
РАДИОЛОГИЯ И РАДИОБИОЛОГИЯ, РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

RADIOLOGY AND RADIOBIOLOGY, RADIATION SAFETY

УДК 546.58:577.1

ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ^{137}Cs МЕЖДУ ТВЕРДОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАМИ НА ЭТАПЕ ОТДАЛЕННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

А. Н. НИКИТИН^{1),2)}, С. А. ТАГАЙ³⁾, Е. В. МИЩЕНКО¹⁾, Г. А. ЛЕФЕРД¹⁾

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

²⁾Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 2, 220141, Минск, Беларусь

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

Распределение радиоактивных изотопов цезия между сорбированным на твердой фазе почвы состоянием и почвенным раствором определяет их доступность для корневого поглощения растениями. На это распределение влияют количественные и качественные показатели глинистой фракции, органическое вещество почвы, кислотность и концентрация ионов в почвенном растворе. Роль влагонасыщенности почвы в этом распределении практически не изучена.

Образец цитирования:

Никитин АН, Тагай СА, Мищенко ЕВ, Леферд ГА. Влияние влажности почвы на распределение ^{137}Cs между твердой и жидкой фазами на этапе отдаленных последствий загрязнения. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2025;2:31–39.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-31-39>

For citation:

Nikitin AN, Tagai SA, Mishchenko EV, Leferd GA. Influence of soil moisture on the distribution of ^{137}Cs between the solid and liquid phases at the late stage of contamination consequences. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2025;2:31–39. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2025-2-31-39>

Авторы:

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

Светлана Алексеевна Тагай – научный сотрудник.

Егор Викторович Мищенко – заведующий лабораторией радиоэкологии.

Галина Аркадьевна Леферд – научный сотрудник.

Authors:

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

nikitinale@gmail.com

Svetlana A. Tagai, researcher.

lanabuz@tut.by

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

egormischenko@gmail.com

Galina A. Leferd, researcher.

leferd@mail.ru

В исследовании представлены результаты экспериментального анализа влияния влажности почвы в изменении подвижности и биологической доступности радионуклида ^{137}Cs в аллювиальных почвах.

Цель работы – оценка того, как изменения влажности почвы влияют на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе и скорость его диффузии, что оказывает влияние на его биологическую доступность. Модельные эксперименты были поставлены с дерново-глеевой супесчаной и дерново-глеевой песчаной аллювиальными почвами. Анализ полученных результатов свидетельствует, что минимальные значения коэффициента распределения ^{137}Cs между твердой фазой и почвенным раствором наблюдаются при влажности 70 % от полной влагоемкости в дерново-глеевой супесчаной почве и при 100 % в дерново-глеевой песчаной почве. Изменения данного показателя, напрямую влияющего на биологическую доступность радионуклида, могут достигать десяти и более раз в зависимости от влажности почвы. В работе установлено, что скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной почве достигает максимума при влажности 70–85 % от полной влагоемкости. При полном влагонасыщении почвы скорость диффузии несколько снижается, а при уменьшении влажности до 40 % падает в два раза. Эти результаты демонстрируют сложную зависимость между влажностью почвы и подвижностью радионуклида, что имеет важное значение для понимания его поведения в системе «почва – растение» в различных условиях. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения моделей прогноза поведения радионуклидов цезия в системе «почва – растение» и оптимизации методов радиационной защиты в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: радиоактивные изотопы цезия; влажность почвы; подвижность радионуклидов; биологическая доступность; коэффициент распределения; аллювиальные почвы.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограмма 3 «Радиация и биологические системы» на 2021–2025 годы, задание 3.04 «Динамика структурно-функционального состояния наземных и водных экосистем в условиях изменения климата и техногенного воздействия».

INFLUENCE OF SOIL MOISTURE ON THE DISTRIBUTION OF ^{137}Cs BETWEEN THE SOLID AND LIQUID PHASES AT THE LATE STAGE OF CONTAMINATION CONSEQUENCES

A. N. NIKITIN^{a, b}, S. A. TAGAI^c, E. V. MISHCHENKO^a, G. A. LEFERD^a

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

^b*Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus,
2 Academic Kuprevich Street, Minsk 220141, Belarus*

^c*Polesie State Radiation-Ecological Reserve,
7 Tserashkovaj Street, Hoiniki 247618, Belarus*

Corresponding author: A. N. Nikitin (nikitinale@gmail.com)

The partitioning of radioactive cesium isotopes between solids and liquid phases in soil dictates their availability for plant root uptake. This distribution is influenced by the quantity and mineral composition of the clay fraction, soil organic matter content, acidity levels, and ion concentrations in the soil solution. However, the role of soil moisture content in this partitioning remains largely unexplored. This study presents experimental findings on how soil moisture affects the mobility and bioavailability of the radionuclide ^{137}Cs in alluvial soils. The objective was to assess how variations in soil moisture influence the concentration of ^{137}Cs in the soil solution and its diffusion rate, which in turn impact its bioavailability. Model experiments were conducted using sod-gleyed sandy loam and sod-gley sandy alluvial soils. Analysis revealed that the minimum values of distribution coefficients of ^{137}Cs between the solid phase and soil solution occurred at 70 % of full moisture capacity in sod-gleyed sandy loam soil and at 100% in sod-gley sandy soil. Changes in this coefficient, which directly affect the radionuclide's bioavailability, can vary ten times or more depending on soil moisture. The study established that the diffusion rate of ^{137}Cs in alluvial soil peaks at moisture levels between 70 and 85 % of full moisture capacity. At full saturation, the diffusion rate slightly decreases, and it declines by half when moisture is reduced to 40 %. These findings demonstrate a complex relationship between soil moisture and radionuclide mobility, which is crucial for understanding ^{137}Cs behavior in the soil-plant system under varying conditions. The results can be utilized to enhance predictive models of cesium radionuclide behavior in the soil-plant system and to optimize radiation protection methods in agriculture.

Keywords: radioactive cesium; soil moisture; radionuclide mobility; bioavailability; distribution coefficient; alluvial soils.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the State Scientific Research Program «Natural Resources and the Environment», Subprogram 3 «Radiation and Biological Systems» for 2021–2025, Task 3.04 «Dynamics of the Structural and Functional State of Terrestrial and Aquatic Ecosystems under Climate Change and Technogenic Impact».

Введение

Особенности поведения радиоактивных изотопов Cs (^{134}Cs , ^{135}Cs , ^{137}Cs) в системе «почва – растение» в значительной мере определяют тяжесть последствий радиационных аварий с выбросом продуктов деления U и Pu в окружающую среду. Так как корневое потребление изотопов Cs происходит из почвенного раствора, то их перераспределение между растворенным состоянием и другими формами нахождения оказывает сильное влияние на загрязнение растений [1]. Количественный анализ факторов, способных сместить динамическое равновесие в системе «растворенный Cs – сорбированный Cs», важен для разработки прогнозных моделей накопления радиоактивных изотопов растениями и эффективного применения мер радиационной защиты в сельском хозяйстве.

Являясь щелочным металлом, Cs обладает хорошей растворимостью в воде. Однако в почвенной среде он подвергается сорбции в катионообменном комплексе, в местах высокоспецифической сорбции на расширенных краевых поверхностях глинистых минералов со структурой 2:1, а также на клеточных стенках и внутри микроорганизмов почвы [2]. Кроме того, с течением времени происходит проникновение Cs глубоко в межпакетные пространства глинистых минералов, преимущественно из группы смектита, где он прочно фиксируется [3]. В связи с этим доля находящихся в почвенном растворе изотопов Cs в основном зависит от содержания в механическом составе глинистой фракции, ее минералогического состава [4].

Равновесие между изотопом Cs в сорбированных в твердой фазе почвы и почвенным раствором характеризуется константой распределения (K_d – отношение концентрации изотопа в твердой фазе к его концентрации в почвенном растворе). Данный параметр можно рассматривать в качестве показателя относительной биологической доступности радиоактивных изотопов Cs. Часто его включают в механистические и полумеханистические модели поведения радиоактивных изотопов цезия в системе «почва – растение» в качестве одного из ключевых элементов [5]. В зависимости от содержания глинистой фракции в механическом составе почвы и ее минералогического состава K_d радиоактивных изотопов Cs варьирует в диапазоне 10^1 – 10^5 [5].

Эмпирические данные, полученные при исследовании радиоэкологических последствий радиационных аварий и испытаний ядерного оружия, указывают на явление роста K_d с течением времени после попадания радиоактивных изотопов Cs в почву [6; 7]. Особенно сильный рост данного показателя происходит в первый год после выпадений. Катионы K^+ и NH_4^+ имеют характеристики, близкие к Cs^+ , поэтому с увеличением их концентрации в почвенном растворе радиоактивные изотопы цезия вытесняются из участков высокоспецифичной сорбции, а K_d уменьшается [2]. Органическое вещество почвы также способствует уменьшению значения коэффициента распределения радиоактивных изотопов Cs [5; 8]. Учет указанных факторов позволяет построить достаточно надежные полумеханистические модели поведения ^{134}Cs и ^{137}Cs в системе «почва – растение» для «свежих» выпадений, однако они не дают приемлемую точность прогноза для отдаленных сроков. Выполненный анализ показал, что основная проблема состоит в существенных различиях между реальными и предсказанными K_d [6]. Причина данного явления и другие существенные факторы, влияющие на K_d , до настоящего времени окончательно не установлены.

На этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений доля ^{137}Cs в почвенном растворе от валового запаса составляет доли процента даже при низком содержании глинистых минералов. В подобной системе незначительное смещение динамического равновесия в распределении радиоактивных изотопов Cs между твердой и жидкой фазами способно существенно изменить его содержание в почвенном растворе, что прямопропорционально отражается на биологической доступности радионуклида. На основании накопленных наблюдений за поведением ^{137}Cs в почвенно-растительном комплексе нами выдвинута гипотеза, что влажность почвы оказывает существенное влияние на K_d ^{137}Cs в отдаленном периоде после загрязнения. Цель исследования – проверка данной гипотезы.

Дополнительно решена задача по оценке влияния влажности почвы на скорость диффузии ^{137}Cs в этой неоднородной среде. При активном корневом поглощении ионов из почвенного раствора создается градиент их концентрации. Величина этого градиента зависит от влажности почвы [9], что объясняется снижением эффективного коэффициента диффузии ионов в почве при уменьшении ее влажности.

Материалы и методы исследования

Для проведения модельного эксперимента были отобраны образцы почвы на двух реперных участках, расположенных в центральной пойме р. Припять, на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в окрестностях бывшего населенного пункта Красноселье. Образцы почвы для исследований на реперных участках отбирались на глубину 20 см и тщательно перемешивались.

Реперные участки имеют характерный для центральной поймы р. Припять почвенный и растительный покров, но различаются по степени увлажнения, гранулометрическому составу и агрохимическим показателям почвы.

Почва участка № 1 аллювиальная дерново-глееватая, развивающаяся на супесчаном аллювии. Грунтовые воды находятся на уровне 0,9–1,2 м. Растительность участка представлена разнотравно-осоково-злаковой ассоциацией.

Почва участка № 2 аллювиальная дерново-глеевая, развивающаяся на песчаном аллювии. Участок расположен в пониженном месте с высоким стоянием грунтовых вод (0,5–0,8 м). Растительный покров представлен разнотравно-осоковой ассоциацией, с наличием осоковых кочек.

Почва участка № 2 содержит существенно больше органического вещества (табл. 1). Обе почвы характеризуются повышенным содержанием обменного кальция, но низкой концентрацией подвижного калия. Исследуемые почвы относятся к среднекислым.

Для проведения модельного эксперимента образцы почвы массой 500–600 г (по воздушно-сухой массе) помещались в пластиковые сосуды, и их влажность весовым методом доводилась до 40 %, 70, 85 и 100 % от полной влагоемкости. Выбранный диапазон имитирует различные уровни увлажнения почвы, которые могут возникать в период вегетации (от засухи до переувлажнения). Сосуды накрывались полимерной пленкой и экспонировались при заданной влажности и комнатной температуре 70–80 суток. Каждый вариант эксперимента проводился в трехкратной повторности.

Сразу по окончании экспозиции оценивалась скорость диффузии ^{137}Cs в почве с использованием селективного сорбента, представляющего собой фильтровальную бумагу, пропитанную тетрафенилборатом натрия. Данный метод адаптирован из [10]. Для исключения непосредственного контакта сорбента с почвой на ее поверхность укладывалась смоченная дистиллированной водой фильтровальная бумага «чистая лента». Сорбент на поверхности почвы сменялся каждые 24 ч.

Таблица 1

Агрохимическая и радиологическая характеристика почв реперных участков

Table 1

Agrochemical and Radiological Characteristics of Soil at Reference Sites

Показатель	Участок № 1	Участок № 2
Гумус, %	3,25 ± 0,07	7,75 ± 0,16
pH _{KCl}	4,47 ± 0,20	4,34 ± 0,20
[Ca _{обм}], мг/кг	1394 ± 203	1253 ± 175
[Mg _{обм}], мг/кг	106,4 ± 10,7	101,1 ± 2,1
[NH ₄ ⁺ _{обм}], мг/кг	5,96 ± 0,89	14,82 ± 0,22
[K _{подв}], мг/кг	23,7 ± 0,4	29,3 ± 0,9
[P ₂ O ₅ подв], мг/кг	55,5 ± 10,6	34 ± 4,6
Гигроскопическая влажность, %	3,26 ± 0,04	4,14 ± 0,07
Полная влагоемкость, %	58,4 ± 1,1	73,6 ± 0,8
[^{137}Cs], Бк/кг	5836 ± 344	7820 ± 460

По окончании времени экспозиции жидкая фаза почвы (почвенный раствор) извлекалась с использованием центрифуги лабораторной медицинской РС-6 в течение 60 мин на 3000 об./мин с использованием специальных стаканов с двойным дном и фильтром «синяя лента» под почвой.

Содержание ^{137}Cs в образцах определялось на гамма-спектрометрическом комплексе *Canberra* с коаксиальным полупроводниковым детектором *GX2018*. Для измерений образцы почвы и экстракты помещались в плоскую счетную мишень диаметром, равным диаметру детектора, и объемом 100 мл. В случаях, когда объем экстракта был ниже 100 мл, счетная мишень дополнялась дистиллированной водой с последующим пересчетом объемной активности на неразбавленный экстракт. Фильтровальная бумага с сорбентом измельчалась и ими заполнялась аналогичная счетная мишень. Для оценки активности ^{137}Cs по скорости счета в каналах полного фотопоглощения в области 662 кэВ использованы значения эффективности для данной геометрии с эталонными образцами почвы объемным весом 1,3 г/см³, водного раствора (1,0 г/см³), растительного материала (0,1 г/см³) для соответствующих образцов.

Математическую и статистическую обработку данных проводили в среде *iPython* с использованием библиотек *Pandas* и *SciPy* языка *Python*. Подготовка иллюстраций осуществлена с использованием библиотек *Matplotlib* и *Seaborn*. Для представления данных вычислялась средняя арифметическая величина, в качестве меры разброса данных использовано стандартное отклонение. Оценка значимости влияния фактора выполнена с использованием дисперсионного анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов подтверждает выдвинутую гипотезу о зависимости концентрации ^{137}Cs в почвенном растворе от влажности почвы (рис. 1). Характер этой зависимости показывает, что источником изменения концентрации радионуклида в растворе является не только его концентрирование в растворителе при уменьшении количества воды в объеме почвы, но и отчетливо проявляется влияние характеристик почвы на концентрацию ^{137}Cs при различной влажности.

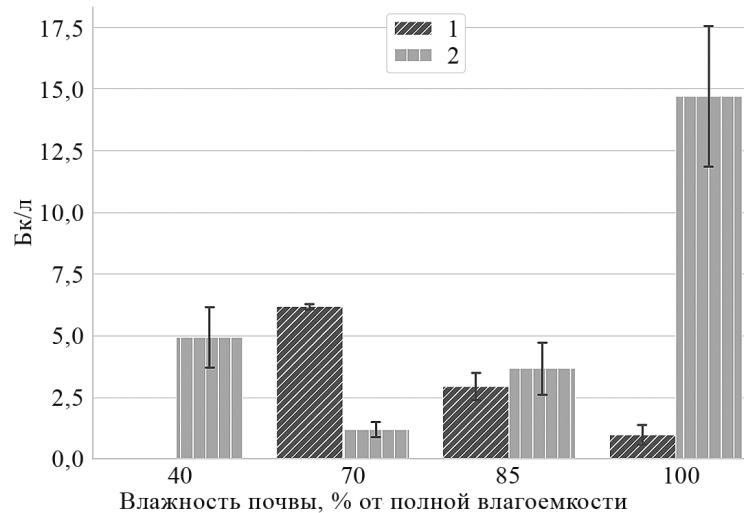


Рис. 1. Объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе в дерново-глеяватой супесчаной (1) и дерново-глеявой песчаной (2) аллювиальных почвах. Планки погрешностей – стандартное отклонение. Используемый метод не позволил извлечь достаточное для гамма-спектрометрического анализа количество почвенного раствора из дерново-глеяватой супесчаной почвы при влажности 40 % от полной влагоемкости

Fig. 1. Volume Activity of ^{137}Cs in Soil Solution in the Sod-Gleyed Sandy Loam (1) and Sod-Gley Sandy (2) Alluvial Soils. Error Bars – Standard Deviation. The used method did not allow extraction of a sufficient quantity of soil solution from the Podzolic-Gleyic Sandy Loam at 40 % of the full moisture capacity for gamma spectrometric analysis

Объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе аллювиальной дерново-глеявой песчаной почвы колебалась в диапазоне 1,2–4,9 Бк/л при содержании воды 40–85 % от полной влагоемкости. Однако рост влажности до 100 % от полной влагоемкости привел к резкому росту концентрации радионуклида в почвенном растворе до $14,7 \pm 3,5$ Бк/л. Наименьшее содержание ^{137}Cs в почвенном растворе зафиксировано при содержании воды в почве 70 % от полной влагоемкости. Содержание ^{137}Cs , в форме нахождения из которой происходит его непосредственное корневое поглощение, увеличивается в 10 раз при изменении влажности почвы с 70 до 100 % от полной влагоемкости.

В аллювиальной дерново-глеяватой супесчаной почве концентрация ^{137}Cs в почвенном растворе варьировала в диапазоне 1,0–6,2 Бк/л. Увеличение влажности с 70 до 100 % от полной влагоемкости приводит к постепенному уменьшению содержания радионуклида в растворенной форме более чем в 6 раз.

Механизмы смещения динамического равновесия ^{137}Cs между сорбированными в твердой фазе почвы и растворенным состоянием при изменении влагонасыщенности могут иметь различную природу. Уменьшение содержания воды в почве увеличивает концентрацию радионуклида в растворе. Одновременно с этим сужение межпакетных пространств слоистых глинистых минералов затрудняет выход Cs из участков высоко-специфической сорбции. Нельзя также упускать из вида межионные взаимодействия в почвенном растворе и почвенном поглощающем комплексе при изменении соотношения между жидкой и твердой фазами почвы.

Доля ^{137}Cs в почвенном растворе от его валового содержания в почве составила 0,01–0,14 % в аллювиальной дерново-глеявой песчаной почве и 0,01–0,04 % в аллювиальной дерново-глеяватой супесчаной почве. Верхняя граница этого показателя выше в почве с более низким содержанием глинистой фракции в ее механическом составе. Однако при определенных условиях – содержании воды 70 % от полной влагоемкости – доля радионуклида в почвенном растворе выше у супесчаной почвы.

Прямое измерение концентрации $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе является довольно сложной процедурой и выполнимо лишь при достаточно высоких уровнях загрязнения, так как основной запас радионуклида обычно сорбирован в твердой фазе. Для оценки этого показателя обычно используют отношение удельной активности радионуклида в почве к коэффициенту распределения. Предложен ряд моделей для определения K_d ^{137}Cs [5; 11; 12], но ни одна из них не учитывает влияние влажности почвы. Результаты настоящих исследований показывают, что на этапе отдаленных последствий загрязнения K_d ^{137}Cs в аллювиальной

дерново-глееватой супесчаной почве увеличивается от $0,94 \times 10^3$ до $7,12 \times 10^3$ с увеличением содержания воды в ней от 70 до 100 % от полной влагоемкости. В аллювиальной дерново-глеевой песчаной почве K_d ^{137}Cs продемонстрировал наименьшие значения при полном насыщении почвы водой ($0,56 \times 10^3$). Понижение влажности до 70 % от полной влагоемкости приводит к постепенному росту данного показателя до $6,95 \times 10^3$, но при влажности 40 % он заметно снижается до $1,70 \times 10^3$.

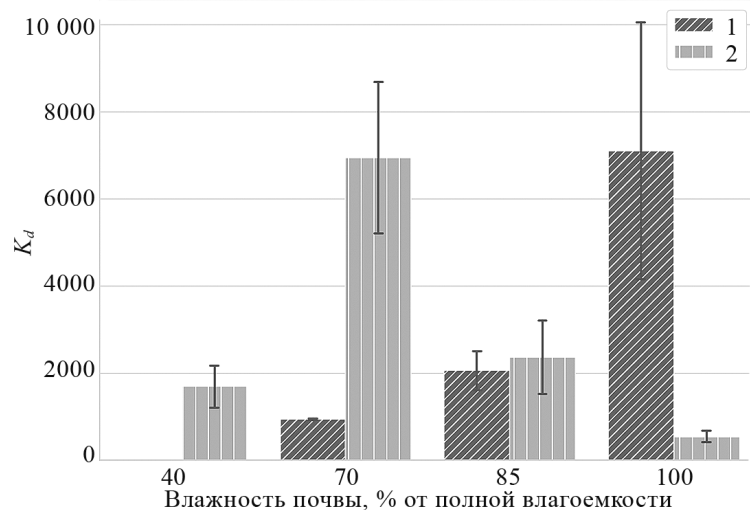


Рис. 2. Коэффициент распределения ^{137}Cs между твердой фазой почвы и почвенным раствором в дерново-глееватой супесчаной (1) и дерново-глеевой песчаной (2) аллювиальных почвах. Планки погрешностей – стандартное отклонение

Fig. 2. Distribution Coefficient of ^{137}Cs between the Solid Phase of Soil and Soil Solution in Sod-Gleyed Sandy Loam (1) and Sod-Gley Sandy (2) Alluvial Soils. Error Bars – Standard Deviation

При полном насыщении почвы влагой K_d ^{137}Cs в аллювиальной песчаной почве в 12,8 раз меньше, чем в супесчаной, что согласуется с наблюдаемой более высокой биологической доступностью радионуклида на песчаных почвах. Однако такое соотношение не сохраняется во всем исследованном диапазоне влажности почвы: при 85 % K_d ^{137}Cs в почвах с обоих участков имеет очень близкие значения, а при 70 % – K_d в супесчаной почве в 7,3 раза больше, чем в песчаной. При уменьшении содержания влаги в почве происходит концентрирование в почвенном растворе не только $^{137}\text{Cs}^+$, но и других катионов и анионов, концентрация которых выше на порядок. Также происходит сближение пакетов слоистых глинистых минералов, что усиливает связывание ими Cs. Эти явления оказывают разнонаправленное воздействие на распределение ^{137}Cs между твердой фазой и почвенным раствором.

Двухфакторный дисперсионный анализ свидетельствует, что объемная активность ^{137}Cs в почвенном растворе имеет значимую зависимость от содержания воды в почве, а также от других ее характеристик (табл. 2).

Таблица 2

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа влияния влажности и характеристик почвы на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе (A_o) и коэффициент распределения радионуклида (K_d)

Table 2

Results of Two-Way ANOVA for the Influence of Moisture and Soil Characteristics on the Volume Activity of ^{137}Cs in Soil Solution (A_o) and the Distribution Coefficient of the Radionuclide (K_d)

Фактор	A_o , Бк/л	K_d
Влажность почвы	11,525**	3,712*
	0,227	0,122
Характеристики почвы	10,610**	0,137
	0,069	–0,013
Совместное влияние факторов	26,970	14,213**
	0,560	0,592

Примечание. Над чертой – F-критерий Фишера, под чертой – сила влияния фактора (ω^2), * – влияние фактора достоверно на уровне значимости $p < 0,05$, ** – влияние фактора достоверно на уровне значимости $p < 0,01$.

Для величины K_d наиболее выражена зависимость от совместного влияния влажности почвы и других ее характеристик. Статистическая значимость влияния только влажности почвы ниже. Дисперсионный анализ не позволил подтвердить влияние особенностей аллювиальной почвы, определяемых местом ее отбора, на K_d . Наличие статистически значимой зависимости объемной активности радиоуклида от характеристик почвы и ее отсутствие в отношении K_d можно объяснить тем, что среди всех особенностей, включенных в анализ образцов аллювиальной почвы, наибольшее влияние на этот показатель оказывает валовое содержание радионуклида. Влияние этого фактора на K_d исчезает, так как он входит в знаменатель при вычислении коэффициента распределения.

Полученные нами значения K_d ^{137}Cs для аллювиальных почв находятся преимущественно у нижней границы диапазона, приведенного в обобщении [5] для минеральных почв при сроке после загрязнения более года, что согласуется с довольно высокой биологической доступностью радионуклида в пойменных почвах. Обнаруженные зависимости в определенной мере согласуются с результатами эксперимента с искусственным загрязнением образцов дерново-луговой почвы [13]: при массовой доле воды в почве 30 % (что близко к 100 % от полной влагоемкости) наблюдается резкое увеличение концентрации ^{137}Cs в почвенном растворе с падением коэффициента распределения от 4 до 1×10^3 . После прокалывания почвы концентрация радионуклида в почвенном растворе закономерно уменьшалась с увеличением влажности. Поэтому авторы полагают, что в наблюдаемом явлении важная роль принадлежит органическому веществу.

Таким образом, K_d ^{137}Cs в одной и той же почве может варьировать на порядок величины при изменении содержания в ней влаги. Ранее нами было показано, что содержание в почве биодоступных форм ^{137}Cs может изменяться под воздействием микроорганизмов [14]. О влиянии на нее концентрации макроэлементов свидетельствуют результаты наших наблюдений [15]. Таким образом, динамическое равновесие между растворенным и сорбированным состоянием ^{137}Cs может изменяться под влиянием влажности почвы, активности микроорганизмов, таких катионов, как Ca^{2+} , K^+ , Cs^+ , NH_4^+ и других факторов. Поскольку на этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений в почвенном растворе находится лишь незначительная доля ^{137}Cs , а в лабильном – от трети до половины запаса [15], то даже незначительное смещение динамического равновесия между этими формами должно вызывать сильное изменение биологической доступности радионуклида. Это отражается на наблюдаемой пространственной и временной вариабельности параметров накопления ^{137}Cs растениями.

Для корневого потребления К и Cs прежде всего важно их содержание в ризосфере. При активном потреблении ионов из почвенного раствора возникает градиент их концентрации между ризосферой и почвенным раствором. Величина этого градиента определяется, с одной стороны, скоростью потребления ионов корнями, с другой – скоростью их диффузии из общего объема почвенного раствора. Результаты эксперимента демонстрируют зависимость скорости диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ от влажности аллювиальной почвы (рис. 3). Скорость диффузии измерена дважды – в первые сутки после помещения поглощающего материала на поверхность почвы, и на пятые сутки – после постоянной сорбции $^{137}\text{Cs}^+$. Последнее имитирует ситуацию, близкую к динамическому равновесию в системе, и позволяет оценить совокупность процессов, обеспечивающих восполнение запаса катионов в ризосфере, включающего собственно диффузию и их выход из сорбированного состояния в почвенный раствор.

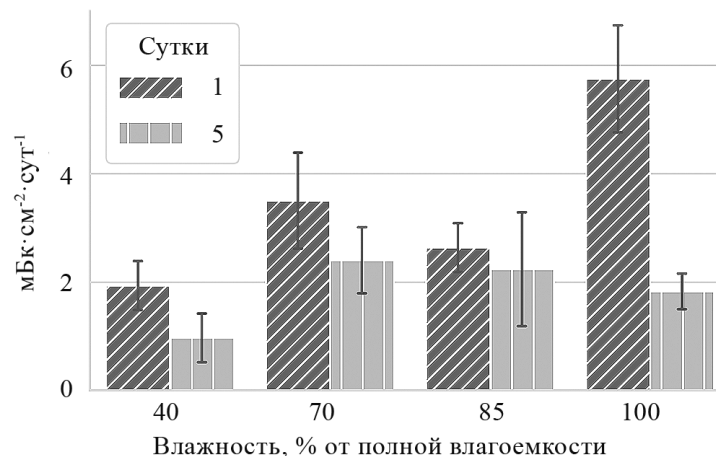


Рис. 3. Скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве при различной влажности почвы на 1 и 5 сутки после создания градиента концентрации. Планки погрешностей – стандартное отклонение

Fig. 3. Diffusion Rate of ^{137}Cs in Alluvial Sod-Gleyed Loamy Soil at Different Soil Moisture Levels on Days 1 and 5 After Establishing the Concentration Gradient. Error Bars – Standard Deviation

При полном насыщении влагой аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почвы наблюдается существенно более высокая скорость диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в первые 24 ч после создания градиента концентрации по сравнению с образцами почвы, имеющими влажность 40–85 % от полной влагоемкости. Минимальная скорость диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в первые сутки зафиксирована при наиболее низкой влажности почвы.

Приведенные в настоящей статье данные свидетельствуют, что концентрация катионов $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе не остается одинаковой при различной влажности почвы, что непосредственно сказывается на градиенте концентрации. Поэтому для оценки эффективного коэффициента диффузии необходимо нормировать измеренную скорость диффузии на градиент концентрации. Расчеты показывают, что отношение скорости диффузии к градиенту концентрации $^{137}\text{Cs}^+$ в первые сутки составляет 0,6; 0,9 и 7,8 для влажности 70 %, 85 и 100 % от полной влагоемкости соответственно. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают резкое уменьшение эффективного коэффициента диффузии $^{137}\text{Cs}^+$ в почвенном растворе при уменьшении содержания влаги в супесчаной почве от 100 до 85 % от полной влагоемкости. При уменьшении влажности почвы еще на 15 % эффективный коэффициент диффузии падает не столь резко.

При близком к равновесному состоянию в системе с активной сорбцией ^{137}Cs скорость диффузии уменьшается при всех вариантах влажности почвы. Наиболее сильная разница в скорости диффузии на первые и пятые сутки наблюдается в варианте с влажностью почвы 100 % от полной влагоемкости, несколько ниже – при 40 %. Отсутствие существенной разницы в скорости диффузии ^{137}Cs между различными сроками при влажности почвы 70 и 85 % от полной влагоемкости указывает на то, что основным лимитирующим явлением, влияющим на подвижность радионуклида в этих условиях, становится собственно диффузия. Сближение пакетов в глинистых минералах при уменьшении влажности почвы до 40 % от полной влагоемкости затрудняет выход Cs из сорбированного состояния в почвенный раствор, что вызывает практически двукратное уменьшение его подвижности. Резкое падение скорости диффузии ^{137}Cs при установлении равновесия в почве с влажностью 100 % от полной влагоемкости обусловлено как более низкой концентрацией радионуклида в почвенном растворе, так и, вероятно, повышением сорбирующей способности органического вещества почвы в отношении радионуклида, как это было установлено в экспериментах [13].

Заключение

В эксперименте с аллювиальными почвами показано, что режим увлажнения оказывает существенное влияние на объемную активность ^{137}Cs в почвенном растворе и скорость его диффузии, что непосредственно влияет на биологическую доступность радионуклида. Минимальные значения коэффициента распределения ^{137}Cs между сорбированным в твердой фазе и растворенным в почвенном растворе состоянием в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве наблюдаются при влажности 70 % от полной влагоемкости, в аллювиальной дерново-глеевой песчаной почве – при влажности 100 %. Изменения коэффициента распределения радионуклида при разной влажности почвы могут достигать десяти раз и более.

Скорость диффузии ^{137}Cs в аллювиальной дерново-глееватой супесчаной почве при установлении динамического равновесия принимает наибольшие значения при влажности 70–85 % от полной влагоемкости, при полном влагонасыщении почвы она несколько снижается и падает в два раза при уменьшении влажности до 40 %.

Библиографические ссылки

1. Smolders E, Brande KV, den, 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. <https://doi.org/10.1021/es970113r>.
2. 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. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00028-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00028-5).
3. Fried M, Broeshart H. The Soil-Plant System. In: Relation To Inorganic Nutrition. New York, San Francisco, London: Academic Press; 1967.
4. Uematsu S, Smolders E, Sweeney L, et al. Predicting Radiocaesium Sorption Characteristics With Soil Chemical Properties for Japanese Soils. *Science of The Total Environment*. 2015;524–525:148–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.028>.
5. Ramírez-Guinar 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>.
6. Brimo K, Pourcelot L, Métivier JM. Evaluation of Semi-Mechanistic Models To Predict Soil To Grass Transfer Factor of ^{137}Cs Based on Long Term Observations in French Pastures. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;227:106467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106467>.
7. Гребенщикова НВ, Подоляк АГ, Паленшанова ГИ. Динамика биологической подвижности ^{137}Cs и ^{90}Sr в луговых экосистемах Белорусского Полесья. В: *Итоги научных исследований в области радиэкологии окружающей среды за десятилетний период после аварии на Чернобыльской АЭС*. Гомель: [б. и.]; 1996. с. 27–33.

8. Пристер БС, Перепелятникова ЛВ, Дугинов ВИ, и др. Основные факторы, определяющие поведение радионуклидов в системе почва-растения. В: *Проблемы сельскохозяйственной радиологии. Сборник научных трудов*. 1992;2(2):108–117.
9. 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.
10. Vaidyanathan LV, Nye PH. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. *Journal of Soil Science*. 1966;17(2):175–183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1966.tb01464.x>.
11. Sheppard SC. Robust Prediction of Kd From Soil Properties for Environmental Assessment. *Human and Ecological Risk Assessment. International Journal*. 2011;17(1):263–279. <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.538641>.
12. Tarsitano D, Young SD, Crout NM. Journal Evaluating and Reducing a Model of Radiocaesium Soil-Plant Uptake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(3):262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>.
13. Куликов НВ, Молчанова ИВ, Караваева ЕН. *Радиоэкология почвенно-растительного покрова*. Свердловск: УрО АН СССР; 1990.
14. Nikitin AN, Cheshyk IA, Gutseva GZ, et al. Impact of Effective Microorganisms on the Transfer of Radioactive Cesium Into Lettuce and Barley Biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>.
15. Никитин АН, Шуранкова ОА, Калинин С.А., и др. 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>.

References

1. Smolders E, Brande KV, den, 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. <https://doi.org/10.1021/es970113r>.
2. 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. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00028-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00028-5).
3. Fried M, Broeshart H. The Soil-Plant System. In: *Relation To Inorganic Nutrition*. New York, San Francisco, London: Academic Press; 1967.
4. Uematsu S, Smolders E, Sweeck L, et al. Predicting Radiocaesium Sorption Characteristics With Soil Chemical Properties for Japanese Soils. *Science of The Total Environment*. 2015;524–525:148–156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.028>.
5. 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. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106407>.
6. Brimo K, Pourcelot L, Métivier JM. Evaluation of Semi-Mechanistic Models To Predict Soil To Grass Transfer Factor of ^{137}Cs Based on Long Term Observations in French Pastures. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021;227:106467. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106467>.
7. Grebenshchikova NV, Podolyak AG, Palenshanova GI. *Dinamika biologicheskoy podvizhnosti ^{137}Cs i ^{90}Sr v lugovykh ekosistemakh Belorusskogo Poles'ya* [Dynamics of biological mobility of ^{137}Cs and ^{90}Sr in meadow ecosystems of the Belarusian Polesie]. In: *Itogi nauchnyh issledovaniy v oblasti radioekologii okruzhayushchej sredy za desyatiletnij period posle avrii na Chernobyl'skoj AES = Results of scientific research in the field of environmental radioecology for a ten-year period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant*. Gomel: [publisher unknown]; 1996. p. 27–33. Russian.
8. Prister BS, Perepyatnikova LV, Duginov VI, Homutin YuV. The main factors determining the behavior of radionuclides in the soil-plant system. In: *Problemy sel'skhozaystvennoj radiologii* [Problems of agricultural radiology]. 1992;2(2):108–117. Russian.
9. 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.
10. Vaidyanathan LV, Nye PH. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. *Journal of Soil Science*. 1966;17(2):175–183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1966.tb01464.x>.
11. Sheppard SC. Robust Prediction of Kd From Soil Properties for Environmental Assessment. *Human and Ecological Risk Assessment. International Journal*. 2011;17(1):263–279. <https://doi.org/10.1080/10807039.2011.538641>.
12. Tarsitano D, Young SD, Crout NM. Journal Evaluating and Reducing a Model of Radiocaesium Soil-Plant Uptake. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2011;102(3):262–269. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.11.017>.
13. Kulikov NV, Molchanova IV, Karavaeva EN. *Radioekologiya pochvenno-rastitel'nogo pokrova* [Radioecology of soil and vegetation cover]. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences; 1990. 173 p. Russian.
14. Nikitin AN, Cheshyk IA, Gutseva GZ, et al. Impact of Effective Microorganisms on the Transfer of Radioactive Cesium Into Lettuce and Barley Biomass. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018;192:491–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.08.005>.
15. 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. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya* [Journal of the Belarusian State University. Ecology]. 2024;2:57–67. DOI: 10.46646/2521-683X/2024-2-57-67. Russian.

Статья поступила в редколлегию 11.02.2025.
Received by editorial board 11.02.2025.