
ИЗУЧЕНИЕ И РЕАБИЛИТАЦИЯ ЭКОСИСТЕМ

THE STUDY AND REHABILITATION OF ECOSYSTEMS

УДК 502:628.4.047

ЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ГРУПП МИКРООРГАНИЗМОВ В ИЗМЕНЕНИИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ФОРМ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Е. А. ТАНКЕВИЧ¹⁾, А. Н. НИКИТИН²⁾, И. И. КОНЦЕВАЯ³⁾, Ю. К. СИМОНЧИК¹⁾

¹⁾Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Федюнинского 4, 246007, г. Гомель, Беларусь

²⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь

³⁾Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, 246019, г. Гомель, Беларусь

Образец цитирования:

Танкевич ЕА, Никитин АН, Концевая ИИ, Симончик ЮК. Значение основных физиологических групп микроорганизмов в изменении физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;1:4–11. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-4-11>

For citation:

Tankevich EA, Nikitin AN, Kantsavaya II, Simonchyk YuK. The importance of the main physiological groups of microorganisms in the change of physico-chemical forms of technogenic radionuclides in the sod-podzolic soil of the exclusion zone of the Chernobyl NPP. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;1:4–11. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-1-4-11>

Авторы:

Елена Александровна Танкевич – младший научный сотрудник; аспирант лаборатории радиоэкологии.
Александр Николаевич Никитин – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.
Ирина Ильинична Концевая – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии биологического факультета.
Юлия Константиновна Симончик – младший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

Authors:

Elena A. Tankevich, junior researcher; postgraduate student at the laboratory of radioecology.
elena.karpova1991@mail.ru
Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.
nikitinale@gmail.com
Irina I. Kantsavaya, PhD (biology); associate professor at the department of biology, faculty of biology.
ikantsavaya@mail.ru
Yuliya K. Simonchyk, junior researcher at the laboratory of radioecology.
simonagomel@gmail.com

Основными источниками радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова являются глобальные радиоактивные выпадения из атмосферы долгоживущих радионуклидов после ядерных испытаний, а также выбросы техногенных радионуклидов, связанные с работой промышленных предприятий, аварий на АЭС. Микрофлора играет важную роль в преобразовании физико-химического состояния радионуклидов в почве. В зависимости от типа почвы и населяющего его микробиоценоза, эти процессы могут как ускоряться, так и тормозиться. Исследование данной проблемы требует комплексного подхода с организацией долгосрочного мониторинга. Изучалось влияние почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС. Установлено, что наибольшему снижению удельной активности ^{137}Cs в водорастворимой форме в дерново-подзолистой супесчаной почве способствуют такие группы микроорганизмов, как спорообразующие аммонификаторы – на 21,7 % и микробиологический препарат EM-1 – на 52,1 % по сравнению с контрольным образцом. Аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. В варианте опыта с применением удобрения EM-1 наблюдалось увеличение удельной активности ^{137}Cs в ионообменной форме на 16,9 %.

Ключевые слова: почвенные ассоциации микроорганизмов; радиоактивное загрязнение; зона отчуждения Чернобыльской АЭС; биологическая доступность техногенных радионуклидов; ^{137}Cs .

Благодарность. Исследования проводились в рамках гранта для выполнения научно-исследовательских работ среди докторантов, аспирантов и соискателей Национальной академии наук Беларуси «Значение основных физиологических групп почвенных микроорганизмов в изменении биологической доступности техногенных радионуклидов».

THE IMPORTANCE OF THE MAIN PHYSIOLOGICAL GROUPS OF MICROORGANISMS IN THE CHANGE OF PHYSICO-CHEMICAL FORMS OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE SOD-PODZOLIC SOIL OF THE EXCLUSION ZONE OF THE CHERNOBYL NPP

E. A. TANKEVICH^a, A. N. NIKITIN^b, I. I. KANTSAVAYA^c, Yu. K. SIMONCHYK^a

^a*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
4 Fiadzyuninskaya Street, Gomel 246007, Belarus*

^b*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,
2 Kuprevicha Street, Minsk 220084, Belarus*

^c*Francyisk Skorina Gomel State University,
104 Saveckaya Street, Gomel 246019, Belarus*

Corresponding author: E. A. Tankevich (elena.karpova1991@mail.ru)

The main sources of radioactive contamination of the soil and vegetation cover are global radioactive fallout from the atmosphere of long-lived radionuclides after nuclear tests, as well as emissions of man-made radionuclides associated with the work of industrial enterprises, accidents at nuclear power plants. Microflora plays an important role in the transformation of the physicochemical state of radionuclides in the soil. Depending on the type of soil and the microbial community inhabiting it, these processes can both accelerate and slow down. The study of this problem requires an integrated approach, with the organization of long-term monitoring. In this work, the influence of soil microorganisms of various physiological groups on the change of physicochemical forms of technogenic radionuclides of sod-podzolic sandy loam soil of the exclusion zone of the Chernobyl NPP was investigated. It was found that the greatest decrease in the specific activity of ^{137}Cs in water-soluble form in sod-podzolic sandy loam soil is promoted by such groups of microorganisms as spore-forming ammonifiers – by 21,7 % and microbiological preparation EM-1 – by 52,1 % compared with the control sample. Ammonifying proteolytic microorganisms reduce the specific activity of the radionuclide in ion-exchange form by 12,5 %. In the variant of the experiment using EM-1 fertilizer, an increase in the specific activity of ^{137}Cs in ion-exchange form was observed by 16,9 %.

Keywords: associations of soil microorganisms; radioactive contamination; exclusion zone of Chernobyl NPP; bioavailability of technogenic radionuclides; ^{137}Cs .

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of a grant to carry out research work among doctoral students, graduate students and applicants of the National Academy of Sciences of Belarus «The importance of the main physiological groups of soil microorganisms in changing the bioavailability of technogenic radionuclides».

Введение

В настоящее время почвы испытывают разнообразное антропогенное воздействие, которое может нарушать нормальное протекание почвенных процессов, а значит, процессов круговорота веществ в биосфере.

Чувствительность и высокая индикационная способность микроорганизмов позволяют избрать их в качестве инструмента мониторинга антропогенных изменений биосферы [1].

Синтез основной массы органического вещества осуществляется главным образом растениями. Основной деятельностью почвенных микроорганизмов является минерализация органического вещества. Почвенные микроорганизмы выполняют системообразующие функции в таких процессах, как почвообразование, разложение почвенного органического вещества, стимуляция роста и обеспечение защиты растений от патогенной микрофлоры [2].

Почвенный микробиом является непосредственным источником формирования микрофлоры, которая определяет питание растений, их устойчивость к патогенам и абиотическим стрессам. Распространение микроорганизмов в природе зависит от многих условий, среди которых наиболее важными являются наличие питательных веществ, температура, влажность, благоприятная реакция субстрата.

И количественно, и качественно микрофлора почвы подвержена резким колебаниям в зависимости от физических и химических свойств почвы, ее положения в рельефе, освещения, влагоемкости, времени года и от целого ряда метеорологических и климатических факторов [3]. Обладая высокой химической активностью, микроорганизмы представляют действительно важнейшую геологическую силу, они принимая участие в процессах деструкции и минерализации органического вещества как природного (разложение целлюлозы), так и антропогенного происхождения [4; 5]. Чернобыльская радиационная катастрофа стала причиной загрязнения больших площадей почвенного покрова техногенными радионуклидами. По сей день значительное внимание привлекают основные загрязнители: цезий-137 и стронций-90. Изучение данных радионуклидов особенно актуально для территорий, пострадавших от аварии на ЧАЭС. Цезий-137 является радиоактивным изотопом цезия, возникающего при обычных продуктах деления урана-235 и других изотопов в ядерных реакторах и при использовании ядерного оружия. Он является одним из самых проблематичных изотопов из продуктов деления, поскольку способен легко перемещаться и распространяться в природе из-за высокой растворимости своих солей в воде [6].

Почвенные микроорганизмы являются источниками большого разнообразия физико-химических и биологических механизмов, осуществляющих превращения между растворимыми и нерастворимыми фазами радионуклидов.

Цель исследования – изучение влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов в дерново-подзолистой супесчаной почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись основные физиологические группы почвенных микроорганизмов, оказывающие существенное влияние на биологическую доступность техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Отбор проб дерново-подзолистой супесчаной почвы проводили в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в частном подворье бывшего населенного пункта Борщевка (Гомельская обл., Беларусь, Полесский государственный радиационный экологический заповедник). Почва предварительно очищалась от надземных частей растений и отбиралась на глубину 10–15 см.

Для модельного эксперимента по изучению влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов почва перед закладкой опыта была простерилизована (температура – 127 °С, давление – 1,5 атм., продолжительность – 45 мин). Почвой заполнялись пластиковые емкости (50 г сухой почвы на сосуд).

Для оценки влияния основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биологической доступности техногенных радионуклидов дерново-подзолистой супесчаной почвы в модельном опыте использовали 9 групп почвенных микроорганизмов, выделенных в результате посевов на селективных агаризованных питательных средах, предназначенных для культивирования агрономически ценных групп микроорганизмов:

- 1) аммонифицирующие протеолитические бактерии (1);
- 2) общий комплекс культивируемых бактерий (2);
- 3) амилитические (3);
- 4) олигонитрофильные микроорганизмы (4);
- 5) фосфатмобилизующие микроорганизмы (6);
- 6) спорообразующие аммонифакторы (7);
- 7) автохтонные олиготрофы (10);
- 8) целлюлозоразрушающие аэробные (11а);
- 9) олигокарбофильные микроорганизмы (14).

Также дополнительно исследовали влияние микробиологического удобрения EM-1. Оно разработано профессором Тэруо Хига (University of the Ryukyus, Япония). В его состав входят три основные группы микроорганизмов: молочнокислые бактерии (*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, *Streptococcus lactis*), фотосинтезирующие бактерии (*Rhodospseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*), дрожжи (*Saccharomyces cerevisiae* и *Candida utilis*). Кроме того, в небольших количествах препарат включает актиномицеты (*Streptomyces albus* и *S. griseus*) и ферментирующие грибы (*Aspergillus oryzae*, *Mucor hiemalis*).

Каждый из вариантов опыта выполняли в пятикратной повторности. Суспензии почвенных микроорганизмов готовили на основе мясо-пептонного бульона (МПБ). Для этого в МПБ вносили из чашек Петри стерильной микробиологической петлей инокулянт, представляющий одну из выделенных групп почвенных микроорганизмов, тем самым были получены 9 опытных суспензий. Мутность этих жидких сред доводили до стандарта ВВЛ (стандарта мутности № 0.5, по МакФарланду) – при длине волны 625 нм оптическая плотность суспензий составляла 0,08–0,10. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре ПЭ-5300 ВИ.

В качестве раствора сравнения использовали мясо-пептонный бульон. Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре 37,1 °С в течение суток до появления визуальной мутности.

В каждую стерильную пластиковую емкость, заполненную 50 г сухой почвы, при помощи стерильного цилиндра вносили по 15 мл готовой суспензии соответствующей группы микроорганизмов, а также дозатором добавляли 1 мл хлорида стабильного цезия (CsCl). В контрольные образцы (к) вносили по 15 мл мясо-пептонного бульона без добавления микроорганизмов.

Пластиковые пробирки закрывали крышками. Для дополнительной аэрации в крышках были сделаны небольшие отверстия, которые на время эксперимента были закрыты стерильной гигроскопической ватой (рис. 1). Через 15 дней после закладки эксперимента в каждую емкость вносили по 5 мл стерилизованной воды, чтобы не допустить пересыхания почвенных образцов.

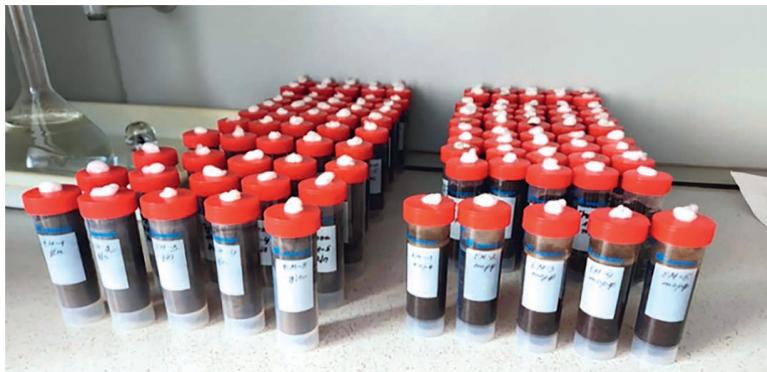


Рис. 1. Внешний вид наполненных дерново-подзолистой супесчаной почвой емкостей в начале эксперимента

Fig. 1. The appearance of containers filled with sod-podzolic sandy loam soil at the beginning of the experiment

Продолжительность экспозиции дерново-подзолистой почвы с микроорганизмами составила 1 календарный месяц.

Для изучения влияния каждой из физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биодоступных форм ^{137}Cs определяли содержание водорастворимой и обменной форм радионуклида методом последовательной экстракции [7; 8].

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.

2. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали на фильтровальной бумаге 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ -спектрометре.

3. Ионообменную форму выделяли посредством экстракции в растворе ацетата аммония. Твердую фазу с предыдущего шага помещали в 200 мл 1 М раствора ацетата аммония с рН, доведенной до 7,0.

4. Суспензию взбалтывали при комнатной температуре на протяжении 24 ч.

5. Экстракт отделяли от почвы фильтрованием. Почву промывали 200 мл дистиллированной воды. Жидкую фазу помещали в сосуд емкостью 100 мл для измерения на γ -спектрометре.

Измерения на гамма-спектрометрическом комплексе *CANBERRA Packard* с коаксиальным полупроводниковым детектором *Ge(Li)* расширенного энергетического диапазона проводили в соответствии с принятыми методическими рекомендациями¹.

Относительная ошибка измерения удельной активности ¹³⁷Cs в пробах составляла от 5 до 10 % в зависимости от активности образца.

Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [9; 10]. Агрохимический анализ стерильного почвенного образца выполняли согласно ГОСТ^{2–7}.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований выявлено, что удельная активность исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы составила 12868 ± 775 Бк/кг.

Агрохимические показатели модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Агрохимические показатели модельной дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 1

Agrochemical indicators of model sod-podzolic sandy loam soil

Агрохимические показатели почвы	Единицы измерения
pH (в KCl), ед.	6,5
Ca (обм), ммоль/100 г	12,13
Ca (обм), млн ⁻¹ (мг/кг)	2430
Mg (обм, подв.), ммоль/100 г	0,8
Mg (обм, подв.), млн ⁻¹ (мг/кг)	91,2
P ₂ O ₅ (подв), млн ⁻¹ (мг/кг)	3017
Органическое вещество (гумус), %	3,6
S, сумма поглощенных оснований, ммоль / 100 г	41,8
Hг, гидролитическая кислотность, ммоль / 100 г	0,99
T, емкость поглощения, ммоль / 100 г	42,79
V, степень насыщенности почв основаниями, %	97,7
K ₂ O (обм.), млн ⁻¹ (мг/кг)	708

Уровень pH близок к нейтральному – 6,5. В модельной почве наблюдалось очень высокое содержание обменного кальция (2430 мг/кг), низкое содержание обменного магния 91,2 мг/кг.

Содержание подвижного фосфора (P₂O₅) в дерново-подзолистой почве соответствует очень высокому значению – 3017 мг/кг.

¹МВИ. МН 3421-2010: МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами: утв. БелГИМ 28.05.10. Минск: БелГИМ, 2010. 35 с.

²ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 6 с.

³ГОСТ 26212-2021. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

⁴ГОСТ 27821-2020. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Введ. 2022-01-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 9 с.

⁵ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 14 с.

⁶ГОСТ 26207-91. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 1993-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1992. 7 с.

⁷ГОСТ 26213-2021. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213-91; введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

Обеспеченность дерново-подзолистой почвы обменным калием (K_2O) соответствует очень высоким показателям – 708 мг/кг.

Содержание органического вещества (гумуса) составляет 3,6 %, что соответствует очень высокому показателю. Сумма поглощенных оснований (S) в дерново-подзолистой почве имеет значение 41,8 ммоль / 100 г и является очень высоким показателем.

В табл. 2 представлены данные по оценке влияния почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Таблица 2

Оценка влияния почвенных микроорганизмов различных физиологических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве

Table 2

Assessment of the influence of soil microorganisms of various physiological groups on the content of water-soluble and ion-exchange form ^{137}Cs in sod-podzolic sandy loam soil

Группа микроорганизмов (вариант опыта)	Водорастворимая форма ^{137}Cs , Бк/кг	Ионообменная форма ^{137}Cs , Бк/кг
Контроль (К)	138,9 ± 27,7	1058,2 ± 130,2
Аммонифицирующие (1)	141,9 ± 20,7	926,0 ± 129,4*
Общий комплекс культивируемых микроорганизмов (2)	122,6 ± 34,4	1022,3 ± 151,5
Амилолитические (3)	90,8 ± 73,9	1038,9 ± 184,3
Олигонитрофильные (4)	143,3 ± 58,8	1141,9 ± 134,3
Фосфатмобилизующие (6)	113,9 ± 28,6	1095,4 ± 83,5
Спорообразующие аммонификаторы (7)	108,8 ± 17,6*	1109,8 ± 111,9
Автохтонные олиготрофы (10)	176,1 ± 112,8	1082,9 ± 133,7
Целлюлозоразрушающие аэробные (11а)	129,0 ± 78,6	1133,1 ± 228,6
ЕМ-1 (ЕМ)	66,6 ± 38,6**	1236,8 ± 123,7*
Олигокарбофильные (14)	139,4 ± 54,7	1166,7 ± 139,7

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю: * – ($p < 0,05$), ** – ($p < 0,01$).

В данной почве 1,1 % запаса радионуклида находится в водорастворимой форме, в ионообменной форме – 8,2 % его запаса. Это свидетельствует о нахождении значительного запаса радионуклида в биологически доступных формах и достаточно высоком потенциале снижения его накопления растениями в случае его понижения.

Результаты эксперимента показывают, что наибольшему снижению удельной активности ^{137}Cs в водорастворимой форме способствует комплекс микроорганизмов, входящих в состав микробиологического препарата ЕМ-1. Их внесение в почву позволяет практически вдвое уменьшить запас радиоактивного изотопа цезия в водорастворимой форме.

Активность амилолитических микроорганизмов позволила снизить запас ^{137}Cs в водорастворимой форме на 34,7 %. Однако по сравнению с контрольным вариантом опыта различия не оказались достоверными.

Амилолитические бактерии обладают способностью к биологической азотфиксации, то есть связыванию азота атмосферы и переводу его в азотсодержащие соединения. Азотфиксирующей способностью также обладают пурпурные бактерии *Rhodospseudomonas palustris* и *Rhodobacter sphaeroides*, входящие в состав ЕМ-1.

Согласно литературным данным, применение бактериальных азотфиксирующих препаратов на землях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, в дозах, необходимых для обеспечения нормального роста растений, ведет к появлению в почве большого количества активных катионных групп (NH_4^+). Аммоний вытесняет ионы Cs^+ из почвенного поглощающего комплекса и участков специфической сорбции, что повышает биологическую доступность радионуклида [11]. Однако в случае с внесением спорообразующих аммонификаторов наблюдается обратный эффект – происходит значимое снижение доли ^{137}Cs в водорастворимой форме – на 21,7 % по сравнению с контрольным вариантом опыта. Еще более сильное снижение

содержания водорастворимой формы радионуклида вызывает добавление в почву консорциума микроорганизмов, входящих в состав препарата ЕМ-1.

В используемой в эксперименте почве имеется достаточно высокое содержание органического углерода. В этих благоприятных условиях аммонификация протекает довольно интенсивно, но высвобождается мало аммиака, поскольку активно развиваются популяции микроорганизмов, расходующих аммиачный азот для формирования клеток. Азот тем самым переходит в органическую форму, то есть иммобилизуется и не выделяется в почву. Внесение в почву автохтонных олиготрофов несколько увеличило содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме (на 26,8 %). Однако различия с контролем не являются статистически значимыми.

Содержание ^{137}Cs в ионообменной форме в дерново-подзолистой супесчаной почве является более инертным показателем по сравнению с водорастворимой.

Результаты эксперимента показали, что аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. Аммонифицирующие бактерии при помощи ферментов, выделяемых ими в почву, разлагают сложные белковые молекулы на более простые соединения. Эти соединения осмотическим путем проникают в клетки микроорганизмов и под действием внутриклеточных ферментов подвергаются дезаминированию, при котором высвобождается аммиак. Но в условиях, благоприятствующих активному развитию микроорганизмов, аммоний активно поглощается ими из почвенной среды. В результате чего содержание аммония, антагониста цезия в сорбированных формах, не возрастает, но даже может происходить биосорбция Cs^+ наряду с K^+ и рядом других элементов. Данные обстоятельства приводят к снижению содержания радиоактивного изотопа цезия в биодоступных формах. В варианте опыта с применением удобрения ЕМ-1 наблюдалось увеличение удельной активности ^{137}Cs в ионообменной форме на 16,9 % по сравнению с контролем, что должно несколько повысить биологическую доступность радионуклида.

Группа олигокарбофильных микроорганизмов проявила тенденцию к увеличению удельной активности ^{137}Cs в ионообменной форме на 10,3 % по сравнению с контрольным образцом. Олигокарбофильные бактерии способны к росту при минимальных концентрациях органического вещества, участвуя в завершении процесса деструкции. Данная подгруппа олиготрофов обладает высокой окислительно-восстановительной ферментативной активностью, поэтому по биохимической принадлежности наиболее приближена к автохтонной части микробоценоза почвы. В условиях минимального количества или полного отсутствия доступного углерода в почвенном растворе олигокарбофилы начинают трансформировать свободные и новообразованные фракции гумуса, участвовать в преобразовании специфического органического вещества почвы и изменять ее гумусовый режим.

На рис. 2 показано влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) ^{137}Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.

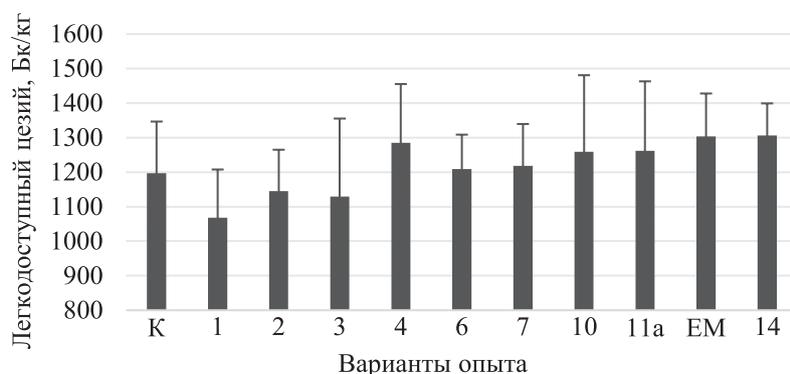


Рис. 2. Содержание легкодоступного ^{137}Cs в модельной дерново-подзолистой супесчаной почве

Fig. 2. The content of readily available ^{137}Cs in the model sod-podzolic sandy loam soil

Олигокарбофильные микроорганизмы повысили данный показатель на 9,1 %, микробиологический препарат ЕМ-1 – на 8,9 %, олигонитрофильные – на 7,3, целлюлозоразрушающие аэробные – на 5,4, автохтонные олиготрофы – на 5,2, спорообразующие аммонификаторы – на 1,8 и фосфатмобилизирующие – на 1,1 %.

Снижению же данного показателя способствовали аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы – на 10,8 %, амилотические микроорганизмы – на 5,6 и общий комплекс культивируемых микроорганизмов – на 4,4 %. Однако достоверных различий по сравнению с контрольным вариантом опыта не наблюдалось.

Заключение

Изучено влияние основных физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм техногенных радионуклидов ^{137}Cs дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС методом последовательной экстракции.

Установлено, что внесение в стерильную почву спорообразующих аммонификаторов снижает содержание ^{137}Cs в водорастворимой форме на 21,7 %, консорциум микроорганизмов из удобрения ЕМ-1 в тех же условиях понижает содержание радионуклида на 52,1 %. Другие исследованные физиологические группы микроорганизмов не оказали существенного влияния на концентрацию ^{137}Cs в водорастворимой форме при 1-месячной экспозиции.

Аммонифицирующие протеолитические микроорганизмы при внесении в стерильную дерново-подзолистую супесчаную почву снижают удельную активность радионуклида в ионообменной форме на 12,5 %. В варианте опыта с применением удобрения ЕМ-1 наблюдалось увеличение удельной активности ^{137}Cs в ионообменной форме на 16,9 %. Другие исследованные физиологические группы микроорганизмов не оказали существенного влияния на концентрацию радионуклида в ионообменной форме.

Библиографические ссылки

1. Никитина ЗИ. *Микробиологический мониторинг наземных экосистем*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1991. 222 с.
2. Condron L, Stark C, O'Callaghan M. The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter. In: *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. New York: Springer Science + Business Media B. V.; 2010. p. 81–117.
3. Кашнер Д. *Жизнь микробов в экстремальных условиях*. Москва: Издательство «Мир»; 1981. 521 с.
4. Звягинцев ДГ. *Биология почв*. Москва: Издательство МГУ; 2005. 445 с.
5. Ajit Varma, Ralf Oelmuller *Advanced Techniques in Soil Microbiology*. Berlin: Springer; 2007. 427 p.
6. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Возняковская ЮМ. *Основные микробиологические и биохимические методы исследования почв*. Ленинград: ВНИИСХМ; 1987. 47 с.
10. Теппер ЕЗ. *Практикум по микробиологии*. Москва: Агропромиздат; 1987. 239 с.
11. Черненко ИВ. Бактериальные азотфиксирующие препараты на почвах, подвергшихся радиоактивному загрязнению. *Агропанорама*. 1997;4:20–21.

References

1. Nikitina ZI. *Mikrobiologicheskii monitoring nazemnykh ekosistem* [Microbiological monitoring of terrestrial ecosystems]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenie; 1991. 222 p. Russian.
2. Condron L, Stark C, O'Callaghan M. The Role of Microbial Communities in the Formation and Decomposition of Soil Organic Matter. In: *Soil Microbiology and Sustainable Crop Production*. New York: Springer Science + Business Media B. V.; 2010. p. 81–117.
3. Kashner D. *Zhizn' mikrobov v ekstremal'nykh usloviyakh* [The life of microbes in extreme conditions]. Moscow: Publishing house «Mir»; 1981. 521 p. Russian.
4. Zvyagintsev DG. *Biologiya pochv* [Soil Biology]. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 2005. 445 p. Russian.
5. Ajit Varma, Ralf Oelmuller *Advanced Techniques in Soil Microbiology*. Berlin: Springer; 2007. 427 p.
6. Nimis PL. Radiocesium in plants of forest ecosystems. *Studia Geobotanica*. 1996;15:3–49.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Wiley: [publisher unknown]; 2002. 452 p.
8. Hou X. Iodine-129 and caesium-137 in chernobyl contaminated soil and their chemical fractionation. *Science of The Total Environment*. 2003;308(1–3):97–109.
9. Voznyakovskaya YuM. *Osnovnye mikrobiologicheskie i biokhimicheskie metody issledovaniya pochv* [Basic microbiological and biochemical methods of soil research]. Leningrad: VNIISHM; 1987. 47 p. Russian.
10. Tepper EZ. *Praktikum po mikrobiologii* [Microbiology Workshop]. Moscow: Agropromizdat; 1987. 239 p. Russian.
11. Chernenok IV. *Bakterial'nye azotfiksiruyushchie preparaty na pochvakh, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu* [Bacterial nitrogen-fixing preparations on soils exposed to radioactive contamination]. *Agropanorama*. 1997;4:20–21. Russian.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023.
Received by editorial board 07.11.2023.