

ISSN 1029-8940 (Print)
 ISSN 2524-230X (Online)
 УДК 581.557.24:577.34
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Поступила в редакцию 15.05.2024
 Received 15.05.2024

А. Н. Никитин^{1,2}, О. А. Шуранкова¹, Е. А. Танкевич¹

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ СЕМЯН ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ МИКОРИЗОБРАЗУЮЩИМИ ГРИБАМИ РОДА *GLOMUS* НА НАКОПЛЕНИЕ ¹³⁷Cs ВЕГЕТАТИВНЫМИ ОРГАНАМИ РАСТЕНИЙ

Аннотация. Испытания ядерного оружия, штатные и аварийные выбросы радионуклидов объектами ядерного топливного цикла, с одной стороны, и продолжительный период полураспада ¹³⁷Cs, с другой стороны, привели к значительному накоплению этого радиоактивного изотопа в объектах окружающей среды на обширных территориях, что оказало негативное воздействие на состояние биоты и здоровье населения. Поиск эффективных способов ограничения перехода радионуклидов в пищевые цепи и ремедиации загрязненных территорий остается актуальной задачей. Одним из факторов, влияющих на переход ¹³⁷Cs из почвы в растения, является микробиом почвы. Основная гипотеза данной работы состоит в том, что развитие арбускулярной микоризы (АМ) на корневых системах растений приводит к повышению доступности изотопов цезия для корневого поглощения и увеличивает их накопление в подземных и надземных частях растений. В связи с этим цель работы – выявить роль АМ в корневом поступлении ¹³⁷Cs из почвы в модельное растение.

Эксперимент поставлен в условиях микровегетационного опыта, для проведения которого в качестве модельного растения был выбран ячмень обыкновенный сорта Бурштын. Микоризацию корневой системы осуществляли с использованием инокулянта MycoApply SuperConcentrate. Результаты эксперимента позволили впервые показать связь между параметрами накопления и распределения ¹³⁷Cs в растениях ячменя с уровнем развития АМ в корневой системе растения. Развитие микоризной инфекции в корневой системе ячменя привело к росту коэффициента накопления ¹³⁷Cs в надземных органах ячменя в 1,8–2,6 раз по сравнению с контролем. При этом наблюдается тенденция к снижению удельной активности радионуклида в корневой системе.

Ключевые слова: арбускулярная микориза, ячмень обыкновенный, почва, цезий-137, коэффициент накопления, коэффициент транслокации

Для цитирования: Никитин, А. Н. Влияние обработки семян ярового ячменя микоризообразующими грибами рода *Glomus* на накопление ¹³⁷Cs вегетативными органами растений / А. Н. Никитин, О. А. Шуранкова, Е. А. Танкевич // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя біялагічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 31–39. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Aleksander N. Nikitin^{1,2}, Olga A. Shurankova¹, Elena A. Tankevich¹

¹Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF SPRING BARLEY SEED TREATMENT WITH MYCORRHIZA-FORMING FUNGI OF THE GENUS *GLOMUS* ON ¹³⁷Cs ACCUMULATION IN THE VEGETATIVE ORGANS OF THE PLANTS

Abstract. Tests of nuclear weapons, routine and accidental releases of radionuclides from nuclear fuel cycle facilities, on one hand, and the long half-life decay time of ¹³⁷Cs have led to significant levels of accumulation of this radioactive isotope in environmental objects in vast territories, which can have a negative impact on biota and public health. The search for effective methods to limit the transfer of radionuclides into food chains and remediate contaminated areas remains a pressing issue. One of the factors influencing the transfer of ¹³⁷Cs from soil to plants is soil microbiom. The main hypothesis of this study is that developing arbuscular mycorrhiza on plant root systems leads to increasing the availability of cesium isotopes for root absorption and enhances their accumulation in underground and aboveground parts of plants. Therefore, the aim of this study was to determine the significance of arbuscular mycorrhiza in the root uptake of ¹³⁷Cs from soil into a model plant.

The vegetative experiment was conducted with barley variety Burshtyn chosen as a model plant. Mycorrhization of the root system was performed using the MycoApply SuperConcentrate inoculant. The results of the experiment allowed for the first time to demonstrate the relationship between accumulation and distribution parameters of ¹³⁷Cs in barley plants with the level of arbuscular mycorrhiza development in the plant root system. Developing mycorrhizal infection in the barley root sys-

tem increased the transfer factor of ^{137}Cs from soil to the aboveground organs of barley 1.8–2.6 times compared to the control. At the same time, there is a tendency towards a decrease in the activity concentration of the radionuclide in the root system.

Keywords: arbuscular mycorrhiza, barley, soil, cesium-137, transfer factor, translocation factor

For citation: Nikitin A. N., Shurankova O. A., Tankevich E. A. Influence of spring barley seed treatment with mycorrhiza-forming fungi of the genus *Glomus* on ^{137}Cs accumulation in the vegetative organs of the plants. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 31–39 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2025-70-1-31-39>

Введение. В зависимости от химических и физических свойств радионуклидов, характера выброса в окружающую среду, особенностей поведения в почвенно-растительном комплексе и экологических условий, интенсивность их перехода из почвы в растения может изменяться в довольно широких пределах. Понимание механизмов накопления радионуклидов различными видами растений важно не только для развития радиоэкологии и обеспечения радиационной безопасности населения, но и для разработки новых методов ремедиации загрязненных территорий [1].

Почва – мощный сорбент радиоактивных продуктов деления урана, а ее характеристики во многом определяют поведение отдельных радионуклидов в экосистемах. При корневом поступлении радиоактивных изотопов цезия (RCs) в растения основными факторами, которые лимитируют интенсивность накопления, являются состав почвенного раствора и концентрация в нем радионуклида [2]. В частности, существенное влияние на поведение RCs в системе «почва-растение» оказывает содержание в почвенном растворе катионов калия.

Почвенные микроорганизмы оказывают заметное влияние на характеристики почвы, а также активно взаимодействуют с корневыми системами растений, что не может не отражаться на накоплении RCs последними. Микоризация корневой системы может быть фактором усиления или ослабления накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs растениями [3]. Отношение между иммобилизацией и мобилизацией зависит от радионуклида, вида микроорганизма, физико-химических условий среды. В литературе [4–6] описано несколько механизмов взаимодействия микроорганизмов с радионуклидами: биосорбция, биоаккумуляция, биотрансформация, биоминерализация и микробиологически-усиленная хемосорбция. Значительное воздействие на поведение RCs в системе «почва-растение» оказывают грибы. Многие из них замедляют скорость вертикальной миграции RCs, связывая их в своей биомассе [1].

Ассоциация арбускулярной микоризы (АМ) с корневой системой высших растений является, вероятно, одним из самых распространенных в природе видов симбиоза [7, 8]. Около 80 % видов покрытосеменных растений способны к формированию ассоциации с АМ. С одной стороны, симбиоз с АМ позволяет им улучшать рост на почвах, бедных элементами питания, также микориза усиливает накопление растениями фосфора, меди, никеля и цинка [9, 10]. С другой – микроорганизмы ризосферы потребляют органические вещества, которые выделяют растения (включая токсичные отходы жизнедеятельности), а также предупреждают заражение болезнями и вредителями [11]. Функциональные группы на клеточных стенках грибов (амино-, гидроксил-, карбоксил- и другие группы) могут фиксировать ионы и комплексы потенциально токсичных элементов (Cu, Pb, Cd и др.), снижая их биологическую доступность. В ряде работ показано, что АМ может ограничивать поступление высоких концентраций тяжелых металлов в растения [10].

На примере *Plantago lanceolata*, *Medicago truncatula*, *Lolium perenne* показано, что колонизация корневых систем грибом *Glomus intraradices*, образующим эндомикоризу, приводит к существенному уменьшению аккумуляции ^{134}Cs в надземных органах растений [12]. Накопление радионуклида подземными органами в присутствии микоризообразующих грибов либо не имело существенных различий (*P. lanceolata*) по сравнению с растениями без симбиоза, либо усиливалось при микоризации (*M. truncatula*), либо ослаблялось (*L. perenne*). Отношение активности радионуклида в подземных частях к надземным увеличивалось при микоризации корневой системы. В отличие от предыдущих трех видов *Helianthus annuus* отвечал почти десятикратным усилением аккумуляции ^{134}Cs надземными и подземными органами при микоризации корневой системы.

В кратковременном эксперименте с заражением саженцев вереска (*Calluna vulgaris*) инокулянт микоризообразующих грибов наблюдалось снижение накопления в них ^{137}Cs [13]. Однако при этом усилилась транслокация радионуклида из корней в надземные органы.

Таким образом, к настоящему времени установлено, что АМ может значимо влиять на накопление RCs сосудистыми растениями. Однако собранные экспериментальные данные носят фрагментарный и нередко противоречивый характер. Принимая во внимание возможность использования АМ для управления накоплением радионуклидов растениями, целесообразно проводить исследования, направленные на раскрытие закономерностей воздействия микоризообразующих грибов на накопление и перераспределение RCs в сосудистых растениях.

Целью настоящей работы стало выявление зависимости параметров накопления ^{137}Cs модельным злаковым растением от степени развития АМ в его корневой системе.

Объекты и методы исследования. Изучение особенностей корневого поступления ^{137}Cs в растения в зависимости от степени микоризации их корневой системы осуществлялось путем проведения микровегетационного опыта. Модельная культура – ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare*) сорта Бурштын. В качестве источника микоризообразующих грибов использовался инокулянт MусоApply SuperConcentrate, включающий споры четырех видов грибов, образующих АМ: *Glomus intraradices*, *G. mosseae*, *G. aggregatum* и *G. etunicatum*.

Для эксперимента была взята почва минерального происхождения, отобранная в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС, с высоким содержанием техногенных радионуклидов в смеси с торфогрунтом для выращивания рассады в пропорции 1:1. Степень кислотности субстрата, использованного в эксперименте, была близка к нейтральной (рН = 6,94–7,09), содержание кальция – высокое (1628–1651 мг/кг), магния – среднее (122–132 мг/кг). Субстрат имел очень высокое содержание органического вещества (5,42–5,86 %), подвижных форм фосфора (265–306 мг/кг) и очень низкое – подвижного калия (64–82 мг/кг).

Проросшие семена ячменя высевались в специальные контейнеры для выращивания растений объемом 4,5 л, заполненные заранее приготовленным увлажненным субстратом, в количестве 50 шт/контейнер. Сразу после посадки на поверхность субстрата вносился инокулянт MусоApply SuperConcentrate. В зависимости от его дозы эксперимент включал четыре варианта:

1. Контроль (без обработки инокулянтом).
2. 1 мг/50 семян (соответствует рекомендованной дозе обработки).
3. 7,5 мг/50 семян (сверхоптимальная доза обработки).
4. 15 мг/50 семян (сверхоптимальная доза обработки).

Выращивание растений осуществлялось в помещении с регулируемыми условиями при температуре 18 °С, продолжительности светового дня 16 ч (поток фотосинтетически активной радиации (ФАР) $100 \text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$) и оптимальном режиме почвенного увлажнения на протяжении 37 сут. Внешний вид растений на момент окончания эксперимента представлен на рис. 1.

По завершении периода выращивания надземные органы ячменя срезались. Затем извлекались корневые системы, которые тщательно очищались от остатков субстрата механически и кратковременным вымыванием в дистиллированной воде. Определялись биометрические показатели растений. Отбирались образцы корней для оценки степени микоризации. Надземные и подземные органы растений высушивались до воздушно-сухого состояния для дальнейшего анализа на содержание техногенных радионуклидов. Из каждого контейнера отбирался образец субстрата для измерения удельной активности ^{137}Cs . Перед измерением он высушивался до воздушно-сухого состояния и просеивался через сито с размером ячейки 2 мм.

Оценка содержания ^{137}Cs в отобранных образцах почвы и растений была проведена с использованием гамма-спектрометрического комплекса CANBERRA с германиевым детектором GX2018, геометрия «дента», ошибка измерения – не более 5 %. Коэффициент накопления (K_n) радионуклида рассчитывался как отношение его удельной активности в органах растений (Бк/кг) к удельной активности в субстрате (Бк/кг). Коэффициент транслокации (K_T , безразмерная величина) рассчитывался как отношение удельной активности радионуклида в надземных органах ($A_y^{\text{надз.}}$) к его удельной активности в подземных органах ($A_y^{\text{подз.}}$). Вынос радионуклида в надземные органы рассчитывался для каждого контейнера как отношение общей активности ^{137}Cs в надземных органах ($A^{\text{надз.}}$) к общей его активности в почвенном субстрате ($A^{\text{почв.}}$), умноженное на 100 %.

Оценку интенсивности микоризообразования проводили с использованием исследовательского микроскопа проходящего света PZO (Польша) по методу А. Trouvelot с соавт. [14]. Рассчитывались встречаемость (F, %) и интенсивность (M, %) микоризной инфекции в корневой системе.

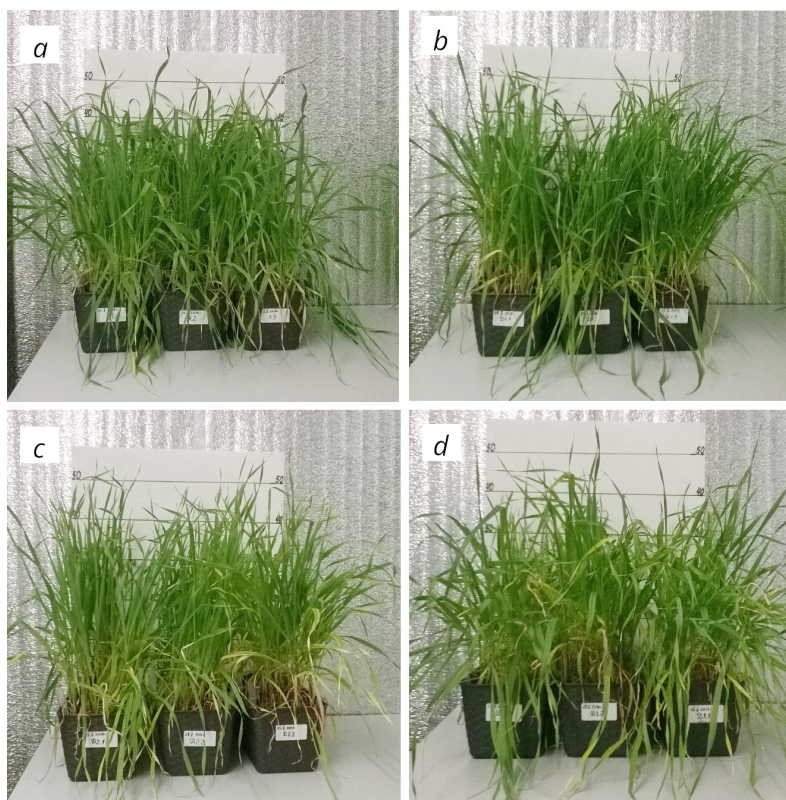


Рис. 1. Внешний вид растений ячменя при различных дозах обработки инокулянтom микорризообразующих грибов на момент окончания вегетационного опыта: *a* – контроль; *b* – 1 мг/50 семян; *c* – 7,5 мг/50 семян; *d* – 15 мг/50 семян

Fig. 1. Visual representation of barley plants at different doses of inoculation with mycorrhizal fungi at the end of the vegetation experiment: *a* – control; *b* – 1 mg/50 seeds; *c* – 7.5 mg/50 seeds; *d* – 15 mg/50 seeds

При анализе интенсивности микорризообразования использовались медиана, верхний и нижний квартили. При анализе биометрических показателей модельного растения и параметров накопления в нем ^{137}Cs применялись среднее арифметическое и стандартное отклонение, для оценки значимости различий с контролем – *t*-критерий Стьюдента. Решение о статистической значимости различий принималось при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Применение инокулянта MycoApply SuperConcentrate способствовало развитию микорризной инфекции в корневой системе ячменя. При этом существенных отличий в ее встречаемости между вариантами опыта с различными дозами препарата не наблюдалось (табл. 1). Медианное значение интенсивности микорризной инфекции возрастало от 0 до 2,4 с увеличением дозы инокулянта от 0 до 7,5 мг на 50 семян. Однако дальнейшее увеличение дозы биологического препарата не приводило к росту интенсивности микорризной инфекции. Следует отметить, что продолжительность вегетационного опыта составила 37 сут, что может быть причиной недостаточно выраженных различий в степени микорризации корневой системы между различными вариантами эксперимента.

Таблица 1. Оценка встречаемости и интенсивности микорризной инфекции в корневой системе ячменя, %

Table 1. Assessment of the occurrence and intensity of mycorrhizal infection in the root system of barley, %

Доза инокулянта	Встречаемость	Интенсивность
Контроль	0,0 (0,0–0,2)	0,0 (0,0–0,1)
1 мг/50 семян	4,9 (3,2–6,1)	0,3 (0,0–0,8)
7,5 мг/50 семян	5,1 (3,0–7,1)	2,4 (0,3–4,9)
15 мг/50 семян	5,0 (3,2–7,3)	1,6 (0,2–2,4)

Примечание. Данные представлены в формате «медиана (нижний квартиль–верхний квартиль)».

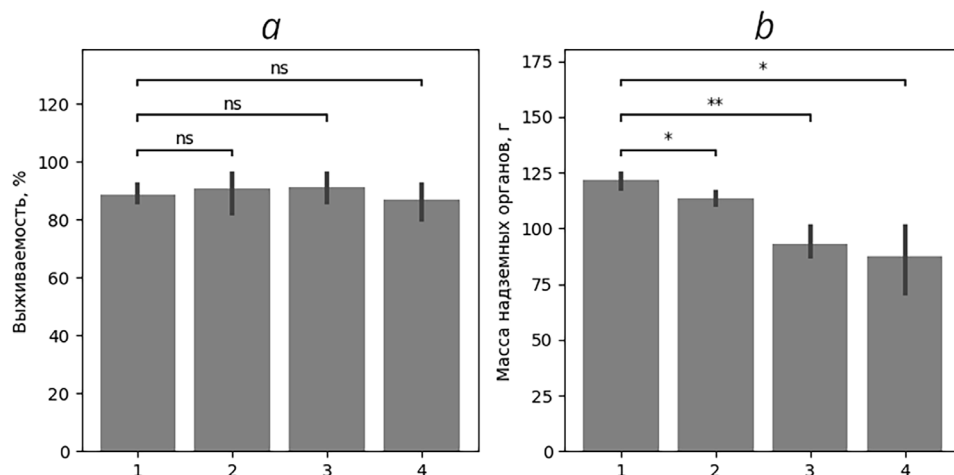


Рис. 2. Влияние дозы внесения инокулянта на выживаемость (а) и массу надземных органов (б) ячменя: 1 – контроль; 2 – доза 1 мг/50 семян; 3 – 7,5 мг/50 семян; 4 – 15 мг/50 семян; * – различия достоверны на уровне значимости 0,05; ** – различия достоверны на уровне значимости 0,01; ns — различия недостоверны

Fig. 2. Effects of inoculant dosage on barley survival (a) and aboveground biomass (b): 1 – control; 2 – dosage 1 mg/50 seeds; 3 – 7.5 mg/50 seeds; 4 – 15 mg/50 seeds; * – significant differences at the 0.05 level; ** – significant differences at the 0.01 level; ns – non-significant differences

Анализ биометрических показателей растений ячменя в различных вариантах опыта показал, что на фоне высокой обеспеченности растений фосфором, кальцием и магнием рекомендованная доза обработки почвы инокулянтом микоризообразующих грибов не вызывает достоверных изменений выживаемости (рис. 2, а), но несколько снижает массу надземных частей растений (рис. 2, б). Обработка семян ячменя повышенными дозами инокулянта микоризообразующих грибов (7,5 и 15 мг на 50 семян) приводит к существенному снижению массы надземных органов (на 23–28 %). Подобное явление можно объяснить тем, что при сверхоптимальной степени микоризации корневых систем значительная часть органических веществ, образуемых в процессе фотосинтеза, расходуется на рост и поддержание жизнедеятельности микоризообразующих грибов. При отсутствии заметного дефицита элементов минерального питания в почве (кроме калия) положительное влияние микоризы на растение нивелируется и мутуалистические приобретают форму паразитических. Об этом свидетельствует и закономерное снижение концентрации калия в надземных органах ячменя: от 7,4 % в контроле (в пересчете на воздушно-сухой вес) до 6,2 % при максимальной дозе пропагул микоризообразующих грибов (хотя различия между контрольным и экспериментальным вариантом статистически недостоверны).

По имеющимся оценкам, микориза потребляет 10–20 % органического вещества, которое создает растение, взамен обеспечивает ему более благоприятные условия минерального питания. В работе S. E. Smith, D. J. Read [15] отмечается, что в мутуалистических отношениях растения с микоризообразующим грибом существует тонкий баланс между выгодой за счет улучшения минерального питания и потерями от затрат синтезированного органического вещества на поддержание жизнедеятельности гетеротрофного партнера. В большинстве случаев растение выигрывает от лучшей обеспеченности фосфором, который находится в почве в труднодоступном состоянии. Чем выше обеспеченность растения доступными формами макро- и микроэлементов, тем меньше выгода от микоризы.

Содержание ^{137}Cs в почвенном субстрате составляло 5,35–5,88 кБк/кг и несущественно отличалось между контейнерами. Однако накопление данного радионуклида в органах ячменя имело заметные различия между вариантами опыта (рис. 3). Наиболее высокое среднее содержание ^{137}Cs в подземных органах наблюдалось в контроле, достигая почти 5 кБк/кг. Во всех вариантах с обработкой микоризообразующими грибами средняя удельная активность радионуклида в подземных органах ячменя была на 27–37 % ниже. Однако ввиду высокой вариабельности данного показателя различия между вариантами статистически незначимы.

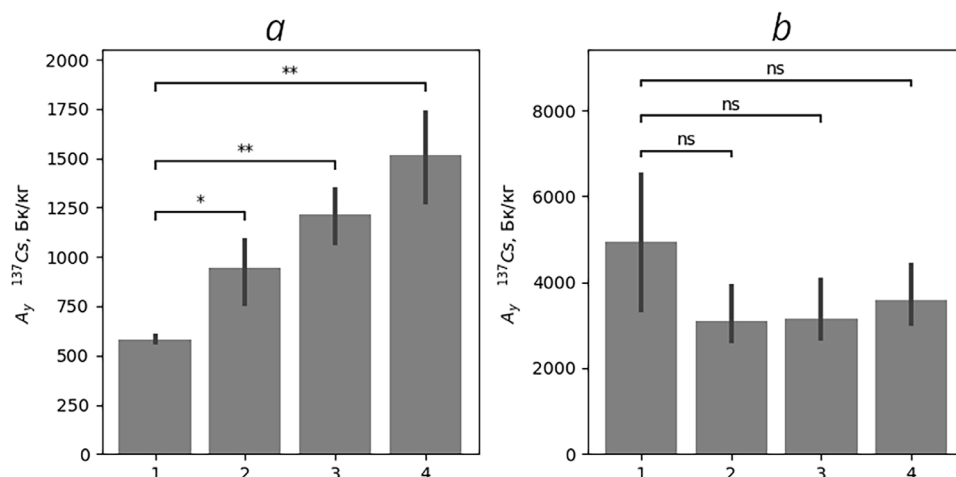


Рис. 3. Влияние дозы внесения инокулянта на удельную активность ¹³⁷Cs в надземных (а) и подземных (б) органах ячменя: 1 – контроль; 2 – доза 1 мг/50 семян; 3 – 7,5 мг/50 семян; 4 – 15 мг/50 семян; * – различия достоверны на уровне значимости 0,05; ** – различия достоверны на уровне значимости 0,01; ns – различия недостоверны

Fig. 3. Effect of inoculant dosage on the activity concentration of ¹³⁷Cs in aboveground (a) and underground (b) organs of barley: 1 – control; 2 – dosage 1 mg/50 seeds; 3 – 7.5 mg/50 seeds; 4 – 15 mg/50 seeds; * – significant differences at the 0.05 level; ** – significant differences at the 0.01 level; ns – non-significant differences

В отношении надземных органов ячменя прослеживалась четкая закономерность повышения удельной активности ¹³⁷Cs по мере увеличения дозы обработки микоризообразующим препаратом. Если в контроле данный показатель составлял $583,0 \pm 30,1$ Бк/кг, то уже при минимальной дозе он стал выше на 62 %, а при максимальной – разница с контролем составляла 160 %. Полученные результаты указывают на то, что внесение на поверхность почвы пропагул микоризообразующих грибов усиливает накопление ¹³⁷Cs чернобыльского происхождения в надземных органах ячменя.

K_n^{137Cs} надземными органами ячменя в микровегетационном эксперименте составил 0,101–0,267, а подземными – 0,569–0,886 (табл. 2). Микоризация корневых систем ячменя приводит к дозозависимому увеличению K_n^{137Cs} в надземных органах растения. В варианте с максимальной дозой обработки микоризообразующими грибами накопление ¹³⁷Cs происходит почти в 2,5 раза более интенсивно по сравнению с контролем. Однако в отношении подземных органов данная закономерность не сохраняется. Здесь максимальное значение K_n выявлено в контрольном варианте. Обработка пропагулами микоризообразующих грибов снижает накопление ¹³⁷Cs почти на 30 %, причем данный эффект не зависит от дозы.

Т а б л и ц а 2. Параметры накопления ¹³⁷Cs в надземных и подземных органах ячменя

Table 2. Indexes of ¹³⁷Cs accumulation in aboveground and underground organs of barley

Доза инокулянта	K_n , надземные органы	K_n , подземные органы	K_t	Вынос в надземные органы, %
Контроль	0,101 ± 0,021	0,886 ± 0,429	0,126 ± 0,043	0,21 ± 0,09
1 мг/50 семян	0,181 ± 0,022	0,600 ± 0,150	0,310 ± 0,057	0,35 ± 0,11
7,5 мг/50 семян	0,218 ± 0,028	0,569 ± 0,154	0,397 ± 0,098	0,35 ± 0,15
15 мг/50 семян	0,267 ± 0,067	0,617 ± 0,054	0,441 ± 0,141	0,41 ± 0,13

K_t радионуклида указывает на интенсивность его транспорта из корневой системы к побегам. Анализ полученных данных показал, что обработка семян ячменя пропагулами микоризообразующих грибов приводит к закономерному увеличению K_t от 0,126 в контроле до 0,441 в варианте с максимальной дозой. Полученные результаты свидетельствуют о том, что микоризация корневой системы стимулирует перенос ¹³⁷Cs от корневой системы к листовому аппарату, что приводит к существенному увеличению удельной активности радионуклида в последнем. При этом наблюдается тенденция к снижению уровня содержания радионуклида в подземных органах.

Вынос ^{137}Cs из почвенного субстрата в надземные органы ячменя в контрольном варианте составил 0,21 %. Рекомендуемая доза обработки препаратом микоризообразующих грибов приводит к увеличению данного показателя в 1,7 раз. Хотя максимальный вынос ^{137}Cs надземной фитомассой наблюдается в варианте с дозой внесения 15 мг/50 семян, разница с эффектом от дозы 1 мг/50 семян незначительна.

Анализ результатов данного исследования свидетельствует о том, что АМ является значимым фактором, регулирующим поступление RCs в растения. Поэтому углубление знаний о значении симбиотических микоризообразующих грибов в корневом поступлении техногенных радионуклидов и раскрытие механизмов данного явления позволит предложить новые подходы к реабилитации загрязненных территорий.

Долгоживущие RCs в случае радиационных аварий часто являются основными дозообразующими радионуклидами, ограничивающими нормальную жизнедеятельность на обширных территориях. Основным их депо в наземных экосистемах является почва. До настоящего времени отсутствуют экономически и экологически обоснованные технологии очищения почвы от RCs. В качестве одного из наиболее перспективных подходов рассматривается фитоэкстракция – накопление радионуклидов из почвы в надземных органах растений с последующей их безопасной утилизацией [16]. Однако относительный вынос RCs в фитомассу невелик и уменьшается с течением времени после радиоактивных выпадений. Усиление перехода ^{137}Cs и других радиоактивных изотопов в растения посредством развития в их корневой системе АМ может существенно повысить эффективность фитоэкстракции.

Полученный результат также важно учитывать при ведении растениеводства на почвах, загрязненных RCs. Использование микробных удобрений, в состав которых входят грибы, образующие АМ, может привести к существенному повышению содержания радионуклида в урожае.

Заключение. В условиях вегетационного опыта показано существенное усиление накопления радиоактивного изотопа ^{137}Cs надземными частями ячменя при увеличении интенсивности инфекции АМ в корневой системе растения. Микоризация корневой системы ячменя посевного посредством внесения на поверхность почвы инокулянта MusoApply SuperConcentrate в дозах от 2 до 30 мг/100 семян увеличивает K_n ^{137}Cs надземными вегетативными органами растения на 80–165 % относительно контроля. Интенсивность поглощения радионуклида надземными частями растения имеет прямую связь с дозой обработки инокулянтом. K_t ^{137}Cs и вынос радионуклида из почвы в надземные органы также значительно возрастают по мере увеличения дозы обработки инокулянтом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ Б16К-053.

Acknowledgements. The work was supported by grant BRFFR B16K-053.

Список использованных источников

1. Steiner, M. The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems / M. Steiner, I. Linkov, S. Yoshida // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 58. – N 2–3. – P. 217–241. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00067-4)
2. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Н. И. Санжарова, А. А. Сысоева, Н. Н. Исамов [и др.] // *Российский химический журнал*. – 2005. – Т. 49, № 3. – С. 26–34.
3. Ehlken, S. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review / S. Ehlken, G. Kirchner // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 58, N 2–3. – P. 97–112. [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(01)00060-1)
4. Лукьянова, Е. А. Микроорганизмы глубинных хранилищ жидких радиоактивных отходов и взаимодействие их с радионуклидами: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.07 / Лукьянова Евгения Александровна; Ин-т микробиологии Рос. акад. наук. – М., 2008. – 26 с.
5. Lloyd, J. Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies / J. R. Lloyd, J. C. Renshaw // *Current Opinion in Biotechnology*. – 2005. – Vol. 16, N 3. – P. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.04.012>
6. Keith-Roach, M. J. Chapter 13 Microbial interactions with radionuclides – summary and future perspectives / M. J. Keith-Roach, F. R. Livens // *Radioactivity in the Environment*. – 2002. – Vol. 2. – P. 383–390. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(02\)80042-0](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(02)80042-0)

7. Habte, M. Mycorrhizal fungi and plant nutrition / M. Habte // *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture* / eds.: J. Silva, R. Uchida. – Manoa, U.S.A., 2000. – P. 127–131.
8. Pal, S. Arbuscular mycorrhiza: Useful tool for heavy metal bioremediation / S. Pal // *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 4, N 4. – P. 379–399.
9. Zhu, Y. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil / Y. Zhu, P. Christie, A. S. Laidlaw // *Chemosphere*. – 2001. – Vol. 42, N 2. – P. 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00125-9)
10. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation / A. G. Khan, C. Kuek, T. M. Chaudhry [et al.] // *Chemosphere*. – 2000. – Vol. 41, N 1–2. – P. 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00412-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00412-9)
11. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction / M. Rajkumar, N. Ae, M. Narasimha [et al.] // *Trends in Biotechnology*. – 2010. – Vol. 28, N 3. – P. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>
12. Dubchak, S. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in ^{134}Cs uptake by crop and wild plant species / S. Dubchak // *Environmental Sciences*. – 2015. – Vol. 8, N 1. – P. 175–184.
13. Clint, G. M. Uptake and accumulation of radiocaesium by mycorrhizal and non-mycorrhizal heather plants / G. M. Clint, J. Dighton // *New Phytologist*. – 1992. – Vol. 121, N 4. – P. 555–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01125.x>
14. Trouvelot, A. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systbme racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae* / ed. G. S. Gianinazzi-Pearson V. – Paris, 1986. – P. 217–221.
15. Smith, S. E. Mycorrhizal symbiosis / S. E. Smith, D. J. Read. – 2nd ed. – San Diego [et al.]: Academic Press, 1997. – 605 p.
16. Lasat, M. M. Potential for phytoextraction of ^{137}Cs from a contaminated soil / M. M. Lasat, W. Norvell, L. V. Kochian // *Plant and Soil*. – 1997. – Vol. 195, N 1. – P. 99–106. <https://doi.org/10.1023/A:1004210110855>

References

1. Steiner M., Linkov I., Yoshida S. The role of fungi in the transfer and cycling of radionuclides in forest ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 58, no. 2–3, pp. 217–241. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00067-4)
2. Sanzharova N. I., Sysoeva A. A., Isamov N. N., Aleksakhin R. M., Kuznetsov V. K., Zhigareva T. L. The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural land exposed to radioactive contamination. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemistry Journal], 2005, vol. 49, no. 3, pp. 26–34 (in Russian).
3. Ehlken S., Kirchner G. Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 58, no. 2–3, pp. 97–112. [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00060-1](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00060-1)
4. Luk'yanova E. A. *Microorganisms of deep storage facilities for liquid radioactive waste and their interaction with radionuclides*. Abstract of Ph. D. diss. Moscow, 2008. 26 p. (in Russian).
5. Lloyd J. R., Renshaw J. C. Bioremediation of radioactive waste: radionuclide-microbe interactions in laboratory and field-scale studies. *Current Opinion in Biotechnology*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.04.012>
6. Keith-Roach M. J., Livens F. R. Chapter 13 Microbial interactions with radionuclides – summary and future perspectives. *Radioactivity in the Environment*, Elsevier, 2002, vol. 2, pp. 383–390. [https://doi.org/10.1016/S1569-4860\(02\)80042-0](https://doi.org/10.1016/S1569-4860(02)80042-0)
7. Habte M. Mycorrhizal fungi and plant nutrition. *Plant nutrient management in Hawaii's soils, approaches for tropical and subtropical agriculture*. Manoa, U.S.A., 2000, pp. 127–131.
8. Pal S. Arbuscular mycorrhiza: Useful tool for heavy metal bioremediation. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2011, vol. 4, no. 4, pp. 379–399.
9. Zhu Y., Christie P., Laidlaw A. S. Uptake of Zn by arbuscular mycorrhizal white clover from Zn-contaminated soil. *Chemosphere*, 2001, vol. 42, no. 2, pp. 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(00\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00125-9)
10. Khan A. G., Kuek C., Chaudhry T. M., Khoo C. S., Hayes W. J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, 2000, vol. 41, no. 1–2, pp. 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00412-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00412-9)
11. Rajkumar M., Ae N., Narasimha M., Prasad V., Freitas H. Potential of siderophore-producing bacteria for improving heavy metal phytoextraction. *Trends in Biotechnology*, 2010, vol. 28, no. 3, pp. 142–149. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.12.002>
12. Dubchak S. The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in ^{134}Cs uptake by crop and wild plant species. *Environmental Sciences*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 175–184.
13. Clint G., Dighton J. Uptake and accumulation of radiocaesium by mycorrhizal and non-mycorrhizal heather plants. *New Phytologist*, 1992, vol. 121, no. 4, pp. 555–561. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb01125.x>
14. Trouvelot A., Kough J. L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systbme racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae*. Paris, 1986, pp. 217–221.
15. Smith S. E., Read D. J. *Mycorrhizal symbiosis* (2nd ed.). San Diego, London, New York, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto, Academic Press, 1997. 605 p.
16. Lasat M. M., Norvell W., Kochian L. V. Potential for phytoextraction of ^{137}Cs from a contaminated soil. *Plant and Soil*, 1997, vol. 195, no. 1, pp. 99–106. <https://doi.org/10.1023/A:1004210110855>

Информация об авторах

Никитин Александр Николаевич – канд. с/х наук, заместитель директора. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Академика Купревича, 2, 220141, г. Минск, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: nikitinale@gmail.com

Шуранкова Ольга Александровна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0000-0002-3311-6128>. E-mail: shurankova@list.ru

Танкевич Елена Александровна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). <http://orcid.org/0009-0009-6443-4733>. E-mail: elena.karpova1991@mail.ru

Information about the authors

Aleksander N. Nikitin – Ph. D. (Agr.), Deputy Director. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: nikitinale@gmail.com

Olga A. Shurankova – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0000-0002-3311-6128>. E-mail: shurankova@list.ru

Elena A. Tankevich – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). <http://orcid.org/0009-0009-6443-4733>. E-mail: elena.karpova1991@mail.ru