

ISSN 1029-8940 (Print)
 ISSN 2524-230X (Online)
 УДК 502:628.4.047
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-4-321-328>

Поступила в редакцию 20.04.2024
 Received 20.04.2024

Е. А. Танкевич¹, А. Н. Никитин², Ю. К. Симончик¹

¹Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Институт микробиологии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП МИКРООРГАНИЗМОВ НА БИОДОСТУПНОСТЬ ¹³⁷CS И ЕГО ПОСТУПЛЕНИЕ ИЗ ТОРФЯНИСТО-ГЛЕЕВОЙ ПОЧВЫ В БИОМАССУ *AVENA SATIVA* L.

Аннотация. Изучено влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на переход ¹³⁷Cs из торфянисто-глеевой почвы, загрязненной в результате аварии на Чернобыльской АЭС, в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.), а также воздействие данных групп микроорганизмов на содержание в исследуемой почве стабильных изотопов К, Са, Sr, Cs в биодоступных формах.

Установлено, что внесение в торфянисто-глеевую почву фосфатмобилизирующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов не изменяет уровень накопления ¹³⁷Cs в надземной биомассе овса посевного. При этом обе группы почвенных микроорганизмов существенно (на 44–84 %) повышают содержание радиоактивного и стабильного изотопов цезия в водорастворимой форме в почве. На этом фоне внесение фосфатмобилизирующих бактерий в торфянисто-глеевую почву снижает на 30,5 % накопление радионуклида в корнях растения. Отсутствие усиления накопления ¹³⁷Cs овсом при увеличении содержания радионуклида в водорастворимой форме объясняется прежде всего повышением содержания биодоступного К в торфянисто-глеевой почве при внесении в нее фосфатмобилизирующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов.

Ключевые слова: почвенные ассоциации микроорганизмов, радиоактивное загрязнение, зона отчуждения Чернобыльской АЭС, биологическая доступность техногенных радионуклидов, цезий-137, макроэлементы, микроэлементы

Для цитирования: Танкевич, Е. А. Влияние основных физиологических групп микроорганизмов на биодоступность ¹³⁷Cs и его поступление из торфянисто-глеевой почвы в биомассу *Avena sativa* L. / Е. А. Танкевич, А. Н. Никитин, Ю. К. Симончик // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. біял. навук. – 2024. – Т. 69, № 4. – С. 321–328. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-4-321-328>

Elena A. Tankevich¹, Aleksander N. Nikitin², Yuliya K. Simonchik¹

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 THE MAIN PHYSIOLOGICAL GROUPS OF MICROORGANISMS ON THE BIOAVAILABILITY OF ¹³⁷CS AND ITS ENTRY FROM PEATY-GLEY SOIL INTO THE BIOMASS OF *AVENA SATIVA* L.

Abstract. The influence of the main physiological groups of soil microorganisms on transfer of ¹³⁷Cs from the peaty-gley soil into the biomass of oats (*Avena sativa* L.) are analyzed in the article. The soil contaminated with radioisotopes after the Chernobyl nuclear power plant accident. The impact of these groups of microorganisms on the content of stable isotopes K, Ca, Sr, Cs in bioavailable forms in the soil are presented as well.

It was established that the introduction of phosphate-mobilizing bacteria and spore-forming ammonifiers into peaty-gley soil did not change the level of ¹³⁷Cs accumulation in the aboveground biomass of oats. However, both groups of soil microorganisms significantly (by 44–84 %) increase the content of radioactive and stable isotopes of cesium in water-soluble form in the soil. Against this background, the introduction of phosphate-mobilizing bacteria into peaty-gley soil reduces the accumulation of radionuclide in the roots of the plant by 30.5 %. The absence of increased accumulation of ¹³⁷Cs in oats with increase in the content of radionuclide in water-soluble form is explained primarily by an increase in the content of K in bioavailable form in peaty-gley soil when phosphate-mobilizing bacteria and spore-forming ammonifiers are added to it.

Keywords: associations of soil microorganisms, radioactive contamination, exclusion zone of Chernobyl NPP, bioavailability of technogenic radionuclides, caesium-137, macroelements, microelements

For citation: Tankevich E. A., Nikitin A. N., Simonchik Yu. K. Influence of the main physiological groups of microorganisms on the bioavailability of ¹³⁷Cs and its entry from peaty-gley soil into the biomass of *Avena sativa* L. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 321–328 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-4-321-328>

Введение. Важную роль в биологическом круговороте веществ играют микроорганизмы, являющиеся связующими звеньями между многими элементами экосистем. Микроорганизмы выполняют функцию редуцентов экосистем, минерализуя органические вещества и тем самым превращая их в доступные для продуцентов соединения. В почвах различных типов содержатся сообщества микроорганизмов с характерным видовым составом, разнообразием и количественным соотношением различных физиологических групп [1].

Миграция радионуклидов происходит в экосистеме благодаря совокупности разных процессов, которые приводят к изменению форм нахождения радионуклидов в почве или к их пространственному перемещению под действием биотических и абиотических факторов [2].

В настоящее время значительная доля ^{137}Cs чернобыльского происхождения в почвах находится в связанном состоянии. Прочность этих связей определяется такими показателями, как физико-химический состав выпадений радионуклидов, агрохимическое состояние почвы, процентное содержание гумуса в почве, количество вносимых минеральных удобрений, активность почвенной микробиоты. И если три первых показателя стабильны для земель, находящихся в сельскохозяйственном производстве и любые изменения в их структуре требуют больших капитальных затрат, то последние два фактора дают возможность потенциально уменьшить поступление радионуклидов в растительные организмы и снизить экономические затраты [3].

Цель работы – изучить влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм ^{137}Cs и содержание в биодоступных формах стабильных изотопов K, Ca, Sr, Cs в торфянисто-глеевой почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (в условиях вегетационного эксперимента), а также на переход радиоизотопов ^{137}Cs из почвы в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.).

Материалы и методы исследования. Объектом исследования являлись основные физиологические группы почвенных микроорганизмов, оказывающие существенное влияние на биологическую доступность техногенных радионуклидов и содержание макро- и микроэлементов в торфянисто-глеевой почве с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Торфянисто-глеевую почву отбирали на глубине 10–15 см в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС – в бывшем н. п. Масаны (Гомельская область, Беларусь, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник).

Почву предварительно очищали от надземных частей растений и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм, тщательно перемешивали, затем помещали в специальные пластиковые сосуды объемом 1 л для выращивания растений. Сосуды каждого варианта опыта размещали на отдельных пластиковых поддонах. Агрохимический анализ использованной в эксперименте почвы выполняли согласно ГОСТам [4–9].

Для вегетационного эксперимента были отобраны наиболее значимые физиологические группы почвенных микроорганизмов, оказавшие существенное влияние на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов по результатам предыдущего эксперимента [10].

В результате посевов на элективные агаризованные питательные среды согласно общепринятым в микробиологии методам [11, 12] получены следующие накопительные культуры: 1) фосфатмобилизующие микроорганизмы; 2) спорообразующие аммонификаторы.

В экспериментальных работах использовали семена овса посевного производства ОАО «МинскСортСемОвощ». Все работы по отбору посадочного материала, подготовке к посадке семян проводили согласно [13].

В каждый горшок высевали по 15 семян выбранной культуры на глубину 1 см, затем в почву при закладке эксперимента и через 15 дней после высева растений вносили по 220 мл суспензий каждой из исследуемых физиологических групп почвенных микроорганизмов (содержащих приблизительно $1,5 \cdot 10^8$ КОЕ/мл). Оценку титра микроорганизмов выполняли согласно [14]. В контрольные образцы вносили по 220 мл мясо-пептонного бульона (МПБ) без инокуляции микроорганизмов.

Суспензии почвенных микроорганизмов готовили на основе МПБ. Для этого в МПБ из чашек Петри стерильной микробиологической петлей вносили инокулянт, представляющий одну из выделенных групп почвенных микроорганизмов.

Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре $37,0 \pm 0,1$ °С в течение суток до появления визуально определяемой мутности. Перед внесением в почву мутность жидких сред доводили до стандарта ВВЛ (стандарта мутности № 0.5 по МакФарланду) – при длине волны 625 нм оптическая плотность бактериальных суспензий составляла 0,08–0,10 [14].

Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ. По мере необходимости на протяжении всего эксперимента в субстраты с растениями вносили дистиллированную воду для поддержания влажности 70 % от полной влагоемкости.

Каждый из вариантов опыта выполняли в 5-кратной повторности. Продолжительность вегетационного эксперимента составила 30 сут.

Вегетационный эксперимент проводили в фитокомнате с регулируемым климатом. В рабочем пространстве фитокомнаты постоянно поддерживалась температура воздуха 24 ± 1 °С, влажность воздуха 55 ± 5 %. Продолжительность искусственного светового дня составила 16 ч при потоке ФАР $100 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Для освещения использовались светодиодные лампы ЛД-27-25W-1200-УХЛ4.

По окончании вегетационного эксперимента срезали надземные части растений. Фитомассу высушивали до абсолютно-сухого состояния, измельчали и взвешивали. Образцы помещали в сосуды емкостью 100 мл для последующих измерений на гамма-спектрометрическом комплексе CANBERRA Packard.

Образцы подземной части растений аккуратно отряхивали от почвенной смеси, корни промывали до отделения комочков почвы, высушивали до абсолютно сухого веса, а затем помещали в сосуды для последующих измерений.

Для характеристики уровня накопления ^{137}Cs в образцах растений и содержания радионуклида в почве использовали величину удельной активности (УА, Бк/кг).

Для изучения влияния каждой из физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биодоступных форм ^{137}Cs определяли содержание водорастворимой и ионообменной форм радионуклида методом последовательной экстракции [15, 16].

Последовательная экстракция включала следующие этапы:

1. Водорастворимую форму выделяли посредством экстракции в дистиллированной воде. Образец почвы (20 г) помещали в 200 мл дистиллированной воды. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды на фильтровальной бумаге. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ -спектрометре и ICP-MS.

2. Ионообменную форму выделяли посредством экстракции в растворе ацетата аммония. Твердую фазу, полученную на предыдущем этапе, помещали в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с рН, доведенной до 7,0. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ -спектрометре и ICP-MS.

Измерения на гамма-спектрометрическом комплексе CANBERRA Packard с коаксиальным полупроводниковым детектором Ge(Li) расширенного энергетического диапазона проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями [17]. Относительная ошибка измерения удельной активности ^{137}Cs в пробах составляла от 5 до 10 %, в зависимости от активности образца. Измерение концентрации макро- и микроэлементов в каждом опытном варианте проводили в 5-кратной повторности на ICP-MS Elan-DRCe (Perkin Elmer) согласно СТБ ISO17294-1-2007 и СТБ ISO 17294-2-2007 [18, 19].

Результаты и их обсуждение. Удельная активность используемой торфянисто-глеевой почвы составляла $13\,213 \pm 2\,643$ Бк/кг. Уровень рН почвы (4,8) указывает на то, что она относится к среднекислым. Количество обменного магния избыточное – 836 мг/кг, очень высокое содержание кальция – 5 198 мг/кг. Для данной почвы характерно очень высокое содержание подвижного фосфора – 267 мг/кг, очень высокое содержание обменного калия (310 мг/кг), а также суммы поглощенных оснований (35,2 ммоль/100 г).

Результаты вегетационного эксперимента показали, что спорообразующие аммонификаторы увеличили среднее значение удельной активности радионуклида в надземных органах растения

Таблица 1. Влияние почвенных микроорганизмов основных физиологических групп на накопление ^{137}Cs овсом посевнымTable 1. Influence of soil microorganisms of the main physiological groups on the accumulation of ^{137}Cs in oats

Вариант опыта	Удельная активность, Бк/кг	
	Подземная часть	Надземная часть
Контроль	11942,4 ± 4334,5	128,3 ± 45,3
Фосфатмобилизующие микроорганизмы	8303,8 ± 1637,7*	134,4 ± 33,8
Спорообразующие аммонификаторы	15154 ± 4924,1	170,4 ± 70,6

Примечание. * – отличия от контроля статистически значимы при $p < 0,05$.

на 32,8 %, однако различия с контролем статистически недостоверны в силу высокой вариабельности данного показателя (табл. 1). Внесение в почву фосфатмобилизующих микроорганизмов снизило удельную активность ^{137}Cs в надземных органах овса на 30,5 % по сравнению с контролем.

Внесение в почву спорообразующих аммонификаторов привело к повышению среднеарифметического значения удельной активности радионуклида в корневой системе овса на 26,9 % относительно контроля, однако, как и в случае с надземными органами, статистическую значимость этого изменения подтвердить не удалось.

В табл. 2 представлено влияние почвенных микроорганизмов основных физиологических групп на содержание водорастворимой и ионообменной форм ^{137}Cs в торфянисто-глеевой почве.

Таблица 2. Влияние внесения почвенных микроорганизмов основных физиологических групп в торфянисто-глеевую почву на содержание в ней водорастворимой и ионообменной форм ^{137}Cs Table 2. Influence of soil microorganisms of the main physiological groups on the content of water-soluble and ion-exchange forms of ^{137}Cs in peat-gley soil

Вариант опыта	Содержание ^{137}Cs , Бк/кг	
	водорастворимой формы	ионообменной формы
Контроль	16,0 ± 4,5	100,0 ± 17,0
Фосфатмобилизующие микроорганизмы	29,4 ± 14,7*	107,5 ± 17,6
Спорообразующие аммонификаторы	25,5 ± 7,4**	166,3 ± 102,2

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4 отличия от контроля статистически значимы при $p < 0,05$ (*) и $p < 0,01$ (**).

Как и в эксперименте, приведенном в работе [10], внесение в почву фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов привело к значимому увеличению содержания ^{137}Cs в водорастворимой форме, однако величина отклонения от контроля была в данном случае не столь значительная. Фосфатмобилизующие микроорганизмы повысили активность ^{137}Cs в водорастворимой форме на 84,1 % по сравнению с контрольным вариантом, а спорообразующие аммонификаторы – на 59,9 %.

Ослабление влияния указанных физиологических групп микроорганизмов обусловлено тем, что данный эксперимент проводился не со стерильной почвой. Конкурентные взаимодействия между микроорганизмами почвы могли снизить плотность популяции фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов. Присутствие других физиологических групп микроорганизмов и активность корневой системы растений также способны компенсировать эффект от внесения в почву вышеназванных микроорганизмов.

Статистически значимых изменений содержания ионообменной формы ^{137}Cs в торфянисто-глеевой почве после внесения фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов в вегетационном опыте не наблюдалось. В варианте со спорообразующими аммонификаторами прослеживалась тенденция к увеличению содержания радионуклида в ионообменной форме, однако это сопровождалось высокой вариабельностью показателя, что не позволяет сделать вывод о статистической достоверности выявленного изменения.

Содержание легкодоступного ¹³⁷Cs (суммы водорастворимой и ионообменной форм) в торфянисто-глеевой почве во всех вариантах опыта увеличилось: фосфатмобилизующие микроорганизмы повысили удельную активность ¹³⁷Cs на 18 % по сравнению с контролем, а спорообразующие аммонификаторы – на 65,4 % (рис. 1).

Наблюдаемое явление может быть следствием высвобождения в раствор ¹³⁷Cs, связанного в органических остатках, сосредоточенных в почве, в результате их микробиологической деструкции. Аналогичные результаты получены и в модельном эксперименте с торфянисто-глеевой почвой [10].

Таким образом, можно сделать вывод, что все исследуемые группы микроорганизмов, участвуя в разрушении органического вещества торфянисто-глеевой почвы, повышают биологическую доступность радиоактивного изотопа Cs в почве.

Содержание Ca как в водорастворимой, так и в ионообменной форме во всех опытных вариантах несколько увеличилось по сравнению с контролем (табл. 3). Достоверные различия с контролем в содержании водорастворимой формы Ca зафиксированы при внесении обоих исследуемых групп микроорганизмов.

Таблица 3. Содержание Ca и K в образцах торфянисто-глеевой почвы, мг/кг

Table 3. Concentration of Ca and K in the samples of peat-gley soil, mg/kg

Вариант опыта	Форма Ca		Форма K	
	водорастворимая	ионообменная	водорастворимая	ионообменная
Контроль	2291,6 ± 1241,6	7153,7 ± 710,6	925,3 ± 258,7	802,3 ± 122,7
Фосфатмобилизующие микроорганизмы	3364,5 ± 298,4*	7645,5 ± 752,7	1527,3 ± 168,0**	823,0 ± 89,3
Спорообразующие аммонификаторы	3259,3 ± 206,3*	7570,6 ± 461,2	1401,0 ± 599,2*	829,4 ± 51,1

На рис. 2 показано влияние исследуемых физиологических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Ca в торфянисто-глеевой почве.

Повышение содержания легкодоступного Ca было характерно для всех вариантов опыта, при этом полученные данные являлись достоверными.

Результаты анализа показали, что содержание K в водорастворимой форме увеличивается на 51–65 % после внесения в почву фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов. Содержание данного элемента в ионообменной форме является более инертным показателем в испытываемых системах и не претерпевает существенных изменений.

Содержание легкодоступного K увеличилось как при внесении фосфатмобилизующей группы микроорганизмов, так и спорообразующих аммонификаторов – на 36 и 29,1 % соответственно (рис. 3).

В табл. 4 представлены данные по содержанию стабильных изотопов Cs и Sr в торфянисто-глеевой почве после окончания эксперимента с внесением в почву фосфатмобилизующих и спорообразующих аммонификаторов.

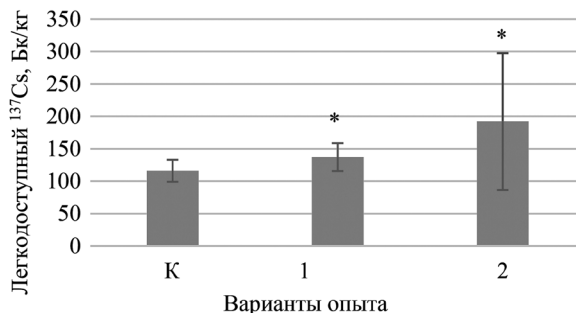


Рис. 1. Содержание легкодоступного ¹³⁷Cs в торфянисто-глеевой почве. Здесь и на рис. 2–5: К – контроль, 1 – фосфатмобилизующие микроорганизмы, 2 – спорообразующие аммонификаторы; планки погрешностей указывают на доверительные интервалы (α = 0,05). * – значимые отличия от контроля (p < 0,05)

Fig. 1. Content of bioavailable ¹³⁷Cs in peat-gley soil. Here and in Fig. 2–5: K – control, 1 – phosphate-mobilizing microorganisms, 2 – spore-forming ammonifiers; Error bars indicate confidence intervals (α = 0.05). * – significant differences from control (p < 0.05)

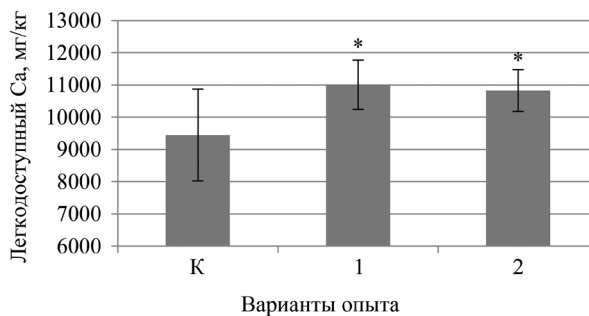


Рис. 2. Содержание легкодоступного Ca в торфянисто-глеевой почве. * – значимые отличия от контроля (p < 0,05)

Fig. 2. Content of bioavailable Ca in peat-gley soil. * – significant differences from control (p < 0.05)

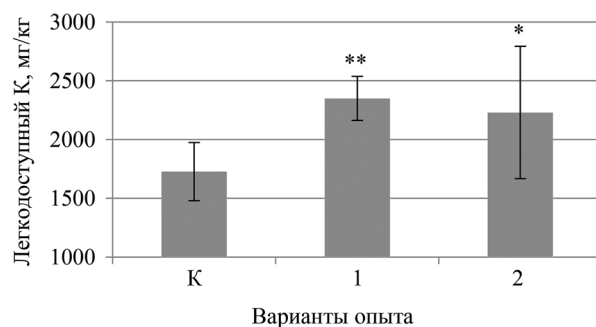


Рис. 3. Содержание легкодоступного K в торфянисто-глеевой почве.
Значимые отличия от контроля: * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$

Fig. 3. Content of bioavailable K in peat-gley soil.
Significant differences from control: * – $p < 0.05$, ** – $p < 0.01$

Т а б л и ц а 4. Содержание Cs и Sr в образцах торфянисто-глеевой почвы, мкг/кг

Table 4. Concentration of Cs and Sr in the samples of peat-gley soil, mkg/kg

Вариант опыта	Форма Cs		Форма Sr	
	водорастворимая	ионообменная	водорастворимая	ионообменная
Контроль	1,7 ± 0,5	45,1 ± 3,7	23,4 ± 2,9	55,5 ± 5,6
Фосфатмобилизующие микроорганизмы	3,1 ± 0,5**	41,9 ± 5,5	28,7 ± 2,4**	56,5 ± 5,3
Спорообразующие аммонификаторы	2,4 ± 0,5*	40,0 ± 1,8**	27,5 ± 1,8**	54,9 ± 2,4

Содержание Cs в водорастворимой форме увеличилось при внесении как фосфатмобилизующих микроорганизмов, так и спорообразующих аммонификаторов – на 82,7 и 43,6 % соответственно. При этом наблюдались достоверные различия по отношению к контролю.

Внесение спорообразующих аммонификаторов в почву, напротив, привело к снижению содержания Cs в ионообменной форме. Эффект снижения содержания данной формы радионуклидов при внесении фосфатмобилизующих бактерий статистически незначим.

Только при внесении в почву спорообразующих аммонификаторов наблюдалось статистически значимое уменьшение содержания легкодоступного Cs по сравнению с контролем (рис. 4).

Содержание Sr в водорастворимой форме увеличилось при воздействии как фосфатмобилизующих, так и спорообразующих аммонификаторов – на 22,2 и 17 % соответственно. Достоверные различия по сравнению с контролем отмечались во всех вариантах опыта.

При этом ионообменная форма Sr не претерпела существенных изменений при внесении в торфянисто-глеевую почву анализируемых групп микроорганизмов.

Значимое увеличение содержания легкодоступного Sr наблюдалось при внесении в почву группы фосфатмобилизующих микроорганизмов (рис. 5).

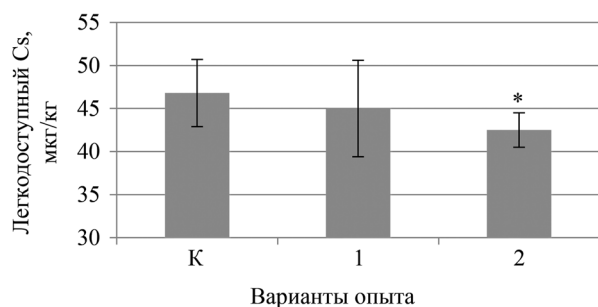


Рис. 4. Содержание легкодоступного Cs в торфянисто-глеевой почве. * – значимые отличия от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 4. Content of bioavailable Cs in peat-gley soil.
* – significant differences from control ($p < 0.05$)

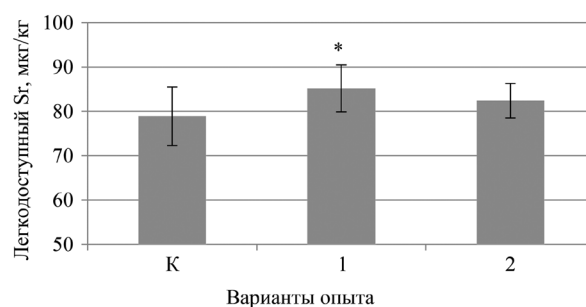


Рис. 5. Содержание легкодоступного Sr в торфянисто-глеевой почве. * – значимые отличия от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 5. Content of bioavailable Sr in peat-gley soil.
* – significant differences from control ($p < 0.05$)

Заклучение. В вегетационном эксперименте показано, что внесение в торфянисто-глеевую почву фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов не приводит к изменению накопления ^{137}Cs в надземных частях овса посевного, хотя содержание в почве водорастворимой формы радионуклидов при этом повышается на 44–84 %. Более того, внесение фосфатмобилизующих бактерий в торфянисто-глеевую почву снижает на 30,5 % накопление радионуклида в корнях растения. Отсутствие эффекта усиления накопления ^{137}Cs овсом при увеличении содержания радионуклида в водорастворимой форме объясняется прежде всего повышением содержания биодоступного калия в торфянисто-глеевой почве при внесении в нее фосфатмобилизующих бактерий и спорообразующих аммонификаторов.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями НАН Беларуси № 2017-08-64 на 2017 г. и № 2021-26-05 на 2021 г.

Acknowledgements. This work was supported by grants to perform research work doctoral students, graduate students and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus No. 2017-08-64 for 2017 and No. 2021-26-05 for 2021.

Список использованных источников

1. Семенова, И. Н. Изучение эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов в зоне влияния горнорудного производства / И. Н. Семенова, Г. Р. Ильбулова, Я. Т. Суюндуков // *Фундам. исслед.* – 2011. – № 11-2. – С. 410–414.
2. Сахаров, В. К. Радиоэкология: учеб. пособие / В. К. Сахаров. – СПб.: Лань, 2006. – 313 с.
3. Черненко, И. В. Бактериальные азотфиксирующие препараты на почвах, подвергшихся радиоактивному загрязнению / И. В. Черненко, В. А. Николаев, Н. И. Бохан // *Агропанорама.* – 1997. – № 4. – С. 20–21.
4. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО: ГОСТ 26483-85: введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 6 с.
5. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО: ГОСТ 26212-2021: введ. 01.08.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 12 с.
6. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена: ГОСТ 27821-2020: введ. 01.01.2022. – М.: Стандартинформ, 2020. – 9 с.
7. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО: ГОСТ 26487-85: введ. 01.07.1986. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.
8. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: ГОСТ 26207-91: введ. 01.07.1993. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.
9. Методы определения органического вещества: ГОСТ 26213-2021: введ. 01.08.2022. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 12 с.
10. Изменение биологической доступности цезия-137 в торфяной почве из зоны отчуждения Чернобыльской АЭС при развитии в ней различных физиологических групп почвенных микроорганизмов / Е. А. Танкевич [и др.] // *Весн. МДПУ імя І. П. Шамякіна.* – 2023. – № 2 (62). – С. 30–36.
11. Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв / под ред. Ю. М. Возняковской. – Л.: Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. микробиологии, 1987. – 47 с.
12. Теппер, Е. З. Практикум по микробиологии / Е. З. Теппер, В. К. Шильникова, Г. И. Переверзева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1987. – 239 с.
13. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести: ГОСТ 12038-84: введ. 01.07.1986. – М.: Стандартинформ, 1985. – 29 с.
14. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам: метод. указания. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 91 с.
15. *Chemical speciation in the environment* / ed. by A. M. Ure, C. M. Davidson. – 2nd ed. – Wiley-Blackwell, 2002. – 452 p.
16. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation / X. Hou [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2003. – Vol. 308. – N 1–3. – P. 97–109. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00546-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00546-6)
17. МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами: МВИ. МН 3421-2010: введ. 28.05.10. – Минск: БелГИМ, 2010. – 35 с.
18. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Ч. 1. Общие требования: СТБ ISO 17294-1-2007: введ. 01.05.2008. – Минск: БелГИСС, 2008. – 32 с.
19. Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 2. Определение 62 элементов: СТБ ISO 17294-2-2007: введ. 01.05.2008. – Минск: Госстандарт, 2007. – 21 с.

References

1. Semenova I. N., Il'bulova G. R., Suyundukov Ya. T. Study of ecological and trophic groups of soil microorganisms in the zone of influence of mining production. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research], 2011, no. 11-2, pp. 410–414 (in Russian).
2. Sakharov V. K. *Radioecology*. Sankt-Peterburg, Lan' Publ., 2006. 313 p. (in Russian).

3. Chernenok I. V., Nikolaev V. A., Bokhan N. I. Bacterial nitrogen-fixing preparations on soils exposed to radioactive contamination. *Agropanorama* [Agropanorama], 1997, no. 4, pp. 20–21 (in Russian).
4. *State Standart 26483-85. Preparation of salt extract and determination of its pH using the TsINAO method.* Moscow, Standards Publishing House, 1985. 6 p. (in Russian).
5. *State Standart 26212-2021. Determination of hydrolytic acidity using the Kappen method as modified by TsINAO.* Moscow, Russian Institute of Standardization, 2021. 12 p. (in Russian).
6. *State Standart 27821-2020. Determination of the amount of absorbed bases using the Kappen method.* Moscow, Standardinform Publ., 2020. 9 p. (in Russian).
7. *State Standart 26487-85. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium using TsINAO methods.* Moscow, Standarts Publishing House, 1985. 14 p. (in Russian).
8. *State Standart 26207-91. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium using the Kirsanov method as modified by TsINAO.* Moscow, Standarts Publishing House, 1992. 7 p. (in Russian).
9. *State Standart 26213-2021. Methods for determining organic matter.* Moscow, Russian Institute of Standardization, 2021. 12 p. (in Russian).
10. Tankevich E. A., Nikitin A. N., Kontsevaya I. I., Simonchik Yu. K. Changes in the biological availability of cesium-137 in peat soil from the exclusion zone of the Chernobyl NPP during the development of different physiological groups of soil microorganisms in it. *Vestnik Mozyrskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I. P. Shamyakina* [Bulletin of Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin], 2023, no. 2 (62), pp. 30–36 (in Russian).
11. Voznyakovskaya Yu. M. *Basic microbiological and biochemical methods of soil research.* Leningrad, All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology, 1987. 47 p. (in Russian).
12. Tepper E. Z., Shil'nikova V. K., Pereverzeva G. I. *Microbiology Workshop.* Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 239 p. (in Russian).
13. *State Standart 12038-84. Seeds of crops. Methods for determining germination.* Moscow, Standardinform Publ., 1985. 29 p. (in Russian).
14. *Determination of the sensitivity of microorganisms to antibacterial drugs: Guidelines.* Moscow, Federal Center for State Sanitary and Epidemiological Surveillance of the Russian Ministry of Health, 2004. 91 p. (in Russian).
15. Ure A. M., Davidson C. M. *Chemical speciation in the environment. Second edition.* Wiley-Blackwell Publ., 2002. 452 p.
16. Hou X., Fogh C. L., Kucera J., Andersson K. G., Dahlgard H., Nielsen S. P. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*, 2003, vol. 308, no. 1–3, pp. 97–109. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00546-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00546-6)
17. *MVI. MN 3421-2010. MVI of volumetric and specific activity of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors.* Minsk, Belarusian State Institute of Metrology, 2010. 35 p. (in Russian).
18. *STB ISO 17294-1-2007. Applications of inductively coupled plasma mass spectrometry. Pt. 1. General requirements.* Minsk, Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2008. 32 p. (in Russian).
19. *STB ISO 17294-2-2007. Applications of inductively coupled plasma mass spectrometry. Pt. 2. Definition of 62 elements.* Minsk, Gosstandart Publ., 2007. 21 p. (in Russian).

Информация об авторах

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

Никитин Александр Николаевич – канд. с-х. наук, зам. директора по научной работе. Институт микробиологии НАН Беларуси (ул. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-1369-0093>. E-mail: nikitinale@gmail.com

Симончик Юлия Константиновна – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: simonagomel@gmail.com

Information about the authors

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

Aleksander N. Nikitin – Ph. D. (Agric.), Deputy Director for Research. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikitinale@gmail.com

Yuliya K. Simonchik – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyuninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: simonagomel@gmail.com