки, які воно завдає худобі, так і ризики для здоров'я людей, спричинених поглинанням забруднених сільськогосподарських продуктів [2–4]. Так детальне розуміння ролі ґрунтових бактерій

надать змогу для більш предметної побудови моделей міграції [5].

Хоча вплив дії іонізуючого випромінювання на мікроорганізми, зокрема ґрунтові, досліджувався і до аварії на ЧАЕС, їх роль у міграції радіонуклідів та зміні фізико-хімічного стану у ґрунті було досліджено мало. Переважно у системі «радіонуклідне забруднення – мікроорганізми» розглядався вплив іонізуючої радіації на стан мікроорганізмів, а не навпаки, вплив життєдіяльності мікроорганізмів на фізико-хімічний стан радіонуклідів. На доступність ¹³⁷Cs для поглинання та накопичення рослинами сильно впливає взаємодія в ризосфері [6, 7]. Наприклад, ексудати та виділення коренів (екзополімери та епітеліальні

клітини) можуть змінювати фізичні та хімічні характеристики поверхонь коренів рослин, забезпечуючи живлення мікробів для підвищення їх активності та стимулювання росту рослин [8–10]. Поглинання рослинами ^{137}Cs із забруднених ґрунтів може бути посилено шляхом маніпулювання концентрацією та співвідношенням іонів у середовищах росту та / або використання взаємодії рослин-ґрунту та мікроорганізмів у ризосфері [11–13] для збільшення біомаси рослин. Таким чином, інокуляція бактерій, що сприяють росту рослин, також є одним із досліджених методів для посилення засвоєння ^{137}Cs [14, 15], безпосередньо забезпечуючи фітогормони, депресуючі патогени речовини або низькомолекулярні органічні кислоти, які підкислюють ризосферні ґрунти [16].

Проте, оскільки ґрунтова мікрофлора характеризується величезним біорізноманіттям і значною біомасою [17], вона може впливати на стан радіонуклідів у ґрунті і, відповідно, на їх надходження у рослини, зокрема й у культури сільськогосподарського призначення, які становлять основу харчового раціону людини, утворюють кормову базу тваринництва і на забруднених радіонуклідами територіях стають головним дозоформуючим джерелом опромінення людини [2]. Саме тому зменшення надходження радіонуклідів на першій ланці харчового ланцюга ґрунт–рослина і тепер, на

пізній фазі аварії на Чорнобильській АЕС, залишається одним з основних завдань не тільки сільськогосподарської радіобіології та радіоекології, а й радіаційної гігієни.

Варто зазначити, що з роками після аварії відбувається «старіння цезію» [18, 19] – фіксація його у ґрунтово-вбирному комплексі, перехід у слаботорозчинний стан. Тому традиційні прийоми гальмування переходу ^{137}Cs у рослини за допомогою вапнування кислих ґрунтів [20], внесення підвищених норм калійних добрив знижують свою ефективність, про що свідчить зменшення коефіцієнтів накопичення і переходу [21]. У цій ситуації застосування бактеріальних препаратів, які можуть впливати, з одного боку, на фізико-хімічний стан поживної бази ґрунту, а з іншого – на стан радіонуклідів, може стати одним з елементів контрзаходів, спрямованих на зменшення переходу радіонуклідів із ґрунту у продовольчі рослини.

Отже, метою роботи є встановлення ролі окремих штамів мікроорганізмів у переході ^{137}Cs у рослини ріпака та пшениці, для чого було визначено вплив інокуляції насіння мікроорганізмами, що використовуються в сільському господарстві, на морфометричні показники рослин, вирощені на забрудненому радіонуклідами субстраті та досліджено зміни у накопиченні рослинами ^{137}Cs під впливом мікроорганізмів в умовах лабораторного та польового експериментів.

Матеріали і методи

Польовий дослід. Польовий дослід по визначенню впливу передпосівної інокуляції насіння сільськогосподарських культур мікроорганізмами на накопичення ^{137}Cs в зеленій масі рослин закладено на дослідній ділянці в с. Ноздрище, яке відноситься до Зони безумовного (обов'язкового) відселення (2 зона) та знаходиться на території природного заповідника «Древлянський».

Дослідна ділянка розміщена на основній поверхні першої тераси р. Уж (координати 51.235794° північної широти і 29.181377° східної довготи). Відбір проб ґрунту та зеленої маси рослин здійснювався в поетапно. Ґрунт відбирався за стандартною методикою на глибину 20–23 см, при цьому використовувався бур ґрунтовий типу АМ 26. Зелена маса рослин відбиралась згідно із стандартними методиками в радіометрії [1].

Дослід складався з 10 варіантів, включаючи два контрольних варіанти, закладений в трьох повторностях (табл. 1). Розмір ділянки однієї повторності 2 м^2 .

Культури рослин і мікроорганізмів. Для проведення досліджень взяте насіння таких сільськогосподарських рослин: ріпак ярий (*Brassica napus* L.) сорту Сіріус (схожість 85%) і пшениця яра (*Triticum aestivum* L.) сорту Елегія миронівська (схожість 88%).

Інокуляцію проводили шляхом замочування насіння в 24-годинній культурі мікроорганізмів протягом 1 год. При цьому розраховане бактеріальне навантаження складало 10^7 клітин/насінину. Контрольні варіанти замочувались в стерильній воді. Для інокуляції використані штами мікроорганізмів з колекції Інститут мікробіології і вірусології імені Д. К. Заболотного НАН України, що входять

Таблиця 1

Коди варіантів польового експерименту

Штам мікроорганізму	Культура	
	Ріпак	Пшениця
Контроль – без бактерій	1	2
<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	4	6
<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	7	9
<i>B. megaterium</i> УКМ В-5724	10	12
<i>A. radiobacter</i> ІМВ В-7246	13	15

до складу бактеріальних препаратів та мікробних добрив. А саме: *Azotobacter chroococcum* УКМ В-6082, *Azotobacter chroococcum* УКМ В-6003, *Bacillus mega-terium* УКМ В-5724, *Agrobacterium radiobacter* ІМВ В-7246.

Вимірювання активності ^{137}Cs . Вміст ^{137}Cs в попередньо підготовлених пробах ґрунту та зеленої маси рослин визначали на високоефективному гамма-спектрометрі "ADCAM-300" з напівпровідниковим детектором із високочистого германію GEM-30185 (виробництво EG&G ORTEC, США) – МДА <5 Бк/кг за ^{137}Cs (енергетична роздільна здатність по лінії ^{60}Co 1,78 кеВ, ефективність реєстрації відносно NaI – 30 %) і багатоканальним аналізатором ASPEC-927 і програмним забезпеченням GammaVision 32 ("EG & ORTEC", США). Активність ^{137}Cs вимірювали по лінії гамма-випромінювання 661,66 кеВ короткоживучого $^{137\text{m}}\text{Ba}$, що знаходиться у рівновазі з ^{137}Cs ($^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137\text{m}}\text{Ba}(\gamma) \rightarrow ^{137}\text{Ba}$). Вимірювання проводили в поліетиленових посудинах об'ємом 130 см³ і в посудинах Марінеллі об'ємом 1000 см³. Калібрування спектрометра здійснювалось з використанням сертифікованих еталонних матеріалів відповідно до вимог стандартизованого методу [2].

Лабораторний експеримент (кварцевий пісок). Для аналізу біологічної доступності ^{137}Cs під впливом інокуляції насіння бактеріальними препаратами використовували ріпак ярий і пшеницю яру. Як субстрат

використовували кварцовий пісок із фракцією 0,8–1,2 мм. Для стерилізації кварцовий пісок автоклаували протягом 20 хв. при 140°C та тиску 2 атм., після чого прожарювали протягом 30 хв. при температурі 150°C. До 50 г субстрату додавали 5 мл розчину хлориду цезію активністю 40 Бк/мл та 5 мл безкалієвого середовища Мурасіге-Скуга [3] як джерело поживних елементів для рослин. Питома активність субстрату за ^{137}Cs в складала $4 \pm 0,3$ кБк/кг.

Поверхню насіння ріпаку стерилізували, витримуючи 3 хв. у 6%-му розчині перекису водню, тричі відмивали у стерильній водогінній воді. Насіння пшениці стерилізували слабким розчином перманганату калію. Для інокуляції 20 насінин переносили у 24-годинну культуру мікроорганізмів та витримували в інокуляті протягом 60 хв., після чого переносили до ємностей зі стерильним субстратом. Бактеріальне навантаження складало 10^7 кл./насінину. Для інокуляції використовували штами з колекції ІМВ НАНУ, а саме: *A. chroococcum* УКМ В-6082, *A. chroococcum* УКМ В-6003, *B. megaterium* УКМ В-5724, *A. radiobacter* ІМВ В-7246.

Рослини вирощували протягом 14 діб, після чого вимірювали довжину стебла і корінця, відмивали у воді, висушували до повітряно-сухого стану та готували до спектрометрії.

Результати та обговорення

Морфометричні характеристики рослин, інокульованих мікроорганізмами. У проведеному дослідженні проаналізовано вплив низки ґрунтових бактерій на доступність ^{137}Cs для рослин ріпаку ярого, вики посівної та пшениці ярої і вивчено вплив цезію та інокуляції насіння мікроорганізмами на морфологічні особливості рослин,

вирощених на стерилізованому кварцовому піску.

Мікроорганізми-інокулянти, що протестовані у варіантах з ріпаком, стимулюють проростання насіння. Як свідчать дані табл. 2 відсоток проростання насіння, не інокульованого бактеріями, складав $78,3 \pm 5,8\%$, у той час як в решті експеримен-

Таблиця 2

Морфометричні показники рослин, вирощених на інертному середовищі та інокульованих мікроорганізмами

Рослина	Культура-інокулянт	Довжина, см			Проростання, %
		корінь	стебло	разом	
Ріпак	Контроль	5,1±0,6	9,0±1,6	14,1±2,2	80,7±7,8
	Контроль + ¹³⁷ Cs (без бактерій)	4,8±0,3	8,5±1,1	13,4±1,1	78,3±5,8
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	8,1±0,2	9,2±0,3	17,3±0,5	85,0±8,7
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	6,7±0,6	8,1±0,5	14,8±0,6	81,7±12,6
	<i>B. megaterium</i> УКМ В-5724	7,8±0,9	8,9±0,7	16,1±1,2	85,0±8,7
	<i>A. radiobacter</i> ІМВ В-7246	8,5±0,7	9,2±0,6	17,5±0,4	91,7±5,8
Пшениця	Контроль	3,8±1,2	12,3±3,1	16,0±4,3	70,3±14,1
	Контроль + ¹³⁷ Cs (без бактерій)	7,6±0,5	8,0±0,6	15,6±1,1	65,7±5,0
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	4,3±1,6	11,5±4,2	15,9±5,6	70,0±4,1
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	2,6±0,2	10,9±4,1	13,5±4,3	66,7±9,4
	<i>B. megaterium</i> УКМ В-5724	5,3±2,5	14,6±2,9	19,8±4,2	90,3±14,1
	<i>A. radiobacter</i> ІМВ В-7246	3,8±1,1	13,8±2,0	17,7±3,1	76,7±6,2

тальних посудин проросло більше насіння, досягаючи максимуму у посудинах з насінням, інфікованим *Agrobacterium radiobacter* (91,7±5,8%). У досліді з пшеницею підвищений порівняно з контролем відсоток проростання насіння продемонстрував варіант з інокуляцією *B. megaterium* УКМ В-5724. Тут проросло 90,3±14,1% насінин, що в 1,3 разів більше, ніж у контролі. Дослід з виною посівною продемонстрував схожий результат. Як і в досліді з ріпаком найвищий показник проростання насіння було відмічено у варіанті з інокуляцією *Agrobacterium radiobacter* (88,3±8,5%).

Отримані дані (рис. 1, рис. 2) свідчать про ефективність використаних для інокуляції штамів як модифікаторів інтенсивності надходження поживних речовин: навіть на такому бідному субстраті, як кварцовий пісок.

У досліді з ріпаком ефективність у стимуляції розвитку біомаси показали всі проаналізовані штами, хоча варто зазначити, що *A. chroococcum* УКМ В-6003 та *Agrobacterium radiobacter* дали найкращі результати щодо поліпшення умов живлення, а отже і швидкості розвитку рослин: сумарна довжина рослини складала 17,3±0,5 см та 17,5±0,4 см відповідно у порівнянні з контрольними рослинами, вирощеними без інокуляції мікроорганізмами, довжина яких складала 14,1±2,2 см. Слід також підкреслити, що збільшення довжини відбулося в основ-

ному завдяки стимуляції розвитку кореневої системи.

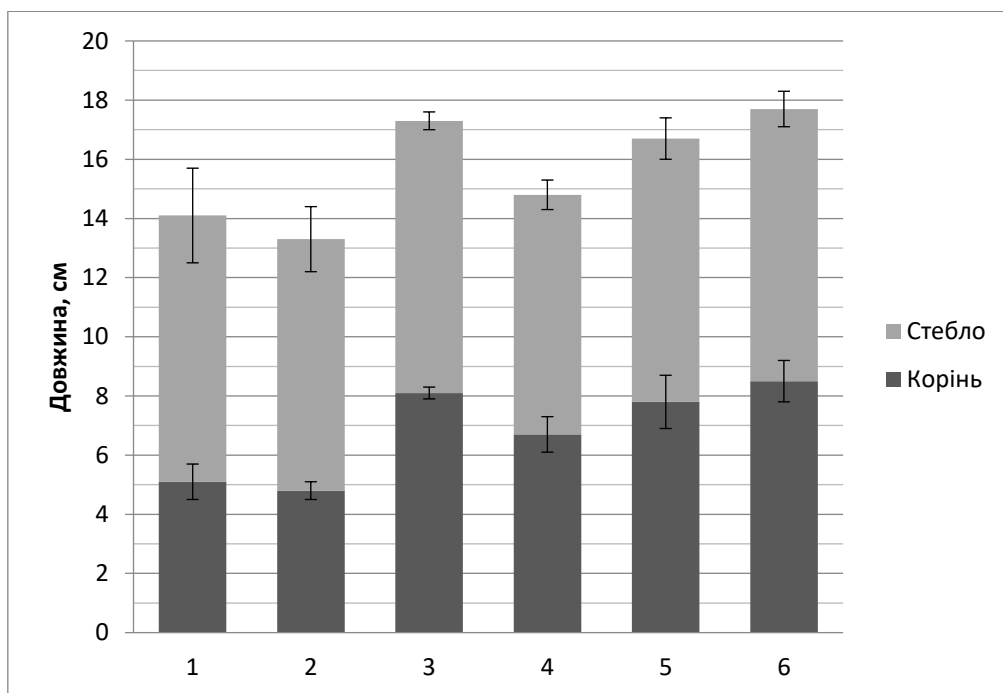
Так, довжина кореня рослини, інокульованої *A. chroococcum* УКМ В-6003, складала 8,1±0,2 см, що майже в 1,6 разів перевищує довжину кореня контрольних проростків, що складає 5,1±0,6 см.

В той же час корінці інокульованих рослин більш розгалужені і набагато краще розвинуті, що може бути пов'язано зі стимуляцією гормональної активності рослини саме у присутності радіонукліда.

Дослід з пшеницею показав дещо інші результати по стимуляції розвитку біомаси. Варіанти з інокуляцією двома штамми *Azotobacter* показали знижену швидкість росту рослин. Сумарна довжина рослин складала 13,5±4,3 та 15,9±5,6 см відповідно, в той час, як контрольні рослини мали довжину в середньому 16,0±4,3 см.

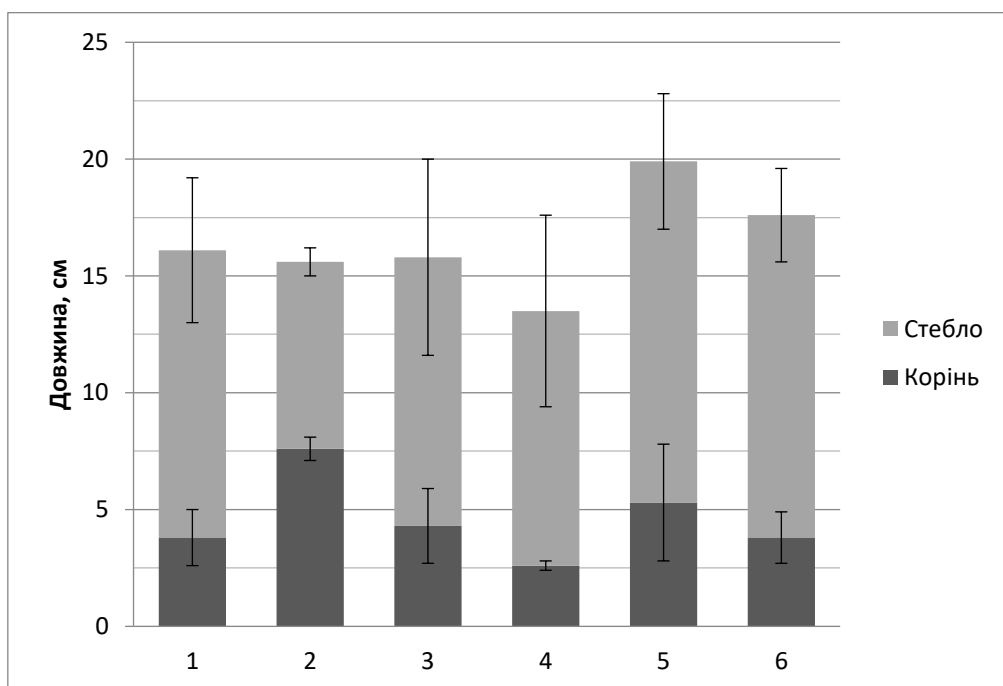
Найбільший приріст біомаси показав штам *B. megaterium* – довжина рослин 19,8±4,2 см. І тут перевага у рості в значній мірі була забезпечена за рахунок більш розвиненої кореневої системи рослин. Що стосується варіанту з інокуляцією *Agrobacterium radiobacter*, то тут знову відмічається досить високий рівень приросту біомаси – 17,7±3,1 см.

Зміна інтенсивності накопичення ¹³⁷Cs рослинами після інокуляції. Наступним



1 – контроль; 2 – контроль + ¹³⁷Cs (без бактерій); 3 – *A. chroococcum* UKM B-6003; 4 – *A. chroococcum* UKM B-6082; 5 – *B. megaterium*; 6 – *Agrobacterium radiobacter*.

Рис. 1 – Морфометричні показники ріпаку, вирощеного після інокуляції мікроорганізмами



1 – контроль; 2 – контроль + ¹³⁷Cs (без бактерій); 3 – *A. chroococcum* UKM B-6003; 4 – *A. chroococcum* UKM B-6082; 5 – *B. megaterium*; 6 – *Agrobacterium radiobacter*.

Рис. 2 – Морфометричні показники пшениці, вирощеної після інокуляції мікроорганізмами

кроком представлено дослідження був аналіз радіоактивності рослин, інокульованих штамми ризосферних бактерій та вирощених на субстраті з ^{137}Cs . З табл. 3 видно, що майже всі експериментальні групи, за винятком групи рослин, інокульованих *Bacillus megaterium*, достовірно відрізняються від контрольної групи.

Серед рослин, інокульованих бактеріями, що використовуються як біопрепарати для стимуляції росту і розвитку рослин,

найбільшою активністю характеризувалися *A. chroococcum* УКМ В-6003, що складала $876,5 \pm 63,2$ Бк/г повітряно-сухої біомаси, або $50,2 \pm 5,0\%$ від активності субстрату [4]. Саме це і є найвищим показником для усіх проаналізованих мікроорганізмів. Щодо мінімальних показників, то вони характерні для *Agrobacterium radiobacter* у всіх варіантів: $495,0 \pm 83,7$ Бк/г для досліду з ріпаком, $71,7 \pm 12,0$ Бк/г для пшениці та $95,3 \pm 11,4$ Бк/г для вики.

Таблиця 3
Накопичення ^{137}Cs рослинами залежно від культури мікроорганізмів, інтродукованих у ризосферу

Рослина	Культура-інокулянт	Питома активність ^{137}Cs у рослинах, Бк/г	% переходу із субстрату в рослини
Ріпак	Контроль + ^{137}Cs (без бактерій)	$593,2 \pm 35,0$	$29,4 \pm 2,9$
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	$876,5 \pm 63,2$	$50,2 \pm 5,0$
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	$600,8 \pm 17,9$	$36,3 \pm 3,6$
	<i>B. megaterium</i>	$612,4 \pm 198,6$	$36,8 \pm 3,7$
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	$495,0 \pm 83,7$	$33,2 \pm 3,3$
Пшениця	Контроль + ^{137}Cs (без бактерій)	$101,8 \pm 12,5$	$4,8 \pm 0,5$
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	$273,8 \pm 28,8$	$17,2 \pm 2,6$
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	$349,6 \pm 87,1$	$21,7 \pm 7,4$
	<i>B. megaterium</i>	$302,5 \pm 75,8$	$18,0 \pm 2,0$
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	$71,7 \pm 12,0$	$4,1 \pm 1,0$

Таблиця 4
Модифікація коефіцієнта накопичення ^{137}Cs культурою мікроорганізмів

	Культура-інокулянт	Відношення K_n дослідних варіантів до контролю
Ріпак	без бактерій	1*
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	1,1
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	1,5
	<i>B. megaterium</i>	1,1
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	0,8
Пшениця	без бактерій	1*
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	2,7
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	3,4
	<i>B. megaterium</i>	3,0
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	0,7
Вика посівна	без бактерій	1*
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6003	1,0
	<i>A. chroococcum</i> УКМ В-6082	1,6
	<i>B. megaterium</i>	1,1
	<i>Agrobacterium radiobacter</i>	0,6
	<i>R. leguminosarum</i>	1,1

* – контроль, що був вирощений без бактерій, використовували як базу для порівняння

Питома активність граму повітряно-сухої біомаси є недостатньо репрезентативною характеристикою для аналізу модифікації переходу радіонукліда із субстрату в рослини. Тому вирішено обрахувати відносний показник модифікації K_n , порівнявши питому активність експериментальних рослин із питомою активністю контрольних.

Із отриманих даних (табл. 4) видно, що інокуляція майже всіма штамми збільшує перехід ^{137}Cs у рослини. Винятком став *Agrobacterium radiobacter*, який зменшував перехід радіонукліда в рослини в 1,2 рази при інокуляції ріпаку [4], в 1,4 рази при інокуляції пшениці та в 1,6 разів при інокуляції вики. Отже, можливим виявляється підбір таких штамів мікроорганізмів, застосування яких може зменшувати K_n ^{137}Cs із ґрунту в рослини. У той же час, *A. chroococcum* УКМ В-6082 збільшував накопичення радіонукліду в рослинах пшениці у 3,4 рази і в рослинах вики у 1,6 разів, а *A. chroococcum* УКМ

В-6003 збільшував накопичення ^{137}Cs в рослинах ріпаку в 1,5 разів. Це дає змогу стверджувати, що можливий підбір таких біопрепаратів, що могли б суттєво підвищувати накопичення радіонукліда рослинами, тим самим покращуючи їх здатність до фітодезактивації територій.

Роблячи підсумок, необхідно сказати, що ґрунтові мікроорганізми можуть як знижувати, так і підвищувати накопичення ^{137}Cs в біомасі рослин. У наведених вище дослідженнях вдалося показати, що дана властивість не залежить від локалізації мікроорганізму на поверхні кореня, адже всі проаналізовані бактерії належали до групи таких, що колонізують ризосферу рослини.

З літературних джерел відомо [5], що перехід радіонуклідів у рослини із ґрунту може залежати від наявності або відсутності ґрунтових мікроорганізмів, а саме, в даному випадку наявність мікроорганізмів стимулювала перехід радіонуклідів.

Висновки

Ґрунтові мікроорганізми можуть як знижувати, так і посилювати перехід ^{137}Cs із ґрунту в рослини. Ця властивість не залежить від локалізації мікроорганізмів на поверхні кореня, адже всі проаналізовані штами бактерій належали до групи таких, що колонізують ризосферу рослини.

Мікроорганізми-інокулянти при використанні на бідних елементах живлення ґрунтах прискорюють ріст рослин у довжину, що свідчить про покращення умов їхнього зростання.

В умовах польового дослідження інокуляція насіння ріпаку штамом *A. chroococcum* УКМ В-6082 забезпечила зниження K_n ^{137}Cs майже на 50 % порівняно з контролем. У досліджах із пшеницею достовірного зменшення накопичення ^{137}Cs не було.

Застосування комплексів препаратів на основі штамів бактерій *Agrobacterium*

radiobacter ІМВ В-7246 та *A. chroococcum* УКМ В-6082 для інокуляції насіння ріпаку й *Azotobacter chroococcum* УКМ В-6003, можна розглядати як додатковий радіозахисний спосіб блокування надходження ^{137}Cs у ці види сільськогосподарських рослин.

Викладені вище дані дозволяють зробити висновок, що вплив ґрунтових мікроорганізмів є опосередкованим, викликаним розкладом мікроорганізмами складної органіки, що міститься у ґрунті, в той час як безпосередній вплив може бути як позитивним, так і негативним. Очевидним є висновок про перспективність подальших досліджень у даній галузі з метою пошуку і адаптації до умов конкретного ґрунту таких штамів мікроорганізмів, які могли б знижувати (або, залежно від поставленої мети, підвищувати) перехід радіонуклідів у рослини.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Література

1. Dushenkov S. Trends in phytoremediation of radionuclides. *Plant and Soil*. Vol.249. Springer, February.03. C. 167–175. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1022527207359>
2. Гудков І. М. Радіобіологія: підручник: Херсон: Олді-Плюс, 2016. 504 с.
3. Gudkov I. N., Gaychenko, V. A., Yu Pareniuk, O., та ін. Changes in biocenoses in the Chernobyl NPP accident zone. *Ядерна фізика та енергетика*. 2011. Vol. 12, No. 4. C. 362–374. URL: http://jnpe.kinr.kiev.ua/12.4/Articles_PDF/jnpe-2011-12-0362-Gudkov.pdf
4. Zhu Y. G., Shaw, G. Soil contamination with radionuclides and potential remediation. *Chemosphere*. 2000. Vol. 41, No. 1–2. C. 121–128. URL: [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00398-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00398-7)
5. Ulanovsky A. Improved dosimetry for animals and plants What does the new ICRP draft publication bring? 2016. URL: <http://www.icrp.org/docs/2016aomori/5%20Ulanovsky.pdf>
6. Steinhäuser G., Brandl A., Johnson T. E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of The Total Environment*. 2014. Vol. 470–471. C. 800–817. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.029>
7. Vuong, H. V. The use of the integrated soil microcosms to assess accumulation of caesium (Cs) and lead (Pb) from contaminated soils by earthworms (*Eisenia andrei*) and the sunflower (*Helianthus annuus*): RMIT University, Melbourne, Australia. 138c. URL: <http://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:160596/Vuong.pdf>
8. Kizilova, a. K., Titova, L. V., Kravchenko, I. K., та ін. Evaluation of the diversity of nitrogen-fixing bacteria in soybean rhizosphere by nifH gene analysis. *Microbiology*. 2012. Vol. 81, No. 5. C. 621–629. URL: <https://doi.org/10.1134/S0026261712050116>
9. Lucy, M., Reed, E., R. Glick, B. Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2004. Vol. 86, No. 1. C. 1–25. URL: <https://doi.org/10.1023/B:ANTO.0000024903.10757.6e>
10. Song, N., Zhang, X., Wang, F., та ін. Elevated CO₂ increases Cs uptake and alters microbial communities and biomass in the rhizosphere of *Phytolacca americana* Linn (pokeweed) and *Amaranthus cruentus* L. (purple amaranth) grown on soils spiked with various levels of Cs. *Journal of environmental radioactivity*. 2012. Vol. 112. C. 29–37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.03.002>
11. Tang, S., Liao, S., Guo, J., та ін. Growth and cesium uptake responses of *Phytolacca americana* Linn. and *Amaranthus cruentus* L. grown on cesium contaminated soil to elevated CO₂ or inoculation with a plant growth promoting rhizobacterium *Burkholderia* sp. D54, or in combination. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 198. C. 188–197. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.029>
12. Khan, A. G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. Elsevier GmbH, 27.June.05. C. 355–364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.006>
13. White, C., Gadd, G. M. Biosorption of radionuclides by fungal biomass. *Journal of chemical technology and biotechnology* (Oxford, Oxfordshire: 1986). 1990. Vol. 49, No. 4. C. 331–43. URL: <https://doi.org/10.1002/jctb.280490406>
14. Aung, H. P., Djedidi, S., Yokoyama, T., та ін. Transfer of radiocesium to four cruciferous vegetables as influenced by organic amendment under different field conditions in Fukushima Prefecture. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 140. C. 148–155. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.11.015>
15. Pareniuk, O., Shavanova, K., Laceby, J. P., та ін. Modification of ¹³⁷Cs transfer to rape (*Brassica napus* L.) phytomass under the influence of soil microorganisms. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2015. Vol. 149. C. 73–80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.003>
16. Djedidi, S., Kojima, K., Ohkama-Ohtsu, N., та ін. Growth and ¹³⁷Cs uptake and accumulation among 56 Japanese cultivars of *Brassica rapa*, *Brassica juncea* and *Brassica napus* grown in a contaminated field in Fukushima: Effect of inoculation with a *Bacillus pumilus* strain. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 157. C. 27–37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.024>
17. Pareniuk, O. J., Moshynets, O. V., Tytova, L. V., та ін. Qualitative composition of dominating forms of microorganisms isolated from radionuclide contaminated soil and their ability to accumulate ¹³⁷Cs. *Microbiol. J*. 2013. Vol. 75, No. 1. C. 33–40.
18. Takeda, A., Tsukada, H., Nakao, A., та ін. Time-dependent changes of phytoavailability of Cs added to allophanic Andosols in laboratory cultivations and extraction tests. *Journal of environmental radioactivity*. 2013. Vol. 122. C. 29–36. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.02.005>
19. Ghosh, A., Sharma, A., Talukder, G. Effects of cesium on cellular systems. *Biological trace element research*. 1993. Vol. 38, No. 2. C. 165–203. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02784052>
20. Гудков, І. М., Вінничук, М. М. Сільськогосподарська радіобіологія: Житомир: ДАУ, 2003. 472с.

21. Beresford, N. A., Smith, J. T. Application of countermeasures: Chernobyl — Catastrophe and Consequences. Springer Berlin Heidelberg. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-28079-0_5
22. International Organization of Standardization (ISO). ISO 20042:2019 - Measurement of radioactivity. Gamma-ray emitting radionuclides. Generic test method using gamma-ray spectrometry. 2019. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20042:ed-1:v1:en>
23. Phillips, G. C., Garda, M. Plant tissue culture media and practices: an overview. Springer New York LLC, 2019. 242–257 p. URL: <https://doi.org/10.1007/s11627-019-09983-5>
24. Nikitin, A. N., Cheshyk, I. A., Gutseva, G. Z., та ін. Impact of effective microorganisms on the transfer of radioactive cesium into lettuce and barley biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 192. C. 491–497. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>
25. ASTM International. ASTM E181-98, Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides / West Conshohocken, PA: 1998. URL: <https://doi.org/10.1520/E0181-98>

References

1. Dushenkov, S. (2003). Trends in phytoremediation of radionuclides. *Plant and Soil*, 249(1), 167–175. <https://doi.org/10.1023/A:1022527207359>
2. Gudkov, I.M. (2016). Radiobiology: a textbook. Kherson: Oldie Plus. (In Ukrainian).
3. Gudkov, I.N., Gaychenko, V. A., Yu Pareniuk, O. & Grodzinsky, D. M. (2011). Changes in biocenoses in the Chernobyl NPP accident zone. *Nuclear physics and energy*, 12(4), 362–374. Retrieved from http://jnpae.kinr.kiev.ua/12.4/Articles_PDF/jnpae-2011-12-0362-Gudkov.pdf
4. Zhu, Y.G., & Shaw, G. (2000). Soil contamination with radionuclides and potential remediation. *Chemosphere*, 41(1–2), 121–128. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00398-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00398-7)
5. Ulanovsky, A. (2016). Improved dosimetry for animals and plants What does the new ICRP draft publication bring? Retrieved from <http://www.icrp.org/docs/2016aomori/5%20Ulanovsky.pdf>
6. Steinhäuser, G., Brandl, A., & Johnson, T. E. (2014). Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 470–471, 800–817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.029>
7. Vuong, H. V. (2013). The use of the integrated soil microcosms to assess accumulation of caesium (Cs) and lead (Pb) from contaminated soils by earthworms (Eisenia andrei) and the sunflower (Helianthus annuus) (RMIT University, Melbourne, Australia.). Retrieved from <http://researchbank.rmit.edu.au/eserv/rmit:160596/Vuong.pdf>
8. Kizilova, A. K., Titova, L. V., Kravchenko, I. K., & Iutinskaya, G. A. (2012). Evaluation of the diversity of nitrogen-fixing bacteria in soybean rhizosphere by nifH gene analysis. *Microbiology*, 81(5), 621–629. <https://doi.org/10.1134/S0026261712050116>
9. Lucy, M., Reed, E., & R. Glick, B. (2004). Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek*, 86(1), 1–25. <https://doi.org/10.1023/B:ANTO.0000024903.10757.6e>
10. Song, N., Zhang, X., Wang, F., Zhang, C., & Tang, S. (2012). Elevated CO₂ increases Cs uptake and alters microbial communities and biomass in the rhizosphere of *Phytolacca americana* Linn (pokeweed) and *Amaranthus cruentus* L. (purple amaranth) grown on soils spiked with various levels of Cs. *Journal of Environmental Radioactivity*, 112, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.03.002>
11. Tang, S., Liao, S., Guo, J., Song, Z., Wang, R., & Zhou, X. (2011). Growth and cesium uptake responses of *Phytolacca americana* Linn. and *Amaranthus cruentus* L. grown on cesium contaminated soil to elevated CO₂ or inoculation with a plant growth promoting rhizobacterium *Burkholderia* sp. D54, or in combination. *Journal of Hazardous Materials*, 198, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.029>
12. Khan, A. G. (2005). Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.006>
13. White, C., & Gadd, G. M. (1990). Biosorption of radionuclides by fungal biomass. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Oxford, Oxfordshire: 1986), 49(4), 331–343. <https://doi.org/10.1002/jctb.280490406>
14. Aung, H. P., Djedidi, S., Yokoyama, T., Suzuki, S., & Bellingrath-Kimura, S. D. (2015). Transfer of radiocesium to four cruciferous vegetables as influenced by organic amendment under different field conditions in Fukushima Prefecture. *Journal of Environmental Radioactivity*, 140, 148–155. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.11.015>
15. Pareniuk, O., Shavanova, K., Laceby, J. P., Illienko, V., Tytova, L., Levchuk, S., ... Nanba, K. (2015). Modification of ¹³⁷Cs transfer to rape (*Brassica napus* L.) phytomass under the influence of soil

- microorganisms. *Journal of Environmental Radioactivity*, 149, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.07.003>
16. Djedidi, S., Kojima, K., Ohkama-Ohtsu, N., Bellingrath-Kimura, S. D., & Yokoyama, T. (2016). Growth and ¹³⁷Cs uptake and accumulation among 56 Japanese cultivars of Brassica rapa, Brassica juncea and Brassica napus grown in a contaminated field in Fukushima: Effect of inoculation with a Bacillus pumilus strain. *Journal of Environmental Radioactivity*, 157, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.024>
 17. Pareniuk, O. J., Moshynets, O. V., Tytova, L. V., & Levchuk, S. E. (2013). Qualitative composition of dominating forms of microorganisms isolated from radionuclide contaminated soil and their ability to accumulate ¹³⁷Cs. *Microbiol. J.*, 75(1), 33–40.
 18. Takeda, A., Tsukada, H., Nakao, A., Takaku, Y., & Hisamatsu, S. (2013). Time-dependent changes of phytoavailability of Cs added to allophanic Andosols in laboratory cultivations and extraction tests. *Journal of Environmental Radioactivity*, 122, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.02.005>
 19. Ghosh, A., Sharma, A., & Talukder, G. (1993). Effects of cesium on cellular systems. *Biological Trace Element Research*, 38(2), 165–203. <https://doi.org/10.1007/BF02784052>
 20. Gudkov, I.M. & Vinnychuk, M.M. (2003). Agricultural radiobiology. Zhytomyr: DAU. (In Ukrainian).
 21. Beresford, N. A., & Smith, J. T. (n.d.). Application of countermeasures. In Chernobyl — Catastrophe and Consequences (pp. 191–215). https://doi.org/10.1007/3-540-28079-0_5
 22. International Organization of Standardization (ISO). (2019). ISO 20042:2019 - Measurement of radioactivity. Gamma-ray emitting radionuclides. Generic test method using gamma-ray spectrometry. In International Standard. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:20042:ed-1:v1:en>
 23. Phillips, G. C., & Garda, M. (2019). Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant*, 55, 242–257. <https://doi.org/10.1007/s11627-019-09983-5>
 24. Nikitin, A. N., Cheshyk, I. A., Gutseva, G. Z., Tankevich, E. A., Shintani, M., & Okumoto, S. (2018). Impact of effective microorganisms on the transfer of radioactive cesium into lettuce and barley biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*, 192, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>
 25. ASTM International. (1998). ASTM E181-98, Standard Test Methods for Detector Calibration and Analysis of Radionuclides. <https://doi.org/10.1520/E0181-98>

Надійшла: 10.10.2010

Прийнято: 20.10.2020