

УДК 574.2:539.16.04

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ^{137}Cs РАСТЕНИЯМИ ТРАВЯНИСТЫХ СООБЩЕСТВ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС НА ЭТАПЕ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ

А. Н. НИКИТИН^{1), 2)}, О. А. ШУРАНКОВА¹⁾, С. А. КАЛИНИЧЕНКО³⁾, Е. В. МИЩЕНКО¹⁾, Г. А. ЛЕФЕРД¹⁾

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

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

³⁾Полесский государственный радиационно-экологический заповедник,
ул. Терешковой, 7, 247618, Хойники, Гомельская обл., Беларусь

Радиоактивные изотопы Cs в значительной степени определяют тяжесть радиационных аварий с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. Поэтому актуальным является выявление закономерностей их поведения в различных экосистемах, переход по пищевым цепям, а также поиск эффективных методов воздействия на эти процессы. Цель исследования – поиск закономерностей накопления ^{137}Cs травянистыми растениями естественных экосистем на этапе отдаленных последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Работы проводились на трех экспериментальных полигонах, расположенных на расстоянии 13–16 км от эпицентра аварии. На каждом полигоне заложены пробные площадки, на которых изучена характеристика растительного покрова и почвы. Для подтверждения влияния режима увлажнения на накопление ^{137}Cs растениями также был поставлен микроvegetационный опыт. Анализ результатов наблюдений в травянистых экосистемах не позволил выявить непосредственную связь между показателями валового загрязнения почвы ^{137}Cs , содержанием его растворимой, ионообменной и лабильной форм нахождения в почве с накоплением радионуклида надземными частями *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Poa pratensis* L. и *Carex brizoides* L. Среди комплекса эдафических факторов наиболее тесную связь с удельной активностью ^{137}Cs в надземных частях злаковых растений имеют объемная доля воды в почве, содержание в ней подвижного K_2O и лабильной, извлекаемой тетрафенилборатом, формы радионуклида. Обратный экспоненциальный характер связи этих параметров с накоплением ^{137}Cs опосредован K-зависимыми механизмами поглощения Cs и снижением эффективной диффузии K из почвенного раствора к поверхности корня при уменьшении влажности почвы. Для *Carex brizoides* K-зависимый механизм регуляции корневого поглощения Cs не подтвержден. Эксперимент в контролируемых условиях подтвердил существенное увеличение накопления ^{137}Cs злаковыми растениями при снижении влагообеспеченности, обусловленное активацией переносчиков K с высокой аффинностью как к этому элементу, так и к Cs.

Образец цитирования:

Никитин АН, Шуранкова ОА, Калининченко СА, Мищенко ЕВ, Леферд ГА. Особенности накопления ^{137}Cs растениями травянистых сообществ в ближней зоне Чернобыльской АЭС на этапе отдаленных последствий радиационной аварии. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2024;2:57–67.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-57-67>

For citation:

Nikitin AN, Shurankova OA, Kalinichenko SA, Mishchanka EV, Leferd GA. Patterns of ^{137}Cs accumulation in herbaceous plant communities near the Chernobyl nuclear power plant in the aftermath of the accident. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2024;2:57–67. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2024-2-57-67>

Авторы:

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

Ольга Александровна Шуранкова – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

Сергей Александрович Калининченко – кандидат биологических наук, доцент; заведующий лабораторией спектрометрии и радиохимии.

Мищенко Егор Викторович – заведующий лабораторией радиоэкологии.

Леферд Галина Аркадьевна – научный сотрудник лаборатории радиоэкологии.

Authors:

Aleksander N. Nikitin, PhD (agriculture); deputy director for research.

nikitinale@gmail.com

Olga A. Shurankova, researcher at the laboratory of radioecology.

shurankova@list.ru

Sergey A. Kalinichenko, PhD (biology), docent; head of the laboratory of spectrometry and radiochemistry.

s-a-k@list.ru

Egor V. Mishchanka, head of the laboratory of radioecology.

egormischenko@gmail.com

Galina A. Leferd, researcher at the laboratory of radioecology.

ikantsavaya@mail.ru

Ключевые слова: цезий-137; почва; влажность почвы; формы нахождения радионуклида; калий; злак; осока.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы.

PATTERNS OF ^{137}Cs ACCUMULATION IN HERBACEOUS PLANT COMMUNITIES NEAR THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT IN THE AFTERMATH OF THE ACCIDENT

A. N. NIKITIN^{a,b}, O. A. SHURANKOVA^a, S. A. KALINICHENKO^c, E. V. MISHCHANKA^a, G. A. LEFERD^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 Academician V. F. Kupreviča Street, Minsk 220084, Belarus*

^c*Polesie State Radioecological Reserve,
7 Tserashkovai Street, Khoyniki 247618, Gomel region, Belarus
Corresponding author: A. N. Nikitin (nikitinal@gmail.com)*

Radioactive cesium isotopes often significantly determine the severity of nuclear accidents with the release of radioactive substances into the environment. Therefore, identifying the patterns of their behavior in various ecosystems, their transfer in food chains, and design effective methods for regulation of these processes are of current interest. The aim of this work was to find the patterns of ^{137}Cs accumulation by herbaceous plants in natural ecosystems at the stage of the remote consequences of the Chernobyl NPP disaster. Three experimental sites were selected at a distance of 13–16 km from the accident epicenter. At each site, sample plots were established to study the characteristics of the vegetation cover and soil. To confirm the impact of the moisture regime on the accumulation of ^{137}Cs by plants, a vegetation experiment was also conducted. The analysis did not reveal a direct link between the gross soil contamination indicators with ^{137}Cs , its soluble, ion-exchange, and labile forms in the soil with the accumulation of the radionuclide by the above-ground parts of *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth, *Poa pratensis* L. and *Carex brizoides* L. Among the complex of edaphic factors, the closest relationship with the specific activity of ^{137}Cs in the aboveground parts of cereal plants is associated with the volumetric water content in the soil, the content of mobile K_2O , and the labile form of the radionuclide extractable with tetraphenylborate. The inverse exponential character of the relationship between these parameters and the accumulation of ^{137}Cs is mediated by K-dependent mechanisms of Cs absorption and a decrease in the effective diffusion of K from the soil solution to the root surface as soil moisture decreases. For the sedge, the K-dependent mechanism of regulating the root absorption of Cs was not confirmed.

An experiment under controlled conditions confirmed a significant increase in the accumulation of ^{137}Cs by grass plants with a decrease in moisture availability, caused by the activation of K transporters with high affinity for both this element and Cs.

Keywords: cesium-137; soil; soil moisture; radionuclide speciation; potassium; cereal plants; sedge

Acknowledgments. This work was supported by the State Program of Scientific Research «Environmental Management and Ecology» for 2016–2020.

Введение

Радиоактивные изотопы Cs (^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs) имеют техногенное происхождение и могут попадать в окружающую среду при штатном функционировании и аварийных ситуациях на объектах ядерного топливного цикла, а также при испытаниях ядерного оружия. ^{137}Cs [1] часто становится основным дозобразующим радионуклидом для человека и биоты на протяжении продолжительного периода отдаленных последствий радиационных аварий. В наземных экосистемах он сосредотачивается преимущественно в почве, откуда может поступать в пищевые цепи, ведущие к человеку. Одной из наиболее эффективных мер снижения доз внутреннего облучения населения от ^{137}Cs является ограничение его перехода в системе «почва – растение» [2].

Для разработки и эффективного применения мер радиационной защиты необходима информация о влиянии различных факторов на поведении RCs в системе «почва – растение». Поэтому естественно, что большое внимание исследователей уделяется этому вопросу [3–10]. Было установлено, что далеко не весь запас RCs в почве доступен для корневого поглощения, поскольку он поступает в растения преимущественно из почвенного раствора [11; 12]. Соотношение между сорбцией Cs в твердой фазе и концентрацией его

в почвенном растворе выражается коэффициентом распределения, составляющим порядка 10^1 – 10^5 [13], и постепенно увеличивающимся со временем после попадания радионуклидов в почву. В твердой фазе почвы Cs также может находиться в различных состояниях: в почвенном поглощающем комплексе, на участках селективной сорбции (FES) и на участках высокоселективной сорбции [14; 15]. С течением времени происходит перераспределение RCs между этими формами, приводящее к снижению его биологической доступности («закреплению»). Важную роль в этих процессах играют такие факторы, как содержание в почве глинистых минералов, качественные и количественные характеристики органического вещества почвы, pH, концентрация K^+ и NH_4^+ в почвенном растворе [6; 16]. В случае выпадений RCs в составе топочных частиц, следует также учитывать динамику их распада и выхода RCs из их состава [14].

Гидратированные ионы Cs^+ близки по своим характеристикам к гидратированным ионам K^+ и могут проходить через каналы и некоторые трансмембранные переносчики последнего, поэтому метаболизм калия у растений влияет на поглощение ионов Cs и их перераспределение по органам и тканям [11; 12; 17].

В связи с особенностями поведения в почве и корневого поглощения RCs, зависимость их накопления в растениях от факторов окружающей среды имеет сложный характер, изменяющийся во времени. Вместе с тем выявление данных закономерностей важно для оценки и прогноза радиоэкологических последствий аварий с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду и эффективного применения мер радиационной защиты.

Было подобрано три экспериментальных полигона. На каждом из них заложены пробные площадки, на которых изучена характеристика растительного покрова и почвы. Для подтверждения влияния режима увлажнения на накопление ^{137}Cs растениями был поставлен микровегетационный опыт. Собранный набор данных послужил основой для анализа зависимости накопления ^{137}Cs надземными частями растений от эдафических факторов и форм нахождения радионуклида в почве.

Результаты выполненного анализа раскрывают видоспецифическую реакцию накопления RCs надземными частями растений на действие таких факторов, как обеспеченность K, влагообеспеченность, содержание обменных Ca, Mg в почве, содержание органического вещества, доля глинистой фракции.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные полигоны. Для проведения исследования было заложено три экспериментальные полигона (ЛП-1, ЛП-2 и ЛП-3) в естественных экосистемах суходольных лугов, расположенных на расстоянии 13–16 км от четвертого энергоблока Чернобыльской атомной электростанции, в окрестностях бывшей деревни Масаны. Почва на всех экспериментальных участках дерново-подзолистая супесчаная. На каждом экспериментальном полигоне было выделено 20 пробных площадок 2×2 м. Полевые исследования проводились весной–летом 2020 г., непосредственно отбор образцов растений и почвы осуществлялся в июне.

Среднее проективное покрытие растительного покрова на экспериментальных полигонах составляло 100 %, 75 и 60 % на ЛП-1, ЛП-2 и ЛП-3 соответственно. Для выявления закономерностей накопления ^{137}Cs были выбраны наиболее распространенные на полигонах виды растений: пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* (L.) Roth), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) и осока трясунковидная (*Carex brizoides* L.). Кроме этих видов, растительность на экспериментальных полигонах была представлена *Agrostis canina* L., *Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth, *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Corynephorus canescens* (L.) P. Beauv., *Trifolium hybridum* L., *Artemisia vulgaris* L., *Polygonum orientale* L., *Rumex acetosa* L., *Asarum europaeum* L., *Melandrium album* (Mill.) Garcke, *Viola arvensis* Murr., *Ranunculus acris* L., *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Veronica chamaedrys* L., *Equisetum arvense* L. и других травянистых растений. В состав очень разреженного древесного яруса входят такие виды, как береза повислая (*Betula pendula* Roth), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.).

Микровегетационный опыт. В качестве модельного растения использована пшеница яровая. Растения выращивались в контейнерах объемом 1 л, наполненных почвой, отобранной в частном подворье на территории бывшего населенного пункта Борщевка. Почва характеризовалась очень высоким содержанием органического вещества (4,27–6,33 %) и нейтральной кислотностью (6,6–6,7). Содержание подвижного фосфора (P_2O_5) очень высокое (1552–3245 мг/кг), подвижного калия (K_2O) – высокое (224–372 мг/кг). Содержание обменного магния и кальция повышенное. Почва характеризуется средними значениями гидролитической кислотности (0,89–1,20 мм/100 г), емкости поглощения (41,2–68,9 мм/100 г), степени насыщенности основаниями (97,1–98,7 %) и суммой поглощенных оснований (40,0–69,2 мм/100 г).

Для исследования влияния режима увлажнения в опыте было предусмотрено 3 варианта: 1) оптимальное увлажнение – выращивание растений при влажности почвы 70 % от полной влагоемкости (ПВ); 2) пониженная влагообеспеченность – выращивание растений при влажности почвы 40 % от ПВ; 3) переменное увлажнение – выращивание растений при влажности почвы 40 % от ПВ в первые

21 сутки и последующее доведение влажности до 70 % от ПВ. Опыт выполнялся в 4-кратной повторности в фитокомнате с постоянной температурой воздуха 18 °С и освещением на протяжении 18 ч в сутки с ФАР 100 мМ·с⁻¹·м⁻². Влажность почвы контролировалась весовым методом.

Отбор образцов и измерения. Образцы почвы на пробных площадках отбирались стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см. С каждого пробного участка отбиралось по пять проб методом конверта, которые смешивались в одну и упаковывались в полиэтиленовые пакеты. Одновременно с почвой отбирались образцы надземных частей выбранных видов растений путем срезания секатором на высоте 3 см от поверхности почвы. В микроvegetационном опыте растения срезались на высоте 0,5–1 см, почва для анализа отбиралась из каждого сосуда. Образцы растений упаковывались в полиэтиленовые пакеты.

Пробы растений и почвы взвешивались на электронных весах в день отбора проб (сырая масса) и после высушивания при комнатной температуре (воздушно-сухая масса). Содержание влаги в почве и растительных пробах рассчитывалось по разнице между сырой и воздушной массой. Высушенные пробы почвы просеивались через 2-миллиметровое сито и перемешивались.

Удельная активность ¹³⁷Cs определялась с использованием гамма-спектрометра *Canberra Packard с Ge детектором GX2018*. Относительная ошибка измерений составляла 5–10 %. Стандартными методами в образцах почвы определялись такие показатели, как содержание глины в механическом составе; рН (в KCl); содержание обменного NH₄⁺; содержание органического вещества; содержание подвижных P₂O₅ и K₂O; содержание ионообменных калия, кальция, магния, цезия (смеси изотопов и ¹³⁷Cs); содержание растворимых калия, кальция, магния, цезия (смеси изотопов и ¹³⁷Cs); содержание лабильных (извлекаемых тетрафенилборатом натрия при экспозиции 24 ч) калия и цезия (смеси изотопов и ¹³⁷Cs); объемная доля воды в почве.

Анализ данных. Анализ данных и представление результатов осуществлялись с помощью библиотеки *Python Pandas, Geopandas, numpy, Sklearn, Pyplot* и *Seaborn*. При описании исследуемых показателей находили среднеарифметическое значение, среднеквадратичное отклонение, медиану, межквартильный размах. Оценку связи между показателями определяли по коэффициентам ранговой корреляции Спирмена (R_s). Для анализа влияния отдельных факторов на накопление радионуклида растениями использовали критерий Краскела – Уоллиса (H), а значимость различий между вариантами опыта устанавливали по *t*-критерию Стьюдента. Выявленные связи и различия между показателями считали значимыми при *p* < 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

Характер загрязнения экспериментальных полигонов ¹³⁷Cs. Плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs (ПЗ) на пробных площадках варьирует в широких пределах: от 980 до 5327 кБк/м² со средним значением 2973 кБк/м². В пределах экспериментальных полигонов загрязнение ¹³⁷Cs характеризуется высоким уровнем мозаичности. Объяснением этому является существенный вклад топливных частиц, выпадения которых носили дискретный вероятностный характер, в отличие от более равномерного выпадения конденсационной компоненты загрязнения [18]. Различия в средних показателях ПЗ ¹³⁷Cs между исследовательскими полигонами не проявляются.

Содержание ¹³⁷Cs в водорастворимой форме в почве пробных площадок не превышает 0,55 % от валового запаса. В ионообменной форме находится 1,9–15,5 % валового запаса радионуклида. Извлекаемые тетрафенилборатом Cs и K обычно обозначают как лабильные формы и рассматривают их в качестве показателя запаса, доступного для активного корневого поглощения на протяжении вегетационного периода [19–21]. Спустя 35 лет после аварии на Чернобыльской АЭС в ближней зоне загрязнения содержание данной формы радионуклида в почве составляет от 6,7 до 83,8 % от валового запаса со средним значением 41,6 % и межквартильным размахом 32,8–48,4 %.

Различия в содержании водорастворимой и ионообменной форм ¹³⁷Cs между экспериментальными полигонами не выражены на фоне сильной вариабельности этих показателей (рис. 1). Содержание лабильной формы ¹³⁷Cs в почве экспериментального полигона ЛП-1 (наиболее близко расположенного к 4 энергоблоку Чернобыльской АЭС) имеет существенно более высокий размах и медианное значение по сравнению с ЛП-2 и ЛП-3.

Накопление ¹³⁷Cs растениями на экспериментальных полигонах. Удельная активность ¹³⁷Cs в надземных органах исследуемых видов травянистых растений на пробных площадках составляла от 130 до 2294 Бк/кг (рис. 2). Средние значения данного показателя составляют 997,1, 735,3, 691,6 и 469,8 для осоки трясунковидной, мятлики лугового, пырея ползучего и вейника наземного соответственно. Результаты анализа с использованием критерия Краскела – Уоллиса свидетельствуют, что в накоплении ¹³⁷Cs видами растений отсутствуют значимые различия между экспериментальными полигонами (H = 0,43–5,98; *p* = 0,050–0,513).

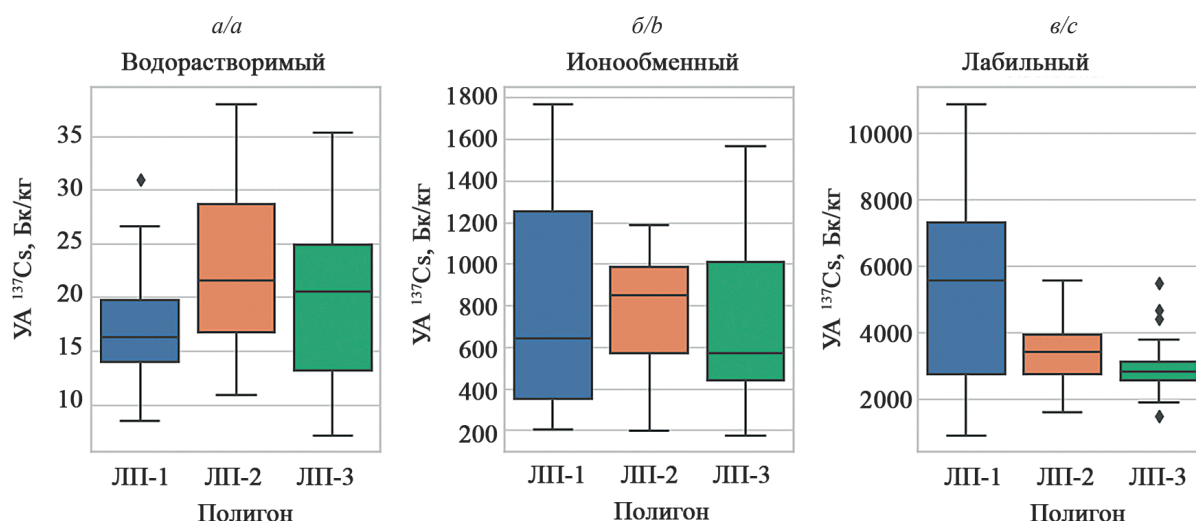


Рис. 1. Оценка содержания ^{137}Cs в биодоступных формах в почве экспериментальных полигонов

Fig. 1. Speciation of ^{137}Cs by bio-available forms in soils of experimental polygons

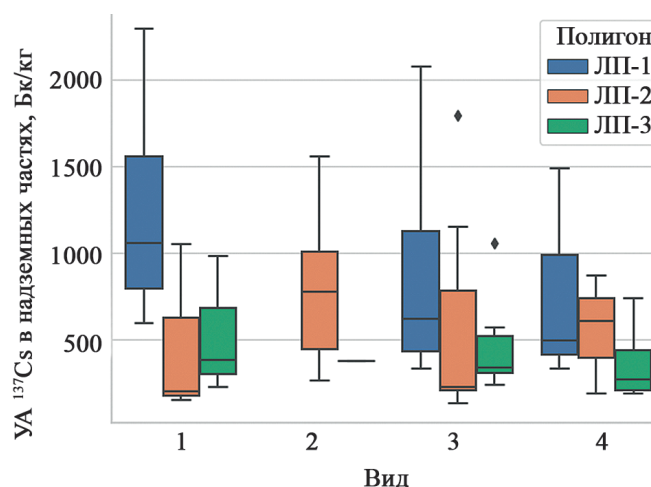


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs в надземных частях травянистых растений на экспериментальных полигонах: 1 – осока трясунковидная; 2 – мятлик луговой; 3 – пырей ползучий; 4 – вейник наземный

Fig. 2. Activity concentration of ^{137}Cs in aboveground parts of the herbaceous plants on the experimental polygons: 1 – *C. Brizoides*; 2 – *P. pratensis*; 3 – *E. repens*; 4 – *C. epigejos*

Анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (табл.) показал, что накопление ^{137}Cs в надземных органах осоки трясунковидной имеет положительную связь высокой и средней силы с концентрацией в почве обменных кальция, магния и аммония, подвижного фосфора, а также с содержанием гумуса и емкостью поглощения. Увеличение доли глинистых частиц в механическом составе почвы сопровождается снижением накопления ^{137}Cs в надземных частях осоки трясунковидной.

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена удельной активности ^{137}Cs в надземных частях видов травянистых растений с показателями загрязнения, свойствами почвы и некоторыми другими факторами

Spearman's Rank correlation coefficients of activity concentration of ^{137}Cs in aboveground parts of the herbaceous plants with indexes of contamination, soil properties, and other factors

	Осока трясунковидная	Пырей ползучий	Вейник наземный	Мятлик луговой
ПЗ ^{137}Cs , кБк/м ²	–0,090	0,021	0,056	0,190
A_y ^{137}Cs почвы, Бк/кг	0,168	0,098	0,062	–0,048
Расстояние до ЧАС, км	–0,450	–0,456*	–0,247	0,619

Окончание табл.

Ending table

	Осока трясунковидная	Пырей ползучий	Вейник наземный	Мятлик луговой
Растворимый ^{137}Cs , Бк/кг	–0,106	–0,219	0,124	0,524
Ионообменный ^{137}Cs , Бк/кг	0,071	–0,012	0,206	0,524
Лабильный ^{137}Cs , Бк/кг	0,387	0,215	0,112	0,071
pH солевой вытяжки	0,201	0,206	0,209	0,071
Са обменный, ммоль/100г	0,661**	0,272	0,074	–0,429
Mg обменный, ммоль/100г	0,669**	–0,055	–0,316	–0,916**
P ₂ O ₅ подвижный, мг/кг	0,657**	0,267	0,056	0,167
K ₂ O подвижный, мг/кг	–0,018	–0,213	–0,610*	–0,922**
NH ₄ ⁺ обменный, мг/кг	0,620**	0,043	–0,547*	–0,667
Гумус, %	0,636**	0,048	–0,350	–0,683
Емкость поглощения, мг/100 г	0,707**	0,142	–0,150	0,024
Степень насыщенности основаниями, %	0,352	0,178	0,001	0,071
Доля глинистых частиц	–0,568*	–0,365	–0,395	–0,247
Объемная доля воды	–0,084	–0,585**	–0,709**	–0,905**
Содержание К в растении, %	–0,094	–0,077	–0,350	0,098
Содержание воды в растении, %	0,209	0,207	0,182	0,119

Примечания. * – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,05, ** – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,01.

При объяснении наблюдаемых корреляций надо принять во внимание, что аммоний вытесняет Cs из участков сорбции высокой специфичности [22], Ca²⁺ и Mg²⁺ вытесняют данный элемент из почвенного поглощающего комплекса [6]. Органическое вещество почвы затрудняет фиксацию ^{137}Cs в почве [16]. Уменьшение доли глинистых частиц в механическом составе почвы снижает емкость специфической и неспецифической сорбции Cs. Совокупность выявленных взаимосвязей дает основание предположить, что основное влияние на накопление ^{137}Cs осокой трясунковидной оказывает содержание $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе.

В отношении всех злаковых растений характерно падение удельной активности ^{137}Cs в надземных частях с ростом содержания воды в почве (на момент отбора образцов). В отношении мятлика лугового выявлены отрицательные корреляционные связи очень высокой силы между накоплением радионуклида и содержанием подвижного калия и магния в почве. Для вейника наземного установлена отрицательная корреляционная связь средней силы между накоплением радионуклида и подвижным калием.

Результаты настоящих наблюдений не позволили обнаружить существенную связь удельной активности ^{137}Cs в надземных частях исследованных видов растений с валовыми показателями загрязнения почвы данным радионуклидом и с содержанием его биодоступных форм. Выполненный анализ свидетельствует, что для осоки не характерен К-зависимый механизм регуляции корневого поступления радиоактивных изотопов цезия, тогда как для злаков данный механизм маскируется влиянием влажности почвы. Согласно [23], снижение влажности почвы приводит к дефициту K⁺ в ризосфере за счет снижения скорости диффузии элемента в почве. Поэтому механизм усиления накопления ^{137}Cs при дефиците влаги в почве может быть аналогичен механизму, ответственному за усиление накопления радионуклида при дефиците калия.

Для оценки совместного влияния влажности почвы (объемная доля) и содержания в ней калия (подвижный K₂O, мг/кг) мы допустили возможность использования произведения этих двух показателей в качестве параметра для прогноза накопления ^{137}Cs в надземных органах злаковых растений. Результаты показали, что данный параметр имеет более тесную экспоненциальную связь с накоплением радионуклида растениями (рис. 3, б), чем содержание в почве подвижного калия (рис. 3, а). Среди всех показателей загрязнения почвы ^{137}Cs , наибольшего улучшения модели удалось достичь за счет включения в нее содержания радионуклида в лабильной (извлекаемой тетрафенилборатом натрия) форме (рис. 3, в).

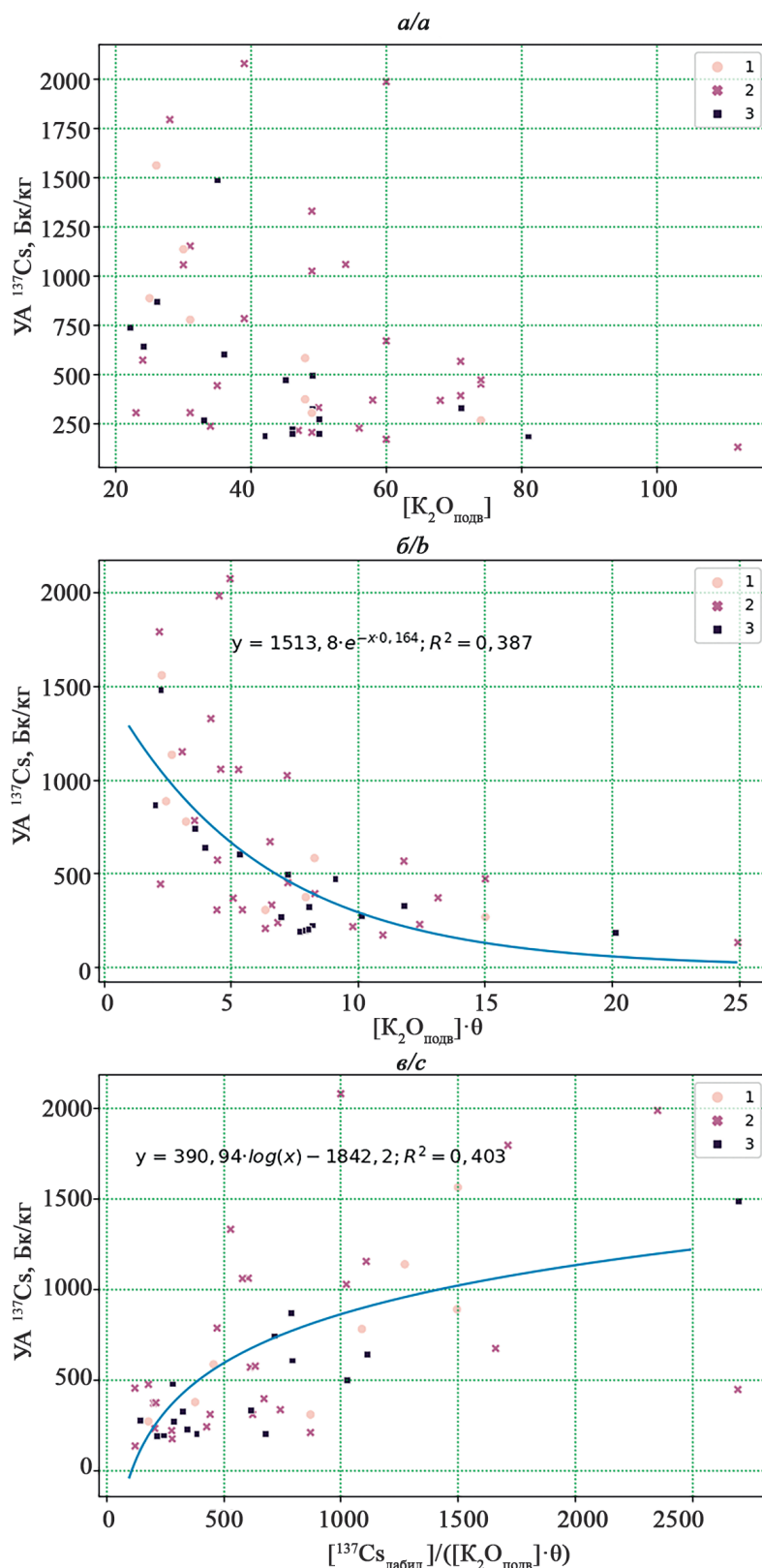


Рис. 3. Зависимость удельной активности ^{137}Cs в надземных органах злаковых растений от подвижного калия (а), произведения содержания подвижного калия и объемной доли воды в почве (б), отношения концентрации лабильной формы ^{137}Cs к произведению содержания подвижного калия и объемной доли воды в почве (в):
1 – мятлик луговой; 2 – пырей ползучий; 3 – веерник наземный

Fig. 3. Dependence of ^{137}Cs activity concentration in aboveground parts of cereal plants on mobile potassium (a), product of mobile potassium and volumetric soil moisture (b), and ratio of labile ^{137}Cs to product of mobile potassium and volumetric soil moisture (c):
1 – *P. pratensis*; 2 – *E. repens*; 3 – *C. epigejos*

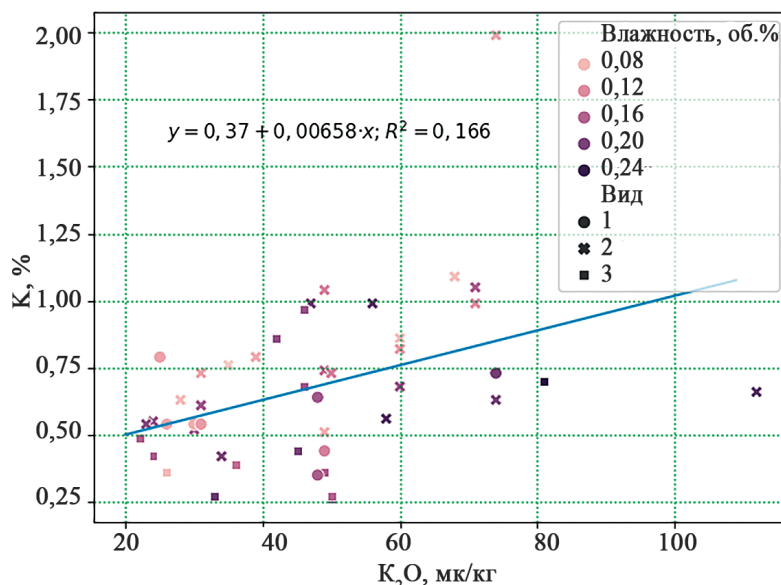


Рис. 4. Зависимость содержания калия в надземных органах злаковых растений от содержания подвижного калия и влаги в почве: 1 – мятлик луговой; 2 – пырей ползучий; 3 – шейник наземный

Fig. 4. Dependence of potassium concentration in aboveground parts of cereal plants on mobile potassium and soil moisture: 1 – *P. pratensis*; 2 – *E. repens*; 3 – *C. epigejos*

Мятлик луговой и шейник наземный имеют единообразную связь между накоплением радионуклида и анализируемыми параметрами. Реакция пырея ползучего несколько другая, что связано с его более высокой потребностью в калии (средняя концентрация элемента в надземных органах данного вида равняется 0,79 %, у шейника наземного и мятлика лугового – 0,50 и 0,57 % соответственно).

Анализ полученных данных не выявил зависимость накопления К надземными органами растений от влажности почвы. Вместе с тем проявляется тенденция к увеличению концентрации данного макроэлемента в растениях от его содержания в почве (рис. 4). При этом положительные отклонения от линии тренда более характерны для площадок с более низкой влажностью. Данный результат указывает на сходное с ¹³⁷Cs совместное влияние содержания подвижного калия и воды в почве на накопление К надземными органами злаковых растений.

Накопление ¹³⁷Cs и К пшеницей яровой при различной влажности почвы в микровегетационном опыте. Для подтверждения роли режима увлажнения почвы в изменении накопления ¹³⁷Cs злаковыми растениями был заложен микровегетационный опыт. При оптимальном режиме увлажнения (70 % от ПВ) накопление ¹³⁷Cs в надземных органах пшеницы яровой на 26-е сутки после появления всходов составило $76,2 \pm 28,0$ Бк/кг, а на 33-и сутки – увеличилось до $133,1 \pm 39,1$ Бк/кг (рис. 5). При пониженном содержании влаги в почве (40 % от ПВ) накопление радионуклида на 26-е сутки возрастает на 106 %. К 33-м суткам эта разница несколько снижается и составляет 66,9 %.

Дополнительно в эксперимент включен вариант с изменяющейся влажностью почвы: 40 % от ПВ до 26 сут. после появления всходов с резким увеличением до 70 % от ПВ после. Среднее содержание ¹³⁷Cs в надземных органах растений в этом варианте как на 26-е сутки, так и на 33-е имеет промежуточные значения между вариантами с оптимальным и пониженным содержанием влаги в почве.

Оценка содержания К в листовом аппарате пшеницы яровой показала, что пониженное содержание влаги в почве приводит к существенному увеличению накопления этого элемента (с 3,09–4,64 % до 6,18–8,09 %). Известно, что калий является одним из основных осмолпротекторов у высших растений [24]. Поэтому пшеница в ответ на недостаточную влагообеспеченность активирует накопление данного катиона. Поскольку используемый в эксперименте субстрат содержал достаточно высокие концентрации подвижного K₂O, то происходило интенсивное накопление элемента в надземных органах пшеницы. Имея высокую аффинность к Cs⁺, высокоаффинные переносчики калия (НАК) также обусловили и более высокую интенсивность накопления ¹³⁷Cs растением. В естественных травянистых сообществах на фоне дефицита калия в почве снижение влагообеспеченности активирует НАК-переносчики, что повышает интенсивность поглощения ¹³⁷Cs растениями, но о заметном увеличении накопления К растениями утверждать нельзя.

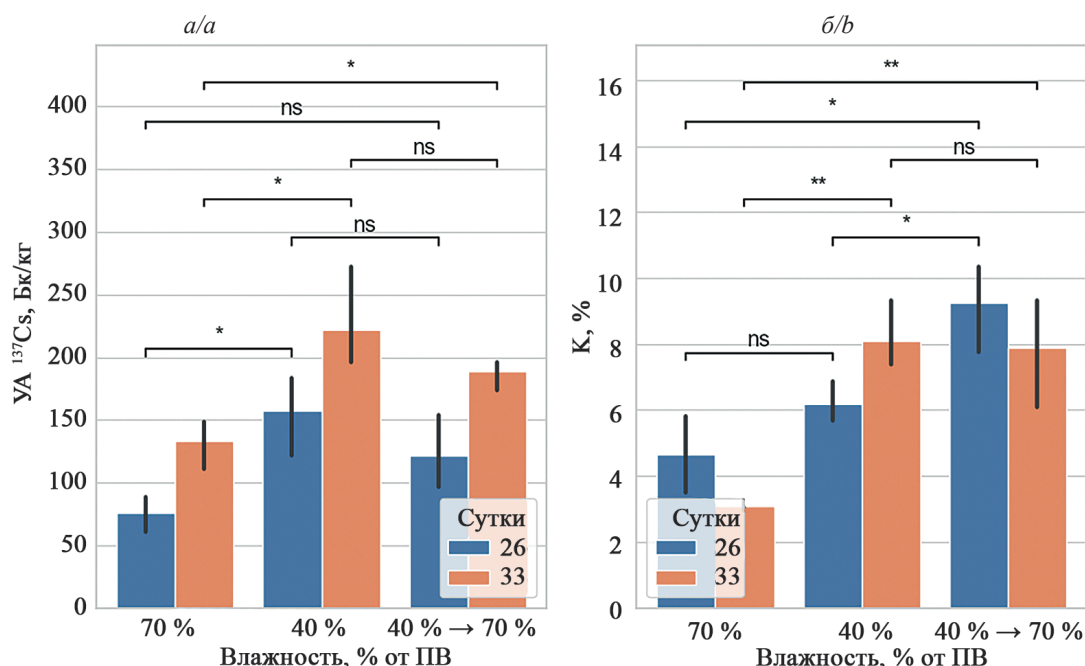


Рис. 5. Содержание ^{137}Cs и K в надземных органах пшеницы яровой в микроvegetационном опыте с различными условиями увлажнения: * – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,05, ** – различия между вариантами достоверны на уровне значимости 0,01; ns – гипотеза о наличии различий между вариантами не подтверждена

Fig. 5. Accumulation of ^{137}Cs and K in aboveground parts of spring wheat in the experiment with different soil moisture: * – difference between options is significant on significance level 0.05, ** – difference between options is significant on significance level 0.01; ns – difference between options is insignificant

Закключение

Выполненные на отдаленном этапе радиоактивных выпадений наблюдения в травянистых экосистемах, расположенных в пределах 13–16 км от 4 энергоблока Чернобыльской АЭС, не позволили выявить непосредственную связь между показателями валового загрязнения почвы ^{137}Cs , а также его содержанием в растворимой, ионообменной и лабильной формах с накоплением радионуклида надземными частями растений на фоне широкой вариабельности данных показателей.

Среди комплекса эдафических факторов наиболее тесную связь с удельной активностью ^{137}Cs в надземных частях злаковых растений имеет влажность почвы, а также произведение объемной доли воды в почве и содержание в ней подвижного K_2O . Обратный экспоненциальный характер связи этих параметров с накоплением ^{137}Cs опосредован K-зависимыми механизмами поглощения Cs растениями и снижением эффективной диффузии K из почвенного раствора к поверхности корня при уменьшении влажности почвы. Содержание ^{137}Cs в лабильной форме является показателем загрязнения, наиболее тесно связанным с накоплением радионуклида растением при учете влажности почвы и содержания в ней доступного калия.

Для осоки трясуновидной K-зависимый механизм регуляции корневого поглощения Cs не подтвержден. Накопление ^{137}Cs в надземных частях данного вида возрастает при воздействии эдафических факторов, обуславливающих вытеснение радионуклида в почвенный раствор из различных участков его сорбции в твердой фазе почвы.

Эксперимент в контролируемых условиях подтвердил существенное увеличение накопления ^{137}Cs злаковыми растениями при снижении влагообеспеченности, обусловленное активацией переносчиков K с высокой аффинностью как к этому элементу, так и к Cs.

Библиографические ссылки

1. Steinhäuser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the total environment*. 2014;470(471):800–817. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.029.
2. Санжарова НИ, Сысоева АА, Исамов НН (мл.), и др. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. *Российский химический журнал*. 2005;XLIX(3):26–34.
3. Fesenko SV, Spiridonov SI, Sanzhарova NI, et al. Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the chernobyl accident. *Russian journal of ecology*. 2002;33(3):170–177. DOI: 10.1023/a:1015475406815.

4. Цыбулько НН, Путятин ЮВ. Биологическая доступность ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах в отдаленный период аварии на Чернобыльской АЭС. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2022;4:108–117. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-108-117.
5. Frissel M, Deb DL, Fathony M. et al. Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. *Journal of environmental radioactivity*. 2002;58(2–3):113–128. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00061-3.
6. Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, et al. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environmental science & technology*. 1999;33(8). P. 1218–1223. DOI: 10.1021/es9808853.
7. Tarsitano D, Young S, Crout N. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of environmental radioactivity*. 2011;102(3):262–269. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.11.017.
8. Rai H, Kawabata M. The dynamics of radio-caesium in soils and mechanism of cesium uptake into higher plants: Newly elucidated mechanism of cesium uptake into rice plants. *Frontiers in plant science*. 2020;11:528. DOI: 10.3389/fpls.2020.00528.
9. Путятин ЮВ. Влияние гумусового состояния дерново-подзолистых супесчаных почв на накопление радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr кормовыми культурами. *Почвоведение и агрохимия*. 2019;1:203–211.
10. Подоляк АГ, Тимофеев СФ, Гребенщикова НВ, и др. Прогнозирование накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в травостоях основных типов лугов Белорусского Полесья по агрохимическим свойствам почв. *Радиационная биология. Радиозкология*. 2005;45(1):100–111.
11. Smolders E, den Brande KV, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in soil solution predict the plant availability of ^{137}Cs in soils. *Environmental science & technology*. 1997;31(12):3432–3438. DOI: 10.1021/es970113r.
12. Zhu Y-G, Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of experimental botany*. 2000;51(351):1635–1645. DOI: 10.1093/jexbot/51.351.1635.
13. Ramírez-Guinart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties. *Journal of environmental radioactivity*. 2020;223-224:106407. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106407.
14. Konoplev A. Mobility and Bioavailability of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Soil-Water Environment: Review. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 157–193. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_3.
15. Park S-M, Alessi DS, Baek K. Selective adsorption and irreversible fixation behavior of cesium onto 2:1 layered clay mineral: A mini review. *Journal of hazardous materials*. 2019;369:569–576. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.061.
16. Prister B. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural Ecosystems. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 229–282. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_5.
17. White PJ, Broadley M.R. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New phytologist*. 2000;147(2):241–256. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00704.x.
18. Kashparov V, Levchuk S, Zhurba M, et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl exclusion zone. *Earth system science data*. 2018;10(1):339–353. DOI: 10.5194/essd-10-339-2018.
19. Delvaux B, Kruyts N, Cremers A. Rhizospheric mobilization of radiocesium in soils. *Environmental science & technology*. 2000;34(8):1489–1493. DOI: 10.1021/es990658g.
20. Ogasawara S, Nakao A, Eguchi T. et al. The extractability of potassium and radiocaesium in soils developed from granite and sedimentary rock in Fukushima, Japan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2019;323(1):633–640. DOI: 10.1007/s10967-019-06971-2.
21. Wakabayashi S, Eguchi T, Nakao A, et al. Effectiveness of non-exchangeable potassium quantified by mild tetraphenylboron extraction in estimating radiocesium transfer to soybean in Fukushima. *Science of the total environment*. 2022;820:153119. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153119.
22. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part one: a simplified procedure for the solid phase characterisation. *Applied geochemistry*. 1996;11(4):589–594. DOI: 10.1016/0883-2927(96)00027-3.
23. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and soil*. 1986;95(2):221–231. DOI: 10.1007/bf02375074.
24. Kumar P, Kumar T, Singh S, et al. Potassium: a key modulator for cell homeostasis. *Journal of biotechnology*. 2020;324:198–210. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.10.018.

References

1. Steinhäuser G, Brandl A, Johnson TE. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts. *Science of the total environment*. 2014;470(471):800–817. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.029.
2. Sanzharova NI, Sysoeva AA, Isamov NN (ml.), Aleksahin RM, Kuznetsov VK, Zhigareva TL. *Rol khimii v reabilitatsii sel'skokhozyaistvennykh ugodii, podvergshikhsya radioaktivnomu zagryazneniyu* [The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural land exposed to radioactive contamination]. *Russian Chemistry Journal*. 2005;XLIX(3):26–34. Russian.
3. Fesenko SV, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Anisimov VS, Aleksakhin RM. Simulation of ^{137}Cs migration over the soil–plant system of peat soils contaminated after the Chernobyl accident. *Russian journal of ecology*. 2002;33(3):170–177. DOI: 10.1023/a:1015475406815.
4. Tsybulka MM, Putyatin YuV. *Biologicheskaya dostupnost' ^{137}Cs i ^{90}Sr v dernovo-podzolistykh pochvakh v otdalennyy period avarii na Chernobyl'skoi AES* [Biological availability of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soddy-podzolic soils in the long period of the accident at the Chernobyl NPP]. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2022;4:108–117. DOI: 10.46646/2521-683X/2022-4-108-117. Russian.
5. Frissel M, Deb DL, Fathony M, Lin YM, Mollah AS, Ngo NT, Othman I, Robison WL, Skarlou-Alexiou V, Topcuoğlu S, Twining JR, Uchida S, Wasserman MA. Generic values for soil-to-plant transfer factors of radiocesium. *Journal of environmental radioactivity*. 2002;58(2–3):113–128. DOI: 10.1016/S0265-931X(01)00061-3.
6. Absalom JP, Young SD, Crout NMJ, Nisbet AF, Woodman RFM, Smolders E, Gillett AG. Predicting soil to plant transfer of radiocesium using soil characteristics. *Environmental science & technology*. 1999;33(8):1218–1223. DOI: 10.1021/es9808853.
7. Tarsitano D, Young S, Crout N. Evaluating and reducing a model of radiocaesium soil-plant uptake. *Journal of environmental radioactivity*. 2011;102(3):262–269. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2010.11.017.

8. Rai H, Kawabata M. The dynamics of radio-caesium in soils and mechanism of cesium uptake into higher plants: Newly elucidated mechanism of cesium uptake into rice plants. *Frontiers in plant science*. 2020;11:528. DOI: 10.3389/fpls.2020.00528.
9. Putyatin YV. *Vliyaniye gumusovogo sostoyaniya dernovo-podzolistykh supeschanykh pochv na nakopleniye radionuklidov ^{137}Cs i ^{90}Sr kormovymi kul'turami* [Influence of humus status of sod-podzolic loamy sand soils on the accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides by forage crops]. *Soil Science and Agrochemistry*. 2019;1:203–211. Russian.
10. Podoljak AG, Timofeev SF, Grebenshnikova NV, Arastovich TV, Zhdanovich VP. *Prognozirovaniye nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr v travostoyakh osnovnykh tipov lugov Belorusskogo Poles'ya po agrokhimicheskim svoistvam pochv* [Prognosis of accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the herbage of main types in the Belarus Polesje meadows using agrochemical soil properties]. *Radiation biology. Radioecology*. 2005;45(1):100–111. Russian.
11. Smolders E, den Brande KV, Merckx R. Concentrations of ^{137}Cs and K in soil solution predict the plant availability of ^{137}Cs in soils. *Environmental science & technology*. 1997;31(12):3432–3438. DOI: 10.1021/es970113r.
12. Zhu Y-G, Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application. *Journal of experimental botany*. 2000;51(351):1635–1645. DOI: 10.1093/jexbot/51.351.1635.
13. Ramirez-Guinart O, Kaplan D, Rigol A, et al. Deriving probabilistic soil distribution coefficients (Kd). part 2: Reducing caesium Kd uncertainty by accounting for experimental approach and soil properties. *Journal of environmental radioactivity*. 2020;223-224:106407. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2020.106407.
14. Konoplev A. Mobility and Bioavailability of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Soil-Water Environment: Review. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 157–193. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_3.
15. Park S-M, Alessi DS, Baek K. Selective adsorption and irreversible fixation behavior of cesium onto 2:1 layered clay mineral: A mini review. *Journal of hazardous materials*. 2019;369:569–576. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.061.
16. Prister B. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural Ecosystems. In: Behavior of radionuclides in the environment II: Chernobyl. Singapore: Springer; 2020. p. 229–282. DOI: 10.1007/978-981-15-3568-0_5.
17. White PJ, Broadley M.R. Mechanisms of caesium uptake by plants. *New phytologist*. 2000;147(2):241–256. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2000.00704.x.
18. Kashparov V, Levchuk S, Zhurba M, et al. Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl exclusion zone. *Earth system science data*. 2018;10(1):339–353. DOI: 10.5194/essd-10-339-2018.
19. Delvaux B, Kruijs N, Cremers A. Rhizospheric mobilization of radiocaesium in soils. *Environmental science & technology*. 2000;34(8):1489–1493. DOI: 10.1021/es990658g.
20. Ogasawara S, Nakao A, Eguchi T. et al. The extractability of potassium and radiocaesium in soils developed from granite and sedimentary rock in Fukushima, Japan. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*. 2019;323(1):633–640. DOI: 10.1007/s10967-019-06971-2.
21. Wakabayashi S, Eguchi T, Nakao A, et al. Effectiveness of non-exchangeable potassium quantified by mild tetraphenylboron extraction in estimating radiocaesium transfer to soybean in Fukushima. *Science of the total environment*. 2022;820:153119. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153119.
22. Wauters J, Elsen A, Cremers A, et al. Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. Part one: a simplified procedure for the solid phase characterisation. *Applied geochemistry*. 1996;11(4):589–594. DOI: 10.1016/0883-2927(96)00027-3.
23. Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture. I. Effect of soil moisture on potassium diffusion, root growth and potassium uptake of onion plants. *Plant and soil*. 1986;95(2):221–231. DOI: 10.1007/bf02375074.
24. Kumar P, Kumar T, Singh S, et al. Potassium: a key modulator for cell homeostasis. *Journal of biotechnology*. 2020;324:198–210. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.10.018.

Статья поступила в редакцию 15.03.2024.
Received by editorial board 15.03.2024.