

---

---

# РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

## RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

---

---

УДК 502:628.4.047

### РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ ОСНОВНЫХ ЭКОЛОГО-ТРОФИЧЕСКИХ ГРУПП В ПОСТУПЛЕНИИ $^{137}\text{CS}$ ИЗ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЫ В БИОМАССУ *AVENA SATIVA* L.

Е. А. ТАНКЕВИЧ<sup>1)</sup>, А. Н. НИКИТИН<sup>2)</sup>, Ю. К. СИМОНЧИК<sup>1)</sup>, И. И. КОНЦЕВАЯ<sup>3)</sup>

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

<sup>2)</sup>Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,  
ул. Академика В. Ф. Купревича, 2, 220084, г. Минск, Беларусь

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

В исследовании рассматривается влияние почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на переход  $^{137}\text{Cs}$  из дерново-подзолистой супесчаной почвы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.). Кроме того, оценено воздействие данных микроорганизмов на содержание в исследуемой почве стабильных изотопов К, Са, Sr, Cs в биодоступных формах.

---

#### Образец цитирования:

Танкевич ЕА, Никитин АН, Симончик ЮК, Концевая ИИ. Роль микроорганизмов основных эколого-трофических групп в поступлении  $^{137}\text{Cs}$  из дерново-подзолистой супесчаной почвы в биомассу *Avena sativa* L. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:46–56. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-46-56>

#### For citation:

Tankevich EA, Nikitin AN, Simonchyk YuK, Kantsavaya II. The role of microorganisms of the main ecological and trophic groups in the transfer of  $^{137}\text{Cs}$  from soddy-podzolic sandy loam soil into the biomass of *Avena sativa* L. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;2:46–56. Russian. <https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-46-56>

---

#### Авторы:

**Елена Александровна Танкевич** – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

**Александр Николаевич Никитин** – кандидат сельскохозяйственных наук; заместитель директора по научной работе.

**Юлия Константиновна Симончик** – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

**Ирина Ильинична Концевая** – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии биологического факультета.

#### Authors:

**Elena A. Tankevich**, researcher at the laboratory of radioecology. [elena.karpova1991@mail.ru](mailto:elena.karpova1991@mail.ru)

**Aleksander N. Nikitin**, PhD (agriculture); deputy director for research. [nikitinale@gmail.com](mailto:nikitinale@gmail.com)

**Yuliya K. Simonchyk**, researcher at the laboratory of radioecology. [simonagomel@gmail.com](mailto:simonagomel@gmail.com)

**Irina I. Kantsavaya**, PhD (biology), associate professor at the department of biology, faculty of biology. [ikantsavaya@mail.ru](mailto:ikantsavaya@mail.ru)

Установлено, что внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву амилотических бактерий и спорообразующих аммонификаторов усиливает транслокацию  $^{137}\text{Cs}$  из подземных органов овса в надземные в 1,8–4,3 раза. При этом содержание радионуклида в его подземных органах уменьшается на 29,5 % при внесении в почву спорообразующих аммонификаторов. Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву консорциума микроорганизмов EM-1 снизило накопление  $^{137}\text{Cs}$  в надземных органах овса на 71,8 %, сохраняя при этом уровень содержания радионуклида в корневой системе. В экспериментальной системе, включающей дерново-подзолистую супесчаную почву, растения овса посевного и такие физиологические группы микроорганизмов, как амилотические микроорганизмы или спорообразующие аммонификаторы, происходит существенное увеличение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме в 1,5 и 3,5 раза соответственно, что может объяснить рост накопления радионуклида в надземных органах растения. Внесение в дерново-подзолистую почву консорциума микроорганизмов EM-1 снизило содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме на 32,6 %. Аналогичные по направленности изменения наблюдаются и в отношении водорастворимой формы К: амилотические микроорганизмы и спорообразующие аммонификаторы увеличивают данный показатель на 49,9 и 67,5 % соответственно, а микробиологический препарат EM-1 снижает на 52,9 %.

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

**Благодарность.** Исследования выполнены 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 ROLE OF MICROORGANISMS OF THE MAIN ECOLOGICAL AND TROPHIC GROUPS IN THE TRANSFER OF $^{137}\text{CS}$ FROM SODDY-PODZOLIC SANDY LOAM SOIL INTO THE BIOMASS OF *AVENA SATIVA* L.

*E. A. TANKEVICH<sup>a</sup>, A. N. NIKITIN<sup>b</sup>, Yu. K. SIMONCHYK<sup>a</sup>, I. I. KANTSAVAYA<sup>c</sup>*

<sup>a</sup>*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
4 Fiadzyuninskaga Street, Gomel 246007, Belarus*

<sup>b</sup>*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus,  
2 Academician V. F. Kupreviča Street, Minsk 220084, Belarus*

<sup>c</sup>*Francyisk Skorina Gomel State University,  
104 Saveckaja Street, Gomel 246019, Belarus*

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

In this work, we investigated the influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the transition of cesium-137 from the soddy-podzolic sandy loam soil of the Chernobyl nuclear power plant exclusion zone into the biomass of oats (*Avena sativa* L.). Changes of K, Ca, Sr, Cs bioavailable forms, concentration in the soil under impact of these microorganisms investigated also. It has been established that the introduction of amylolytic bacteria and spore-forming ammonifiers into soddy-podzolic sandy loam soil enhances the translocation of  $^{137}\text{Cs}$  from the underground organs of oats to the aboveground ones by 1,8–4,3 times. At the same time, the radionuclide content in the underground organs of oats decreases by 29.5 % when spore-forming ammonifiers are added to the soil. The introduction of the consortium of microorganisms EM-1 into the soddy-podzolic sandy loam soil reduced the accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  in the above-ground organs of oats by 71,8 %, while maintaining the level of radionuclide content in the root system. In an experimental system including soddy-podzolic sandy loam soil, oat plants and such physiological groups of microorganisms as amylolytic microorganisms or spore-forming ammonifiers, there is a significant increase in the content of  $^{137}\text{Cs}$  in water-soluble form by 1,5 and 3,5 times, respectively, which can explain the increase in accumulation radionuclide in above-ground plant organs.

The introduction of the consortium of microorganisms EM-1 into the soddy-podzolic soil reduced the content of  $^{137}\text{Cs}$  in water-soluble form by 32,6 %. Changes similar in direction are observed in relation to the water-soluble form of K: amylolytic microorganisms and spore-forming ammonifiers increase its concentration by 49,9 and 67,5 %, respectively, and the microbiological preparation EM-1 reduces it by 52,9 %.

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

**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 условиях напряженной экологической ситуации, складывающейся в мире, одной из наиболее актуальных проблем является загрязнение наземных экосистем техногенными радионуклидами [1].

Радиоэкологическая ситуация в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в основном определяется загрязнением окружающей среды  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{238,239,240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ , изменяясь не только с естественным распадом радионуклидов, но и с переходом их в другие физико-химические состояния [2].

Почвенные микроорганизмы являются источниками большого разнообразия физико-химических и биологических механизмов, осуществляющих превращения между растворимыми и нерастворимыми фазами радионуклидов. Чувствительность и высокая индикационная способность микроорганизмов позволяют выбрать их в качестве инструмента мониторинга антропогенных изменений биосферы [3]. Воздействие ассоциаций микроорганизмов на доступность радионуклидов для корневого поступления в растения тесно связано с биогеохимическими процессами, протекающими в почве. Можно выделить два основных направления протекания данных процессов. Во-первых, благодаря деятельности почвенных микроорганизмов нерастворимые соединения радионуклидов переходят в растворимую форму, таким образом увеличивается их потенциальная токсичность. Во-вторых, растворимые радионуклиды закрепляются микроорганизмами и становятся недоступными для корневого поглощения. Отношение между иммобилизацией и мобилизацией непосредственно зависит от радионуклида, вида, физико-химических условий среды и состава микробиоценоза почвы [4].

Проблема перехода техногенных радиоизотопов из почв с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения в растения остается достаточно серьезной и в настоящее время. Изучение роли почвенных ассоциаций микроорганизмов позволит предложить новые методы реабилитации земель, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Цель работы: исследовать влияние основных эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов на изменение физико-химических форм  $^{137}\text{Cs}$  и содержание в биодоступных формах стабильных изотопов K, Ca, Sr, Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве зоны отчуждения Чернобыльской АЭС (в условиях вегетационного эксперимента), а также на переход радиоизотопов  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в биомассу овса посевного (*Avena sativa* L.).

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись основные эколого-трофические группы почвенных микроорганизмов, оказывающие существенное влияние на биологическую доступность техногенных радионуклидов и содержание макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

Дерново-подзолистую супесчаную почву отбирали с глубины 10–15 см в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в частном подворье бывшего населенного пункта Борщевка (Гомельская обл., Беларусь, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник). Почву предварительно очищали от наземных частей растений и просеивали через сито с диаметром отверстий 2 мм, тщательно перемешивали, затем помещали в специальные пластиковые сосуды для выращивания растений объемом 1 л, которые размещали на пластиковых поддонах согласно схеме эксперимента.

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 [5].

В результате посевов на элективные агаризованные питательные среды были получены следующие накопительные культуры:

- 1) амилитические микроорганизмы;
- 2) спорообразующие аммонификаторы.

Также в эксперименте было исследовано влияние микробиологического удобрения EM-1, которое разработано профессором Тэруо Хига (University of the Ryukyus, Япония) и включает в себя 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*).

В экспериментальных работах использовали семена овса посевного производства ОАО «МинскСортСемОвощ». Все работы по отбору посадочного материала, подготовке к посадке семян проводили согласно ГОСТу 12308-84<sup>1</sup>. В каждый горшок высевали по 15 семян выбранной культуры на глубину 1 см, затем в почву при закладке эксперимента и через 15 дней после посева растений вносили по 340 мл суспензий каждой из исследуемых эколого-трофических групп почвенных микроорганизмов (содержащих приблизительно  $1,5 \times 10^8$  КОЕ/мл). Оценку титра микроорганизмов выполняли согласно [6]. В контрольные образцы вносили по 340 мл мясо-пептонного бульона без инокуляции микроорганизмов.

<sup>1</sup>ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Москва: Стандартинформ, 2011. 28 с.

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. Полученные бактериальные культуры помещали в термостат и инкубировали при температуре  $37,0 \pm 0,1$  °С в течение суток до появления визуальной 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 [6]. 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 пятикратной повторности. Продолжительность вегетационного эксперимента составила 30 суток.

Для постановки вегетационного эксперимента была использована фитокомната с регулируемым климатом (рис. 1). В рабочем пространстве фитокомнаты постоянно поддерживалась температура воздуха  $24 \pm 1$  °С, влажность воздуха  $55 \pm 5$  %. Продолжительность искусственного светового дня составила 16 ч при потоке ФАР 100 мкмоль/(м<sup>2</sup>·сек). Для освещения использовались светодиодные лампы ЛД-27-25W-1200-УХЛ4.



Рис. 1. Вегетационный эксперимент в фитокомнате

Fig. 1. Vegetation experiment in the phytoroom

По окончании вегетационного эксперимента срезали надземные части растений. Фитомассу высушивали до абсолютно сухого состояния, измельчали и взвешивали. Образцы помещали в 100 мл сосуды 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 <sup>137</sup>Cs в образцах растений и содержания радионуклида в почве использовали величину удельной активности (УА, Бк/кг). При изучении влияния каждой из физиологических групп почвенных микроорганизмов на изменение биодоступных форм <sup>137</sup>Cs определяли содержание водорастворимой и ионообменной 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. 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  $\gamma$ -спектрометре и ICP-MS.

2. *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. 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  $\gamma$ -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<sup>2</sup>. Относительная ошибка измерения удельной активности <sup>137</sup>Cs в пробах составляла от 5 до 10 % в зависимости от активности образца. Измерение концентрации макро- и микроэлементов в каждом опытном варианте проводили в пятикратной повторности на ICP-MS *Elan-DRCe* (*Perkin Elmer*) согласно СТБ ISO 17294-1-2007 и СТБ ISO 17294-2-2007<sup>3,4</sup>. Микробиологическую индикацию почвы выполняли согласно общепринятым в почвенной микробиологии методам [9; 10]. Агрохимический анализ почвенного образца выполняли согласно ГОСТ<sup>5-10</sup>.

### Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследований установлено, что удельная активность исследуемой дерново-подзолистой супесчаной почвы составила  $13949 \pm 837$  Бк/кг.

Агрохимические показатели данной почвы представлены в табл. 1.

Таблица 1

Агрохимические показатели использованной в эксперименте дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 1

Agrochemical indicators of sod-podzolic sandy loam soil used in the experiment

Агрохимические показатели почвы, единицы измерения	
pH (в KCl), ед.	6,4
Ca (обм), мг/кг	2430
Mg (обм, подв.), мг/кг	83,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (подв), мг/кг	3021
Органическое вещество (гумус), %	3,5
S, сумма поглощенных оснований, ммоль/100г	42,0
Hг, гидролитическая кислотность, ммоль/100г	0,99
T, емкость поглощения, ммоль/100г	42,99
V, степень насыщенности почв основаниями, %	97,7
K <sub>2</sub> O (обм), мг/кг	617

Уровень pH близок к нейтральному. В модельной почве наблюдалось очень высокое содержание обменного кальция, низкое содержание обменного магния. Содержание подвижного фосфора (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) в дерново-подзолистой почве соответствует очень высокому значению. Обеспеченность дерново-подзолистой почвы обменным калием (K<sub>2</sub>O) соответствует также очень высоким показателям. Значительное содержание калия в почве позволило исключить влияние механизмов усиления корневого потребления Cs из почвы в условиях дефицита данного макроэлемента. Содержание гумуса соответствует очень высокому уровню. Сумма поглощенных оснований (S) в дерново-подзолистой почве очень высокая.

<sup>2</sup>МВИ. 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.

<sup>3</sup>СТБ ISO 17294-1-2007 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 1. Общие требования. Введ. 01.05.2008. Минск: Госстандарт, 2008. 32 с.

<sup>4</sup>СТБ ISO 17294-2-2007 Качество воды. Применение масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Ч. 2. Определение 62 элементов. Минск: Госстандарт, 2007. 21 с.

<sup>5</sup>ГОСТ 26483-85. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 6 с.

<sup>6</sup>ГОСТ 26212-2021. Определение гидролитической кислотности по методу Каппена в модификации ЦИНАО. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

<sup>7</sup>ГОСТ 27821-2020. Определение суммы поглощенных оснований по методу Каппена. Введ. 2022-01-01. Москва: Стандартинформ, 2020. 9 с.

<sup>8</sup>ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 1986-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1985. 14 с.

<sup>9</sup>ГОСТ 26207-91. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Введ. 1993-07-01. Москва: Издательство стандартов, 1992. 7 с.

<sup>10</sup>ГОСТ 26213-2021. Методы определения органического вещества. Взамен ГОСТ 26213-91. Введ. 2022-08-01. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.

В табл. 2 представлены данные по оценке влияния почвенных микроорганизмов исследуемых эколого-трофических групп на биологическую доступность  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Таблица 2

Оценка влияния почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на накопление  $^{137}\text{Cs}$  овсом посевным

Table 2

Assessment of the influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by oats

Варианты опыта	Удельная активность, Бк/кг	
	Подземная часть	Надземная часть
Контроль	9539,6 ± 1471,0	1334,8 ± 216,5
Амилолитические	11071 ± 2334,2	2769,8 ± 1522,8*
Спорообразующие аммонификаторы	6730 ± 1797,5**	4081,4 ± 2017,2**
ЕМ-1	10225,6 ± 1594,7	376,3 ± 140,4**

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ .

Внесение в почву спорообразующих аммонификаторов привело к снижению удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в подземных органах растения на 29,5 %, а в надземных – практически к трехкратному увеличению. Данные результаты свидетельствуют об усилении транслокации радионуклида в надземные органы под воздействием спорообразующих аммонификаторов.

Эффект внесения амилолитических бактерий в почву на накопление  $^{137}\text{Cs}$  в корнях овса оказался несущественным. Однако данная группа микроорганизмов привела к повышению содержания радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в надземных частях растения. Следовательно, как амилолитические микроорганизмы, так и спорообразующие аммонификаторы существенно увеличивают транслокацию цезия из подземных органов растения в надземные. Данное явление может быть связано с выделением микроорганизмами данных эколого-трофических групп биологически активных соединений, усиливающих активность калиевых каналов выходящего выпрямления (SKOR), обеспечивающих выброс  $\text{K}$ , а вместе с ним и  $\text{Cs}$ , из клеток паренхимы корня в ксилему стебля. Микробиологическое удобрение ЕМ-1 не оказало значимого влияния на накопление  $^{137}\text{Cs}$  подземными частями растениями. Хотя среднеарифметическое значение оказалось в этом варианте на 7,2 % выше, чем в контроле, статистическая значимость этого изменения невысока вследствие высокой вариабельности показателя.

Более выраженный эффект оказал консорциум микроорганизмов ЕМ-1 на переход  $^{137}\text{Cs}$  в надземные органы овса посевного. Снижение накопления радионуклида в этом варианте опыта составило 71,8 % относительно контроля. Таким образом, данный комплекс микроорганизмов не столько привел к снижению корневого поступления радионуклида, сколько снизил его транслокацию из подземных органов в надземные.

В результате оценки содержания  $^{137}\text{Cs}$  в биодоступных формах в дерново-подзолистой супесчаной почве после завершения вегетационного эксперимента установлено, что спорообразующие аммонификаторы увеличили концентрацию радионуклида в водорастворимой форме в 3,5 раза (табл. 3).

Таблица 3

Влияние почвенных микроорганизмов основных эколого-трофических групп на содержание водорастворимой и ионообменной формы  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистой супесчаной почве

Table 3

The influence of soil microorganisms of the main ecological-trophic groups on the content of water-soluble and ion-exchange forms of  $^{137}\text{Cs}$  in soddy-podzolic sandy loam soil

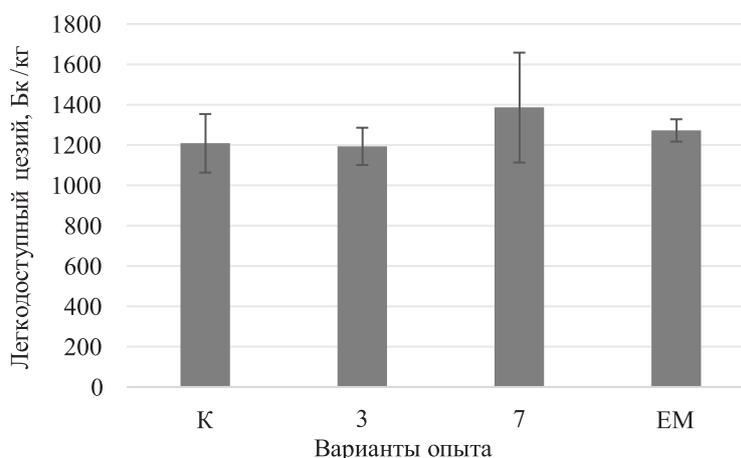
Варианты опыта	Водорастворимая форма $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг	Ионообменная форма $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг
Контроль	27,8 ± 4,5	1180,5 ± 145,6
Амилолитические	42,2 ± 9,7**	1151,2 ± 94,0
Спорообразующие аммонификаторы	126,6 ± 67,9**	1259,1 ± 322,9
ЕМ-1	18,7 ± 4,3**	1253,8 ± 53,0

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ .

Следует отметить, что в модельном эксперименте спорообразующие аммонификаторы несколько уменьшили содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме [5]. Однако в более естественной системе, включающей полный комплекс почвенных микроорганизмов и высшее растение, увеличение в почвенном образце количества микроорганизмов, относящихся к данной группе, наоборот, способствует повышению концентрации радионуклида в биодоступной форме по сравнению с контрольным вариантом. Данный результат согласуется с максимальным увеличением накопления радиоактивного изотопа цезия в надземных органах овса при внесении рассматриваемой группы микроорганизмов в почву. При этом среднеарифметическое значение активности  $^{137}\text{Cs}$  в ионообменной форме при внесении спорообразующих аммонификаторов увеличилось на 6,7 %, но различия с контролем статистически недостоверны.

Амилолитические микроорганизмы также повлияли на увеличение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме. Данный показатель увеличился на 51,6 % относительно контроля. При этом содержание радионуклида в ионообменной форме осталось на контрольном уровне. Повышение активности  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме при внесении амилолитических бактерий в дерново-подзолистую супесчаную почву отразилось на усилении перехода радионуклида в надземные органы. Среди групп микроорганизмов, включенных в схему эксперимента, только комплекс, входящий в EM-1, снизил активность  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме. Снижение составило 32,6 % относительно контрольного варианта опыта. Падение активности радионуклида в водорастворимой форме отразилось на существенном уменьшении его перехода в надземные органы овса посевного. Таким образом, в условиях высокой обеспеченности растений на дерново-подзолистой супесчаной почве калием, накопление  $^{137}\text{Cs}$  в надземных органах овса соответствует его содержанию в водорастворимой форме. Поскольку содержание радионуклида в данной форме можно рассматривать в качестве показателя его концентрации в почвенном растворе, наблюдаемый эффект согласуется с известными закономерностями корневого поступления радиоизотопов цезия растениями.

На рис. 2 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный)  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с  $\alpha = 0,05$   
Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), EM-1 (EM)  
Error bars indicate confidence intervals with  $\alpha = 0.05$   
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

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

Fig. 2. The concentration of readily available  $^{137}\text{Cs}$  in soddy-podzolic sandy loam soil

Среднее значение содержания легкодоступного  $^{137}\text{Cs}$  при внесении в почву различных физиологических групп микроорганизмов увеличилось в следующих вариантах опыта: спорообразующие аммонификаторы – на 14,7 %, микробиологический препарат EM-1 – на 5,3 %. Амилолитическая группа микроорганизмов оказала влияние на снижение содержания легкодоступного цезия-137 на 2,2 % по сравнению с контрольным вариантом опыта. Однако данные изменения не являются статистически значимыми.

Влияние почвенных микроорганизмов различных эколого-трофических групп на содержание в биодоступных формах таких макроэлементов, как Са и К в дерново-подзолистой супесчаной почве, представлено в табл. 4.

В условиях высокого содержания калия в дерново-подзолистой супесчаной почве внесение микробиологического удобрения EM-1 снизило содержание обсуждаемого макроэлемента в водорастворимой форме на 52,9 %, что демонстрирует тенденцию к его уменьшению в этом варианте опыта. Однако это не привело к повышению уровня накопления  $^{137}\text{Cs}$  в надземной биомассе овса посевного.

Содержание Са и К в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 4

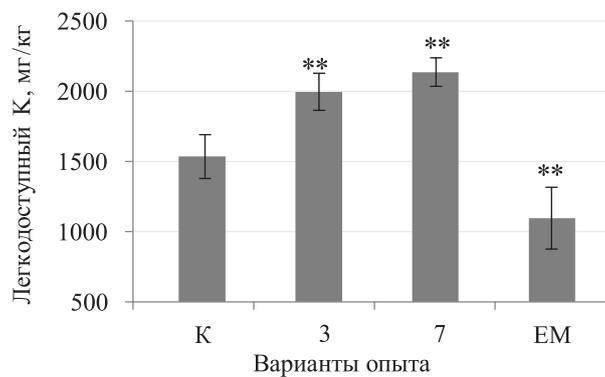
Concentration of Ca and K in the samples of soddy-podzolic soil

Варианты опыта	Са		К	
	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг	Водорастворимая форма, мг/кг	Ионообменная форма, мг/кг
Контроль	1167,6 ± 282,0	8406,7 ± 561,6	696,9 ± 53,8	837,9 ± 127,3
Амилолитические	1120,4 ± 307,3	9300,9 ± 943,0*	1044,5 ± 137,8**	951,3 ± 120,1
Спорообразующие аммонификаторы	1083,1 ± 162,6	9427,6 ± 1025,2*	1167,0 ± 164,7**	969,1 ± 256,7
ЕМ-1	522,8 ± 54,2**	8917,3 ± 332,9*	328,3 ± 75,8**	768,2 ± 157,8

Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ .

В водорастворимой форме концентрация К увеличилась в варианте опыта с амилолитическими микроорганизмами – на 49,9 % и спорообразующими аммонификаторами на 67,5 %. Тенденция к сходному эффекту имеет место и в отношении ионообменной формы калия.

На рис. 3 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) К в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Плankи погрешностей указывают доверительные интервалы с  $\alpha = 0,05$ .

Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (\*\*  $p < 0,01$ )

Варианты опыта: контроль (К), амилолитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), ЕМ-1 (ЕМ)

Error bars indicate confidence intervals with  $\alpha = 0,05$ .

Significant differences from the control are marked with asterisks (\*\*  $p < 0,01$ )

Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

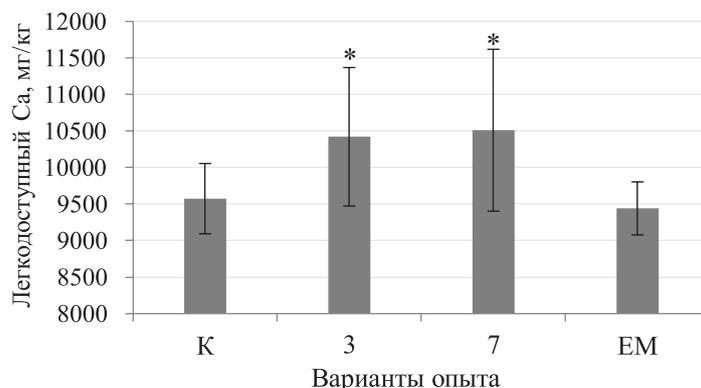
Рис. 3. Содержание легкодоступного К в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 3. The concentration of readily available K in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

Увеличение легкодоступного К наблюдали в варианте с амилолитическими микроорганизмами на 30,0 %, спорообразующими аммонификаторами на 39,2 %, снижение содержания К отмечали в варианте опыта ЕМ – на 28,6 %. Во всех исследуемых группах определены достоверные различия относительно контрольного образца. Наиболее существенное снижение Са в водорастворимой форме наблюдали в варианте опыта ЕМ-1 – на 55,2 %. Для ионообменной формы характерно же увеличение исследуемого макроэлемента во всех вариантах опыта. Значительно возросло содержание Са в ионообменной форме под влиянием спорообразующих аммонификаторов – на 12,1 % относительно контрольного варианта.

На рис. 4 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Са в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Содержание легкодоступного Са повысилось в варианте с амилолитическими микроорганизмами на 8,8 % и в варианте опыта со спорообразующими аммонификаторами на 9,8 % по сравнению с контрольным образцом.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с  $\alpha = 0,05$ .  
Значимые отличия от контроля отмечены звездочками ( $*p < 0,05$ )  
Варианты опыта: контроль (К), амилитические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), EM-1 (EM)  
Error bars indicate confidence intervals with  $\alpha = 0.05$ .  
Significant differences from the control are marked with asterisks ( $*p < 0.05$ )  
Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 4. Содержание легкодоступного Ca в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 4. The concentration of readily available Ca in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

В табл. 5 представлены данные о содержании стабильных изотопов  $^{133}\text{Cs}$  и  $^{88}\text{Sr}$  в вегетационном эксперименте с внесением различных эколого-трофических групп микроорганизмов в дерново-подзолистую супесчаную почву.

Таблица 5

Содержание Cs и Sr в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Table 5

Concentration of Cs and Sr in the samples of soddy-podzolic soil

Варианты опыта	Cs		Sr	
	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг	Водорастворимая форма, мкг/кг	Ионообменная форма, мкг/кг
Контроль	0,4 ± 0,1	59,4 ± 5,3	9428 ± 1959,4	59595,5 ± 3730,6
Амилитические	0,4 ± 0,1	55,5 ± 4,7	10117,2 ± 1519,2	60272,5 ± 3296,7
Спорообразующие аммонификаторы	0,5 ± 0,1	51,8 ± 7,9*	8815,8 ± 1087,6	56004,6 ± 7636,5
EM-1	0,2 ± 0,1*	53,0 ± 1,0**	4698,9 ± 581,6**	48963,4 ± 694,9**

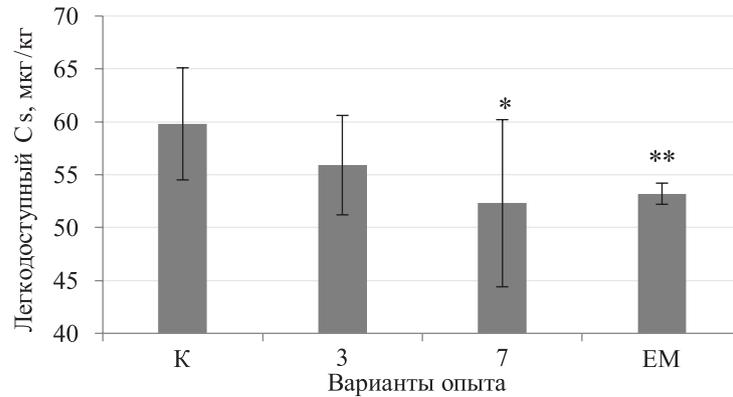
Примечание. Различия достоверны по отношению к контролю  $*p < 0,05$ ;  $**p < 0,01$ .

Снижение содержания Cs в водорастворимой форме отмечали в варианте опыта EM-1 – на 42,8 %, при этом наблюдаемые различия являются достоверными. Сходный эффект установлен и в отношении радиоактивного изотопа  $^{137}\text{Cs}$  при внесении в дерново-подзолистую супесчаную почву данного консорциума микроорганизмов. В ионообменной форме отмечали снижение количества Cs при внесении спорообразующих аммонификаторов – на 12,7 %, EM-1 – на 10,8 %.

На рис. 5 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Cs в дерново-подзолистой супесчаной почве.

Во всех опытных вариантах отмечали снижение содержания легкодоступного Cs: амилитические микроорганизмы – на 6,5 %, спорообразующие аммонификаторы – на 12,6 %, EM – на 11,0 %.

На уменьшение содержания Sr в водорастворимой форме оказали влияние спорообразующие аммонификаторы – на 6,5 % и микробиологический препарат EM-1 – на 50,2 %. Амилитические же микроорганизмы способствовали увеличению концентрации данного микроэлемента в водорастворимой форме на 7,3 % относительно контрольного варианта опыта. Аналогичное действие оказали исследуемые группы и на содержание данного микроэлемента в ионообменной форме: спорообразующие аммонификаторы и микробиологический препарат EM-1 повлияли на уменьшение содержания Sr – на 6,0 и 17,8 % соответственно. Статистически значимые различия наблюдались только в варианте опыта при внесении EM-1 как в водорастворимой форме, так и в ионообменной.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с  $\alpha = 0,05$ .

Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (\* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$ )

Варианты опыта: контроль (К), амилотические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), EM-1 (EM)

Error bars indicate confidence intervals with  $\alpha = 0.05$ .

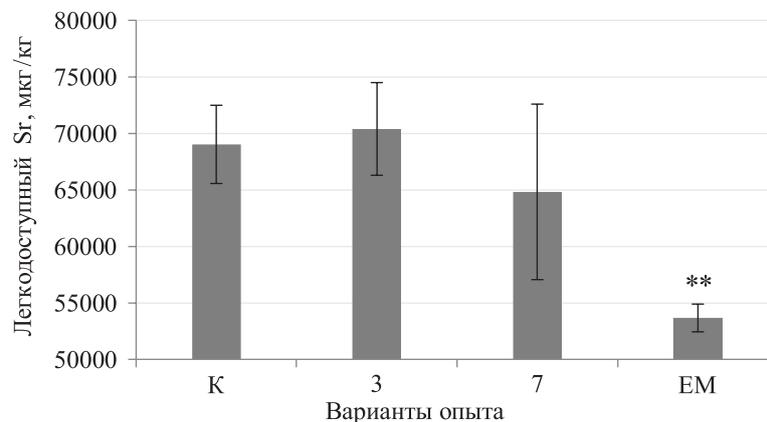
Significant differences from the control are marked with asterisks (\* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$ )

Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 5. Содержание легкодоступного Cs в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 5. The concentration of readily available Cs in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

На рис. 6 показано влияние исследуемых эколого-трофических групп микроорганизмов на содержание легкодоступного (водорастворимый + ионообменный) Sr в дерново-подзолистой супесчаной почве.



Планки погрешностей указывают доверительные интервалы с  $\alpha = 0,05$ .

Значимые отличия от контроля отмечены звездочками (\*\* –  $p < 0,01$ )

Варианты опыта: контроль (К), амилотические (3), спорообразующие аммонификаторы (7), EM-1 (EM)

Error bars indicate confidence intervals with  $\alpha = 0.05$ .

Significant differences from the control are marked with asterisks (\*\* –  $p < 0.01$ )

Experiment options: control (K), amylolytic (3), spore-forming ammonifiers (7), EM-1 (EM)

Рис. 6. Содержание легкодоступного Sr в образцах дерново-подзолистой супесчаной почвы

Fig. 6. The concentration of readily available Sr in samples of soddy-podzolic sandy loam soil

Наибольшему снижению содержания легкодоступного Sr способствовал консорциум микроорганизмов микробиологического препарата EM-1 – на 22,3 % по сравнению с контрольным вариантом опыта.

## Заключение

Исследовано влияние основных эколого-трофических групп микроорганизмов на биологическую доступность  $^{137}\text{Cs}$  для корневого поглощения растениями, а также содержание в биодоступных формах некоторых макро- и микроэлементов в дерново-подзолистой супесчаной почве.

В вегетационном эксперименте внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву амилотических бактерий и спорообразующих аммонификаторов усиливает транслокацию  $^{137}\text{Cs}$  из подземных органов овса в надземные в 1,8–4,3 раза. При этом содержание радионуклида в корнях овса даже уменьшается на

29,5 % при внесении в почву спорообразующих аммонификаторов. Внесение в дерново-подзолистую супесчаную почву консорциума микроорганизмов EM-1 снизило накопление  $^{137}\text{Cs}$  в надземных органах овса на 71,8 %, при сохранении уровня содержания радионуклида в корневой системе.

В экспериментальной системе, включающей дерново-подзолистую супесчаную почву, растения овса посевого и такие группы микроорганизмов, как амилитические микроорганизмы или спорообразующие аммонификаторы, происходит существенное возрастание содержания  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме в 1,5 и 3,5 раза соответственно, что может объяснить увеличение накопления радионуклида в надземных органах растения. Внесение в дерново-подзолистую почву консорциума микроорганизмов EM-1 снизило содержание  $^{137}\text{Cs}$  в водорастворимой форме на 32,6 %. Аналогичные по направленности изменения наблюдаются и в отношении водорастворимой формы К: амилитические микроорганизмы и спорообразующие аммонификаторы увеличивают данный показатель на 49,9 и 67,5 % соответственно, а микробиологический препарат EM-1 снижает на 52,9 %.

Полученные результаты показывают возможность регулирования поведения  $^{137}\text{Cs}$  в системе «почва – растение» за счет воздействия на состав почвенного микробиома. Они могут служить основой для разработки новых приемов фиторемедиации почв, загрязненных долгоживущими продуктами деления урана, а также должны учитываться при ведении растениеводства на загрязненных техногенными радионуклидами территориях.

### Библиографические ссылки

1. Zhang P, Brady PV, editors. *Geochemistry of Soil Radionuclides*. Madison: [publisher unknown]; 2002. 263 p.
2. Паренюк ЕЮ, Шаванова ЕЕ, Ильенко ВВ, и др. Влияние почвенной микрофлоры на переход  $^{137}\text{Cs}$  в растения. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2015;55(1):51–56.
3. Никитина ЗИ. *Микробиологический мониторинг наземных экосистем*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1991. 222 с.
4. Панов АВ, Фесенко СВ, Санжарова НИ, Алексахин РМ. Реабилитация зон локальных радиоактивных загрязнений. *Атомная энергия*. 2006;100(2):125–134.
5. 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.
6. *Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам*. Москва: Федеральный центр государственного надзора Минздрава России; 2004. 91 с.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Malden, MA: Wiley-Blackwell; 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.

### References

1. Zhang P, Brady PV, editors. *Geochemistry of Soil Radionuclides*. Madison: [publisher unknown]; 2002. 263 p.
2. Parenyuk EYu, Shavanova EE, Il'enko VV, et al. *Vliyanie pochvennoi mikroflory na perekhod  $^{137}\text{Cs}$  v rasteniya* [Influence of soil microflora on the transfer of  $^{137}\text{Cs}$  to plants]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology]. 2015;55(1):51–56. Russian.
3. Nikitina ZI. *Mikrobiologicheskii monitoring nazemnykh ekosistem* [Microbiological monitoring of terrestrial ecosystems]. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenie; 1991. 222 p. Russian.
4. Panov AV, Fesenko SV, Sanzharova NI, Aleksakhin RM. *Reabilitatsiya zon lokal'nykh radioaktivnykh zagryaznenii* [Rehabilitation of areas of local radioactive contamination]. *Atomnaya energiya* [Atomic Energy]. 2006;100(2):125–134. Russian.
5. Tankevich EA, Nikitin AN, Kontsevaya II, Simonchik YuK. *Znachenie osnovnykh fiziologicheskikh grupp mikroorganizmov v izmenenii fiziko-khimicheskikh form tekhnogennykh radionuklidov v dernovo-podzolistoi pochve zony otchuzhdeniya Chernobyl'skoi AES* [The significance of the main physiological groups of microorganisms in changes in the physicochemical forms of technogenic radionuclides in the soddy-podzolic soil of the Chernobyl Nuclear Power Plant exclusion zone]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2024;1:4–11. Russian.
6. *Opredelenie chuvstvitel'nosti mikroorganizmov k antibakterial'nym preparatam* [Determination of the sensitivity of microorganisms to antibacterial drugs]. Moscow: Federal'nyi tsentr gossanepidnadzora Minzdrava Rossii; 2004. 91 p. Russian.
7. Ure AM, Davidson CM. *Chemical speciation in the environment*. Second edition. Malden, MA: Wiley-Blackwell; 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.

Статья поступила в редакцию 11.04.2024.  
Received by editorial board 11.04.2024.