

УДК 631.416.8:539.163:574.2

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА УВЛАЖНЕНИЯ АЛЛЮВИАЛЬНЫХ ПОЧВ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ ЦЕЗИЯ И СТРОНЦИЯ ПО ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ ФОРМАМ

© 2024 г. Г. А. Н. Никитин^{1,*}, С. А. Тагай², Г. А. Соколик³,
М. В. Попеня³, И. А. Кольцов³

¹Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

²Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, Хойники, Беларусь

³Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

*E-mail: nikitinale@gmail.com

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 14.06.2024 г.

Принята к публикации 24.07.2024 г.

Трансформация гидрологического режима пойменных земель из-за изменения климата и антропогенного вмешательства в процессы перераспределения воды в естественных ландшафтах способна оказать существенное влияние на биологическую доступность долгоживущих радиоактивных изотопов цезия и стронция. В камеральном эксперименте установлено, что изменение влажности аллювиальной почвы в пределах 40–100% от полной влагоемкости вызывает перераспределение ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr по формам нахождения. Насыщение почвы водой приводит к увеличению доли водорастворимой формы ¹³⁷Cs, но доля водорастворимой формы ⁹⁰Sr при этом падает. Содержание ионообменной формы ¹³⁷Cs не зависит от влажности почвы. Поведение ионообменной формы ⁹⁰Sr в ответ на изменение влажности почвы зависит от ее характеристик: в дерново-глеевой почве, развивающейся на песчаном аллювии, наблюдается существенное увеличение доли ⁹⁰Sr на фоне роста влажности почвы; в дерново-глеевой почве, развивающейся на супесчаном аллювии, подобное явление не наблюдается. Доля извлекаемой тетрафенилборатом натрия формы ¹³⁷Cs возрастает при насыщении аллювиальных почв водой. Аналогично ведет себя и подвижная форма ⁹⁰Sr, однако при содержании воды 100% от полной влагоемкости в дерново-глеевой почве наблюдается резкое уменьшение доли подвижной формы этого радионуклида. В целом, прослеживается тренд к повышению доли биодоступных форм ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в аллювиальных почвах при повышении их влагообеспеченности, однако характер и величина этого явления зависят от характеристик почвы.

Ключевые слова: аллювиальная почва, цезий-137, стронций-90, биологическая доступность, физико-химические формы, влажность почвы

DOI: 10.31857/S0869803124050089, EDN: LNNCNZ

Авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) 1986 года привела к значительному загрязнению территории Республики Беларусь долгоживущими радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Сегодня этим радионуклидам принадлежит основная роль в формировании радиационного фактора, ограничивающего ведение хозяйственной деятельности. Поведение радиоактивных изотопов цезия и стронция в системе “почва–растение”, а также переход этих радионуклидов по пищевым цепям во многом определяются их распределением по физико-химическим формам нахождения в почве. На этапе перехода к ситуации существующего облучения влияние фактора времени на процессы перераспределения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr по физико-химическим формам практически исчезло. На первый план

выходит влияние агрохимических и агрофизических характеристик почвы, режима увлажнения, воздействие почвенной биоты. Поэтому изменение погодно-климатических условий, прежде всего посредством влияния на водный режим и биоту, способно оказать косвенное влияние на переход дозообразующих радионуклидов чернобыльского происхождения по пищевым цепям. В настоящей работе дана оценка влияния режима увлажнения пойменных почв, их механического состава и других характеристик на распределение ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr по биодоступным физико-химическим формам на этапе отдаленных последствий чернобыльской катастрофы.

Корневое поступление Cs⁺ и Sr²⁺ происходит преимущественно из почвенного раствора, в кото-

ром их концентрация находится в динамическом равновесии с сорбированными формами данных элементов, обладающими различной степенью избирательности и коэффициентами распределения [1, 2].

Сорбция ионов Cs^+ в почвенной среде происходит по трем основным типам: неселективная сорбция в почвенном поглощающем комплексе; селективная сорбция на гранях выветривания слоистых глинистых силикатов со структурой 2 : 1 (FES), сорбция в участках особо высокой селективности, расположенных в межслойных пространствах глинистых силикатов (HAS) [3]. Сорбция ионов Sr^{2+} в почве возможна по двум механизмам: в почвенном поглощающем комплексе и в составе малорастворимых соединений [4].

В почвенном поглощающем комплексе сорбция Cs^+ и Sr^{2+} не избирательна, аналогична другим катионам с соответствующим зарядом (K^+ , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и др.). Обменная физико-химическая форма Cs и Sr извлекается из почвенного поглощающего комплекса 1М раствором ацетата аммония.

На FES селективность сорбции Cs^+ в 200 раз выше по сравнению с NH_4^+ и в 1000 раз выше по сравнению с K^+ [5, 6]. Другие ионы, присутствующие в сколько-нибудь значимых количествах в почве, не подвергаются сорбции на FES. Ионы Cs^+ и K^+ из участков селективной сорбции могут поступать в почвенный раствор при смещении равновесия в системе, поэтому они являются потенциально доступными для корневого поступления в растения. Экстракция Cs^+ и K^+ из FES может быть осуществлена с помощью раствора тетрафенилбората натрия.

Важность учета подвижной (извлекаемой 1М раствором HCl) формы ^{90}Sr обусловлена тем, что она может быть доступна для корневого поступления в растения, хотя и не так быстро, как водорастворимая и обменная формы [7].

Даже при невысокой плотности загрязнения пойменные луга являются довольно значимым источником поступления радиоактивных изотопов цезия и стронция в пищевые цепи. Данная ситуация сохраняется и в отдаленный после аварии на Чернобыльской АЭС период [8]. В связи с внутригодовой и межгодовой вариабельностью водного режима пойм актуальным является выявление закономерностей перераспределения радиоактивных изотопов цезия и стронция по физико-химическим формам в типичных аллювиальных почвах в зависимости от режима их увлажнения. Данные закономерности важны для уточ-

нения прогноза загрязнения растений пойменных экосистем долгоживущими радионуклидами в зависимости от особенностей влагообеспеченности вегетационного периода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования. Для проведения исследований образцы почвы были отобраны на двух реперных участках, расположенных в центральной пойме р. Припять на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (далее ПГРЭЗ) в окрестностях бывшего н. п. Красноселье. Схема расположения реперных участков и их координаты представлены на рис. 1. Данные участки имеют характерный для центральной поймы р. Припять почвенный и растительный покров, но различаются по степени увлажнения, гранулометрическому составу и агрохимическим показателям почвы, а также составу растительных сообществ.

Почва участка № 1 аллювиальная дерново-глееватая, развивающаяся на супесчаном аллювии (рис. 2, А). Грунтовые воды находятся на уровне 0,9–1,2 м, что свидетельствует об оптимальном гидрологическом режиме благоприятном для произрастания растений. Как правило, при таком режиме происходит минимальное накопление радионуклидов. Растительность участка № 1 представлена разнотравно-осоково-злаковой ассоциацией.

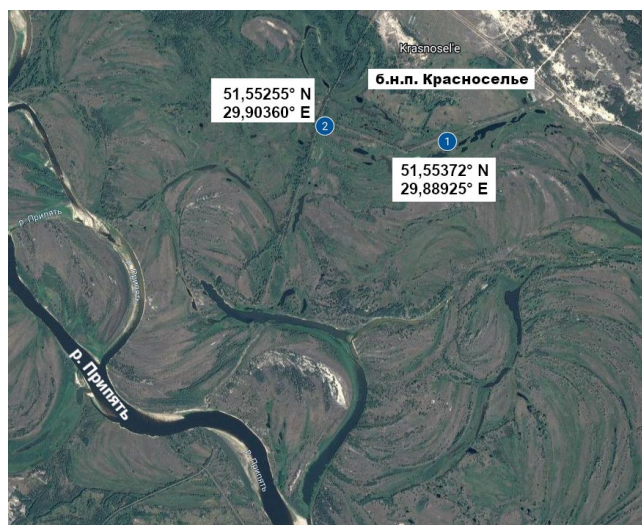


Рис. 1. Расположение реперных участков № 1 (51.552553° N 29.903605° E) и № 2 (51.553727° N 29.88925° E) в пойме р. Припять.

Fig. 1. Position of the sampling plots No. 1 (51.552553° N 29.903605° E) and No. 2 (51.553727° N 29.88925° E) in the floodplain of the Pripyat River.

Таблица 1. Описание почвенных разрезов реперных участков № 1 и № 2
Table 1. Description of soil profiles on the sampling plots № 1 and № 2

Реперный участок № 1 51,552553° N 29,903605° E		Реперный участок № 2 51,553727° N 29,88925° E	
Горизонт	Описание	Горизонт	Описание
A ₁ 0–23 см	Супесь связная коричневатого-серого цвета, структура комковатая, прочная, густо пронизана корнями растений переход в нижележащий горизонт постепенный	A ₀ 0–5 см	Дернина темно-коричневая
		A ₁ 5–18 см	Песок мелкозернистый связный буровато-серого цвета, пронизан корнями растений переход в нижележащий горизонт ясный
A ₁ B ₁ 23–45 см	Супесь рыхлая буровато-коричневого цвета, переход в следующий горизонт постепенный	A ₁ B ₁ g 18–42 см	Песок рыхлый сизовато-белесого цвета, с сизыми глеевыми и охристыми пятнами переход в следующий горизонт постепенный
B ₁ g 45–90 см	Супесь рыхлая желтовато-белесого цвета с сизыми глеевыми и охристыми пятнами, переход заметный	B ₁ g 45–70 см	Супесь рыхлая желтовато-белесого цвета, переход постепенный
B ₂ g 90–130 см	Песок мелкозернистый связный оглеенный, серовато-сизого цвета	B ₂ g 70–110 см	Песок мелкозернистый рыхлый оглеенный, серовато-сизого цвета

Участок № 2 имеет выраженное отличие от первого по гидрологическому режиму и растительному покрову (рис. 2Б). Почва участка № 2 аллювиальная (пойменная) дерново-глеевая, развивающаяся на песчаном аллювии (см. табл. 1). Участок влажный, расположен в пониженном месте с высоким стоянием грунтовых вод (0,5–0,8 м). Растительный покров реперного участка № 2 характеризуется разнотравно-осоковой ассоциацией, с наличием осоковых кочек.

Описание почвенных профилей участков № 1 и № 2 приведено в табл. 1.

Образцы почвы для исследований на реперных участках отбирались на глубину 20 см и тщательно перемешивались. Результаты их агрохимического и радиологического анализа представлены в табл. 2.



Рис. 2. Фотографии почвенных прикопок на реперном участке № 1 (А) и реперном участке № 2 (Б).

Fig. 2. Photographs of soil pits at the sampling plots № 1 (A) and № 2 (B).

Таблица 2. Агрохимическая и радиологическая характеристика почв реперных участков

Table 2. Agrochemical and radiological characteristics of soils on the sampling plots

Показатель	Реперный участок № 1	Реперный участок № 2
Гумус, %	3.25±0.07	7.75±0.16
pH _{KCl}	4.47±0.20	4.34±0.20
pH _{H₂O}	5.22 ± 0.03	5.15 ± 0.04
[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
[Fe _{вал}], мг/кг	5810 ± 50	4085 ± 115
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
[⁹⁰ Sr], Бк/кг	629 ± 61	190 ± 27
Механический состав, %		
2–1 мм	0.4	2.4
0,5–1 мм	23.5	12.1
0,25–0,5 мм	16.5	52.9
0,1–0,25 мм	37.9	25.0
< 0,1 мм	21.8	7.6

Из представленных в таблице данных следует, что полная влагоемкость почвы реперного участка № 2 на 25% выше, чем реперного участка № 1. Почва участка № 2 содержит существенно больше органического вещества. Обе почвы характеризуются повышенным содержанием обменного кальция (1394 и 1253 мг/кг), но низким содержанием подвижного калия (23.7–29.3 мг/кг). Исследуемые почвы относятся к среднекислым, что обуславливает повышенную доступность исследуемых радионуклидов для растений [9]. Преобладающей фракцией механического состава почвы реперного участка № 1 является фракция с размерами частиц 0.1–0.25 мм, вклад фракции <0.1 мм составляет 21.8%. Механический состав почвы реперного участка № 2 смещен в сторону более крупных фракций.

Хотя реперные участки расположены недалеко друг от друга, высокая мозаичность радиоактивного загрязнения в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС привела к тому, что различия между ними по удельной активности ^{90}Sr составляют почти 3 раза, по удельной активности ^{137}Cs — почти 1.3 раза. Причем удельная активность ^{90}Sr выше на первом реперном участке, ^{137}Cs — на втором.

Методика исследования. Для оценки влияния режима увлажнения аллювиальной почвы на распределение радиоактивных изотопов цезия и стронция по физико-химическим формам был заложен эксперимент в камеральных условиях. Образцы почвы массой 500–600 г (по воздушно-сухой массе) были помещены в сосуды, где 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 накрывали полимерной пленкой и экспонировали при заданной влажности и комнатной температуре 70–80 сут для ^{137}Cs и 21 сут — для ^{90}Sr . Влажность почвенных образцов контролировали по их массе, в случае необходимости почву дополнительно увлажняли.

По окончании заданного периода проводилось определение запаса ^{90}Sr в водорастворимой, обменной, подвижной и фиксированной формах, ^{137}Cs в обменной, водорастворимой и лабильной формах, а также общее содержание радионуклида. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в определяемых физико-химических формах рассчитывали в процентах от их общего содержания в почве.

Содержание форм нахождения радионуклида ^{137}Cs определялось методом селективного экстрагирования в трехкратной повторности. Водорастворимая

форма извлекалась дистиллированной водой в соотношении 1:10 на протяжении 24 ч. Обменная форма извлекалась 1 моль/л раствором ацетата аммония (рН 7.0) в соотношении 1 : 10 на протяжении 24 ч. Лабильной формой в настоящем исследовании обозначен ^{137}Cs , извлекаемый тетрафенилборатом натрия [10–12].

Для определения физико-химических форм нахождения ^{90}Sr в пойменных почвах использовали метод последовательных экстракций, предложенный Ф.И. Павлоцкой: водорастворимую — извлекали дистиллированной водой, обменную — 1 моль/л раствором ацетата аммония, подвижную — 1 моль/л раствором соляной кислоты. Соотношение между почвой и экстрагирующим раствором составляло 1 : 5, время экстракции — 24 ч. После последней экстракции кислотой остаток почвы высушивали и определяли содержание ^{90}Sr в фиксированной (труднодоступной) форме.

Содержание ^{137}Cs в экстрактах определяли на гамма-спектрометрическом комплексе Canberra с коаксиальным полупроводниковым детектором из высокочистого германия в плоской счетной мишени диаметром, равным диаметру детектора, и объемом 100 мл. Содержание ^{90}Sr в экстрактах оценивали методом радиохимического анализа по β -активности дочернего изотопа ^{90}Y на радиометре КРК-1-01. Химический выход ^{90}Sr в пробах устанавливали методом пламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии на установке ZEE nit 700, выход носителя иттрия определяли гравиметрическим методом.

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 двухфакторного дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Долю экстрагируемых из почвы дистиллированной водой радиоактивных изотопов цезия и стронция можно рассматривать в качестве показателя их содержания в почвенном растворе. Это наиболее доступная для корневого поступления форма нахождения ионов щелочных и щелочноземельных металлов, и ее доля довольно тесно связана с коэффициентом накопления радионуклидов растениями.

Таблица 3. Двухфакторный дисперсионный анализ влияния влажности и характеристик почвы на долю физико-химических форм ^{137}Cs **Table 3.** Two-way ANOVA analysis of the influence of the soils moisture and their other characteristics on the speciation of ^{137}Cs

Фактор	Водорастворимая	Обменная	Лабильная
Влажность почвы	$\frac{3.57^*}{0.118}$	$\frac{0.68}{-0.008}$	$\frac{40.49^{**}}{0.062}$
Участок / характеристики почвы	$\frac{27.24^{**}}{0.403}$	$\frac{104.40^{**}}{0.817}$	$\frac{1717.62^{**}}{0.891}$
Совместное влияние факторов	$\frac{3.06}{0.095}$	$\frac{0.71}{-0.007}$	$\frac{22.96^{**}}{0.034}$

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 $p < 0.01$.

Следует также отметить, что радионуклиды в водорастворимой форме наиболее подвижны в почве и участвуют в процессах вертикальной и горизонтальной миграции с потоками воды и за счет диффузии.

В супесчаной почве реперного участка № 1 доля ^{137}Cs в водорастворимой форме существенно выше по сравнению с песчаной почвой реперного участка № 2, 0.22–1.13% и 0.12–0.44% соответственно (рис. 3). На супесчаной почве увеличение влажности почвы с 40% от полной влагоемкости до 70% и выше приводит практически к пятикратному повышению доли водорастворимой формы. Колебания значений доли водорастворимой формы с изменением влажности в песчаной почве не столь сильные. При влажности почвы 40–85% от полной влагоемкости доля водорастворимой формы составляет 0.12–0.19% и несколько снижается по мере увеличения влагообеспеченности. При переходе к 100% влажности доля водорастворимой формы ^{137}Cs резко увеличивается до 0.44%. Различия в пороге влажности, при котором происходит резкое изменение доли водорастворимой формы ^{137}Cs в почвах, вероятно, обусловлено особенностями состояния комплексов специфического связывания цезия.

Не выявлено зависимости содержания ^{90}Sr в водорастворимой форме от особенностей аллювиальных почв обоих исследуемых участков. Доля ^{90}Sr в этой форме составляет 2% при влажности почвы 40–85% от полной почвенной влагоемкости и падает до 1% при увеличении влажности до 100%.

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа показывают, что на долю водорастворимой формы ^{137}Cs в аллювиальных почвах оказывают влияние прежде всего характеристики почвы (табл. 3), но значимо также влияние влажности почвы. В отношении ^{90}Sr ситуация иная: дисперсионный анализ подтверждает высокую значимость

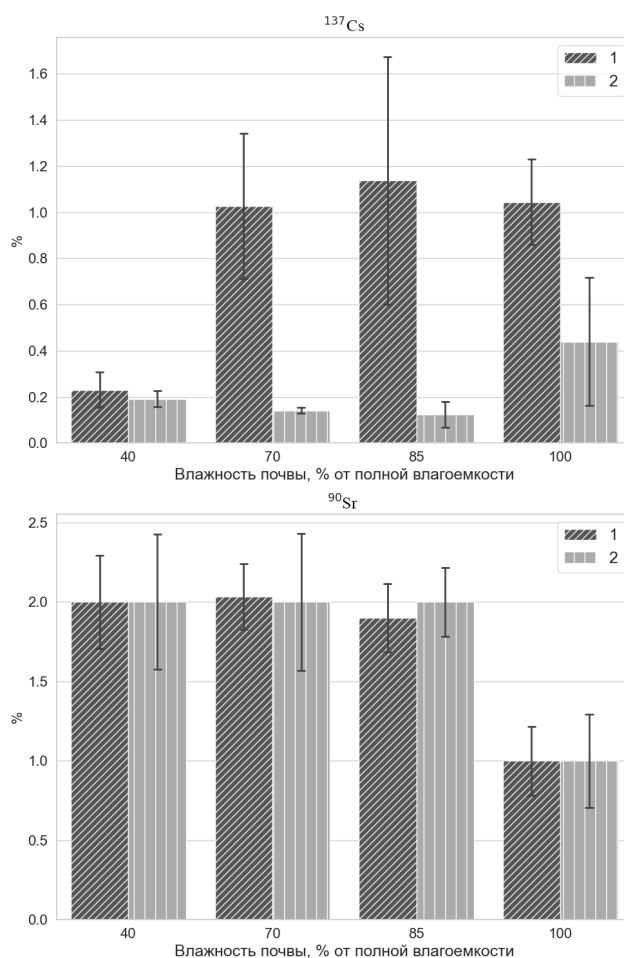


Рис. 3. Влияние влажности почвы на долю ^{137}Cs и ^{90}Sr в водорастворимой форме в дерново-глееватой на супесчаном аллювии почве (1) и дерново-глеевой на песчаном аллювии почве (2). Планки погрешностей – стандартное отклонение.

Fig. 3. Effect of soil moisture on the share of water-soluble ^{137}Cs and ^{90}Sr in sod-gleyed soil on sandy-loam alluvium (1) and sod-gley soil on sandy alluvium (2). Error bars are standard deviation.

Таблица 4. Двухфакторный дисперсионный анализ влияния влажности и характеристик почвы на долю физико-химических форм ⁹⁰Sr
Table 4. Two-way ANOVA analysis of the influence of the soils moisture and their other characteristics on the speciation of ⁹⁰Sr

Фактор	Водорастворимая	Обменная	Подвижная
Влажность почвы	$\frac{10.87^{**}}{0.595}$	$\frac{25.90^{**}}{0.203}$	$\frac{3.87^*}{0.097}$
Участок / характеристики почвы	$\frac{0.01}{-0.020}$	$\frac{222.39^{**}}{0.602}$	$\frac{41.07^{**}}{0.450}$
Совместное влияние факторов	$\frac{0.037}{-0.058}$	$\frac{16.96^{**}}{0.130}$	$\frac{6.43^{**}}{0.183}$

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 $p < 0.01$.

влияния влажности почвы на долю этого радиоизотопа в водорастворимой форме (табл. 4). В то же время характеристики аллювиальной почвы не продемонстрировали значимого влияния на данный показатель.

Таким образом, зависимость доли водорастворимых форм ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr от режима увлажнения почвы на этапе отдаленных последствий радиоактивных выпадений имеет различный характер. Если для радиоактивного изотопа цезия характерен тренд к росту данного показателя с увеличением влажности почвы, то доля ⁹⁰Sr в водорастворимой форме снижается в два раза при полном насыщении почвы водой по сравнению с долей ⁹⁰Sr в почвах с пониженными уровнями влагообеспеченности. Исследуемые почвы относятся к гидроморфным, находятся в условиях длительного подъема грунтовых вод к поверхности почвы. В этих условиях практически все потенциально водорастворимые формы радионуклидов переходят в почвенный раствор. Если гидроморфные почвы имеют контакт с большим объемом свободной воды, способной как экстрагировать водорастворимые формы, так и отдавать их в процессе сорбции, то соотношение физико-химических форм ⁹⁰Sr зависит от параметров динамического равновесия процесса сорбции/десорбции.

Экспериментальные результаты свидетельствуют, что для аллювиальных почв изменение степени влагообеспеченности почвы не влияет на содержание ¹³⁷Cs в обменной форме. Вместе с тем доля ионообменной формы ¹³⁷Cs существенно зависит от свойств исследуемых почв ($F = 104.40$; $p < 0.01$), обусловленных особенностями гидрогеологического строения территории поймы. Среднее содержание ¹³⁷Cs в этой форме не превышает 1.8% от общего содержания радионуклида в дерново-глеевой почве

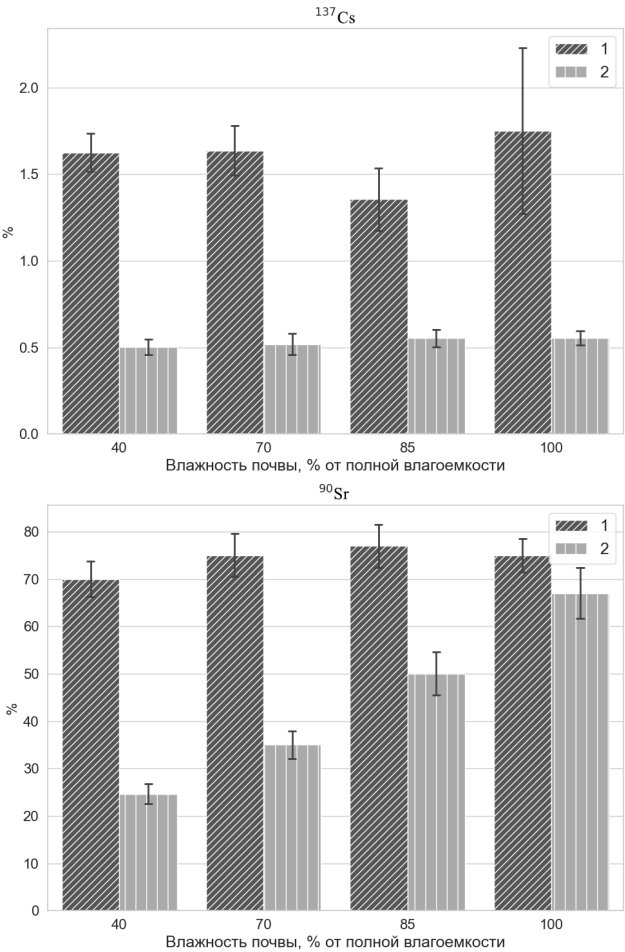


Рис. 4. Влияние влажности почвы на долю ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в ионообменной форме в дерново-глеевой на супесчаном аллювии почве (1) и дерново-глеевой на песчаном аллювии почве (2). Планки погрешностей – стандартное отклонение.

Fig. 4. Effect of soil moisture on the share of ion-exchange ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in sod-gleyed soil on sandy-loam alluvium (1) and sod-gley soil on sandy alluvium (2). Error bars are standard deviation.

на супесчаном аллювии и составляет около 0.6% в дерново-глеевой почве на песчаном аллювии (рис.4).

Изменение степени влагообеспеченности пойменной дерново-глеевой почвы развивающейся на супесчаном аллювии существенно не повлияло на содержание ^{90}Sr в обменной форме (70–77% от его общего содержания в почве). В отношении пойменной дерново-глеевой почвы, развивающейся на песчаном аллювии при повышении влагоемкости от 40 до 100% ПВ наблюдается существенное увеличение доли ^{90}Sr в обменной форме (в 2.8 раза). Доля обменной формы является

одной из важных характеристик относительной подвижности и биологической доступности ^{90}Sr в почве. Полученные результаты свидетельствуют о высокой мобильности ^{90}Sr в дерново-глеевой почве на супесчаном аллювии в широком диапазоне влажности. В дерново-глеевой почве на песчаном аллювии мобильность данного радионуклида существенно возрастает с повышением влагообеспеченности. О сильной зависимости доли обменной формы ^{90}Sr от характеристик аллювиальной почвы свидетельствуют и результаты дисперсионного анализа ($F = 222.39$; $p < 0.01$).

Двухфакторный дисперсионный анализ указывает на значимое влияние как характеристик аллювиальных почв, так и режима их увлажнения на долю лабильной формы ^{137}Cs . Доля этой формы существенно выше в дерново-глеевой почве на песчаном аллювии по сравнению с дерново-глеевой на супесчаном аллювии (рис. 5). Причем в первом варианте доля лабильной формы практически линейно увеличивается с ростом влагообеспеченности. В почве на супесчаном аллювии заметное увеличение доли лабильной формы радиоактивного изотопа цезия наблюдается только при переходе к влажности 100% от полной влагоемкости.

Лабильная форма представляет собой цезий, сосредоточенный на участках селективной сорбции, а также значительную часть элемента из участков особо высокой селективности. Радиоактивные изотопы цезия из этой формы могут быть ремобилизованы в течение вегетационного периода и перейти в ткани растения посредством корневого поглощения [10]. Известно, что увеличение влажности почвы приводит к расширению межпакетных пространств глинистых минералов группы монтмориллонитов и некоторых других со структурой 2 : 1, благодаря чему облегчается выход катионов щелочных металлов в растворенное состояние [13].

Более высокий уровень грунтовых вод реперного участка № 2 изменяет микробиологическую активность почвы в сторону более высокого накопления ионов аммония и органического вещества. Считается, что органические молекулы могут проникать в межпакетные пространства глинистых минералов, удерживая их в расширенном состоянии и сдвигая область FES вглубь решетки [14]. Результатом этого является увеличение емкости селективной и особо высоко селективной сорбции. Поведение ионов NH_4^+ сходно с поведением ионов Cs^+ в почвенной среде, они конкурируют за участки специфического связывания и место в межпакетных пространствах.

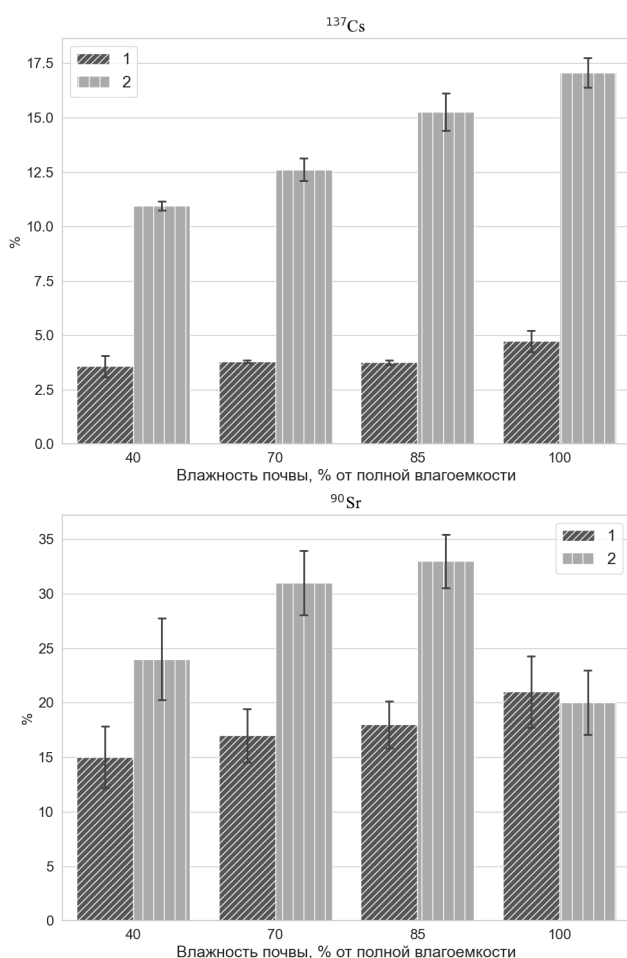


Рис. 5. Влияние влажности почвы на долю ^{137}Cs в лабильной и ^{90}Sr в подвижной формах в дерново-глеевой на супесчаном аллювии почве (1) и дерново-глеевой на песчаном аллювии почве (2). Планки погрешностей – стандартное отклонение.

Fig. 5. Effect of soil moisture on the share of labil ^{137}Cs and mobile ^{90}Sr in sod-gleyed soil on sandy-loam alluvium (1) and sod-gley soil on sandy alluvium (2). Error bars are standard deviation.

Поэтому ионы NH_4^+ из почвенного раствора могут служить фактором, ускоряющим выход ^{137}Cs из межпакетных пространств. Эти два фактора являются наиболее вероятной причиной, объясняющей более высокую долю лабильной формы ^{137}Cs в дерново-глеевой почве на песчаном аллювии по сравнению с дерново-глееватой на супесчаном аллювии и более сильную ее зависимость от условий увлажнения.

Доля ^{90}Sr в подвижной форме в пойменной дерново-глеевой почве варьировала в интервале 20–33% от общего содержания радионуклида. Максимальная доля ^{90}Sr в подвижной форме была зафиксирована при влажности 85% от ПВ. В пойменной дерново-глееватой супесчаной почве при увеличении влажности от 40 до 100% относительно ПВ доля ^{90}Sr в подвижной форме увеличилась на 40%, что составило 21% от общего содержания радионуклида.

Полученные результаты показали, что режим увлажнения способен оказывать существенное влияние на содержание ^{137}Cs в водорастворимой и лабильной формах в аллювиальных почвах, что должно отражаться на его доступности для корневого потребления растениями. Данное явление можно объяснить способностью некоторых слоистых силикатов, в частности монтмориллонита, набухать в присутствии воды, расширяя межслойные пространства, что облегчает выход сорбированных в них катионов в почвенный раствор. Рост концентрации растворимой формы ^{137}Cs при увеличении влажности почвы обусловлен произошедшим в ходе эксперимента выходом ионов Cs^+ в почвенный раствор в результате смещения динамического равновесия. Рост концентрации лабильной формы ^{137}Cs обусловлен увеличением скорости выхода ионов Cs^+ из расширившихся межпакетных пространств по градиенту концентрации, создаваемому образованием тетрафенилбората цезия с очень низкой растворимостью ($K_{\text{sp}} = 8.4 \times 10^{-10}$) в ходе экстракции. При потере почвой влаги происходит сужение межпакетных пространств, смещение динамического равновесия в сторону участков особо высокой селективности и уменьшение концентрации ионов Cs^+ в почвенном растворе.

В почвенной среде активно происходят процессы сорбции и десорбции ^{90}Sr . Изменение влагонасыщенности пойменных почв влияет на соотношение водорастворимой, обменной и других форм катионов, включая $^{90}\text{Sr}^{2+}$. При выносе из горизонта или поглощении растениями и микроорганизмами водорастворимой и обменной фракции равновесие, характерное для почвы, вскоре восстанавливается —

ранее связанные радионуклиды переходят в подвижные формы. При изменении внешних условий, например, увеличении минерализации почвенного раствора в засушливый период, подвижные формы, напротив, переходят в фиксированные.

Влияние влажности почвы на перераспределение ^{90}Sr по физико-химическим формам можно объяснить изменением ионной силы почвенного раствора, происходящим в результате разбавления или концентрирования, что вызывает смещение динамического равновесия между соединениями стронция с низкой растворимостью, ионами в почвенном поглощающем комплексе и в почвенном растворе. Сорбция ^{90}Sr в твердой фазе почв сильно зависит от эффективных концентраций других катионов в почвенном растворе. С увеличением эффективных концентраций сопутствующих катионов в растворе уменьшается количество радионуклида, сорбированного твердой фазой почвы. Установлены следующие ряды влияния конкурирующих катионов на сорбцию ^{90}Sr твердой фазой почв: $\text{Al}^{3+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$ [15].

Возможным объяснением резкого снижения доли растворимой формы ^{90}Sr при влажности почвы 100% от ПВ является процесс оглеения, протекающий при высокой влажности и в анаэробных условиях, в которых находились образцы почвы на протяжении достаточно продолжительного времени. Восстановление Fe и Mn с окислением органических веществ и образованием фульвокислот в этих условиях может способствовать снижению растворимости Sr. Предлагаемые объяснения наблюдаемых явлений нуждаются в экспериментальном подтверждении.

Изменение климата Белорусского Полесья синхронизировано с глобальным потеплением [16]. Период потепления (1989–2015 гг.) сопровождался увеличением количества осадков в восточной части Полесья (Гомельская область) по сравнению с западной (Брестская область) и по сравнению с климатической нормой (1961–1990 гг.) [17]. Динамичные ландшафты речных пойм ежегодно проходят периоды затопления, выраженность и продолжительность которых сказывается на поведении радиоактивных изотопов.

Результаты исследований показывают, что трансформация гидрологического режима пойменных земель из-за изменения климата и антропогенного вмешательства в процессы перераспределения воды в естественных ландшафтах способна оказать определенное влияние на биологическую

доступность долгоживущих радиоактивных изотопов цезия и стронция. Однако направленность и величина этих процессов определяется не только характером перераспределения техногенных радионуклидов по физико-химическим формам, но и агрохимическими и агрофизическими свойствами почв, сукцессиями растительных ассоциаций при трансформации гидрологического режима, а также характером антропогенного вмешательства. Поэтому требуются дальнейшие исследования в направлении оценки и прогноза влияния региональных и глобальных изменений погодно-климатических условий и гидрологических факторов на переход дозообразующих радионуклидов в пищевые цепи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постоянная миграция, концентрирование и биопоглощение радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , обусловленные вовлечением их в пойменное почвообразование, а также естественный распад и фиксация этих радионуклидов почвенным поглощающим комплексом изменяют радиоэкологическую обстановку в отдаленный постчернобыльский период. Одним из факторов, оказывающих существенное влияние на поведение долгоживущих радионуклидов чернобыльских выпадений в пойменных экосистемах, является гидрологический режим.

В камеральном эксперименте установлено, что изменение влажности аллювиальной почвы в пределах 40–100% от полной влагоемкости приводит к перераспределению ^{137}Cs и ^{90}Sr по физико-химическим формам нахождения. Насыщение почвы водой приводит к увеличению доли водорастворимой формы ^{137}Cs , но доля водорастворимой формы ^{90}Sr при этом падает. Содержание ионообменной формы ^{137}Cs не зависит от влажности почвы. Поведение ионообменной формы ^{90}Sr в ответ на изменение влажности почвы зависит от ее характеристик: в дерново-глеевой почве, развивающейся на песчаном аллювии, наблюдается существенное увеличение доли ^{90}Sr на фоне роста влажности почвы; в дерново-глееватой почве, развивающейся на супесчаном аллювии, подобное явление не наблюдается. Доля лабильной (извлекаемой тетрафенилборатом натрия) формы ^{137}Cs возрастает при насыщении аллювиальных почв водой. Аналогично ведет себя и подвижная форма ^{90}Sr , однако при содержании воды 100% от полной влагоемкости в дерново-глеевой на песчаном аллювии почве наблюдается резкое уменьшение доли подвижной формы этого радионуклида.

В целом прослеживается тренд к повышению доли биодоступных форм ^{137}Cs и ^{90}Sr в аллювиальных

почвах при повышении их влагообеспеченности, однако характер и величина этого явления зависят от характеристик почвы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность Т.В. Ласько за квалифицированное описание почвенных разрезов реперных участков; Г.А. Леферд — за проведение анализов и определение агрохимических характеристик почвы, а также проведение селективного экстрагирования ^{137}Cs в обменной, водорастворимой и лабильной формах; Е.В. Мищенко — за выполнение гамма-спектрометрических измерений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования выполнены в рамках НИР 3.04.01 “Моделирование фитоценологических сукцессий и перераспределения радиоактивных изотопов в пойменных экосистемах при изменении гидрологического режима территории” государственной программы научных исследований “Природные ресурсы и окружающая среда” Республики Беларусь.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Konoplev A. Mobility and Bioavailability of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Soil–Water Environment: Review. In: Behavior of Radionuclides in the Environment II. Singapore: Springer, 2020. P. 157–193. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_3
2. Санжарова Н.И., Сысоева А.А., Исамов Н.Н., Алексахин Р.М. Роль химии в реабилитации сельскохозяйственных угодий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. *Рос. хим. журн.* 2005;XLIX(3):026–34. [Sanzharova N.I., Sysoeva A.A., Isamov N.N., Alexakhin R.M. Rol' himii v reabilitacii sel'skhozjajstvennyh ugodij, podvergshihsj radioaktivnomu zagrjazneniju = The role of chemistry in the rehabilitation of agricultural lands exposed to radioactive contamination. *Ros. him. zhurn.* 2005;XLIX(3):26–34. (In Russ.)].
3. Cremers A., Elsen A., Preter P.D. et al. Quantitative analysis of radiocaesium retention in soils. *Nature*. 1988;335(6187):247–249. <https://doi.org/10.1038/335247a0>
4. Архипов В.М., Федоров Е.А., Алексахин Р.М. и др. Почвенная химия и корневое накопление искусственных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений. *Почвоведение*. 1975;(11):40–52. [Arhipov N.P., Fedorov Ye.A., Alexakhin R.M. et al. Pochvennaya himiya i kornevoe nakoplenie iskusstvennyh radionuklidov v urozhae sel'skhozjajstvennyh rastenij = Soil chemistry and

- root accumulation of artificial radionuclides in agricultural crops. *Pochvovedeniye*. 1975;(11):40–52. (In Russ.).
5. Vandebroek L., Hees M.V., Delvaux B. et al. Relevance of radiocaesium interception potential (RIP) on a worldwide scale to assess soil vulnerability to ^{137}Cs contamination. *J. Environ. Radioact.* 2012;104:87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.09.002>
 6. Wauters J., Vidal M., Elsen A. et al. Prediction of solid/liquid distribution coefficients of radiocaesium in soils and sediments. part two: a new procedure for solid phase speciation of radiocaesium. *Appl. Geochem.* 1996;11(4):595–599. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(96\)00028-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(96)00028-5)
 7. Подоляк А.Г. Влияние вертикальной миграции и форм нахождения ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах на их биологическую доступность на примере естественных лугов Белорусского Полесья. *Агрохимия*. 2007;(2):72–82. [Podoljak A.G. Vlijanie vertikal'noj migracii i form nahozhdenija ^{137}Cs i ^{90}Sr v pochvah na ih biologicheskuyu dostupnost' na primere estestvennyh lugov Belorusskogo Poles'ja = The influence of vertical migration and forms of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils on their biological availability with example of natural meadows of the Belarusian Polesie. *Agrohimiya*. 2007;(2):72–82. (In Russ.).]
 8. Подоляк А.Г., Валетов В.В., Карпенко А.Ф. Научные аспекты сельскохозяйственного производства в постчернобыльских условиях. Мозырь: МГПУ им. И.П. Шамякина, 2017. 242 с. [Podoljak A.G., Valetov V.V., Karpenko A.F. Nauchnye aspekty sel'skhozajstvennogo proizvodstva v postchernobyl'skikh usloviyah = Scientific aspects of agricultural production in post-Chernobyl conditions. Mozyr': MGPU im. I.P. Shamjakina, 2017. 242 p. (In Russ.).]
 9. Prister B. Behavior of the Chernobyl-Derived Radionuclides in Agricultural Ecosystems. In: Behavior of Radionuclides in the Environment II. Singapore: Springer, 2020. P. 229–282. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3568-0_5
 10. Delvaux B., Kruijs N., Cremers A. Rhizospheric mobilization of radiocaesium in soils. *Environ. Sci. Technol.* 2000;34(8):1489–1493. <https://doi.org/10.1021/es990658g>
 11. Bilius F., Barbayiannis N. Evaluation of sodium tetraphenylboron (NaBPh_4) as a soil test of potassium availability. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2017;63(4):468–476. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1218479>
 12. Jackson B.L.J. A modified sodium tetraphenylboron method for the routine determination of reserve-potassium status of soil. *New Zealand J. Experim. Agriculture*. 1985;13(3):253–262. <https://doi.org/10.1080/03015521.1985.10426091>
 13. Fried M., Broeshart H. The soil-plant system: in relation to inorganic nutrition. New York, San Francisco, London: Academic Press, 1967. 357 p.
 14. Hird A.B., Rimmer D.L., Livens F.R. Total caesium-fixing potential of acid organic soils. *J. Environ. Radioact.* 1995;26:103–118. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(94\)00012-L](https://doi.org/10.1016/0265-931X(94)00012-L)
 15. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В. и др. Современное состояние исследований поведения ^{90}Sr в системе почва-сельскохозяйственные растения (обзор). *Радиац. биология. Радиоэкология*. 2019;59(6):643–655. [Sanzharova N.I., Geshel' I.V., Krylenkin D.V. et al. Sovremennoe sostojanie issledovanij povedenija ^{90}Sr v sisteme pochva-sel'skhozajstvennyye rastenija (obzor) = Current state of research on the behavior of ^{90}Sr in the soil-agricultural plant system (review). *Radiacionnaya biologiya. Radiojekologiya*. 2019;59(6):643–655. (In Russ.).] <https://doi.org/10.1134/S0869803119060109>
 16. Данилович И.С., Мельник В.И., Гейер Б. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы. *Журн. БГУ. География. Геология*. 2020;(1):3–13. [Danilovich I.S., Melnik V.I., Geyer B. The current climate changes in Belarusian Polesje region: factors, consequences, projections. *J. Belar. State University. Geography and Geology*. 2020;(1):3–13. (In Russ.).] <https://doi.org/10.33581/2521-6740-2020-1-3-13>
 17. Логинов В.Ф., Мельник В.И. Особенности изменения осадков в Белорусском Полесье в современный период. *Природные ресурсы: Межведомственный бюллетень*. 2019;(2):104–112. [Loginov V.F., Melnik V.I. Features of changes in precipitation in Belarusian Polesia in modern period. *Prirodnye resursy: Mezhhvedomstvennyj bjulleten'*. 2019;(2):104–112 (In Russ.).]

Influence of Moisture Regime on the Redistribution of Radioactive Cesium and Strontium Isotopes in Alluvial Soils by Physico-Chemical Forms

A. N. Nikitin^{1,*}, S. A. Tagay², G. A. Sokolik³,
M. V. Popenya³, I. A. Koltsov³

¹*Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Polesye State Radiation-Ecological Reserve, Choiniki, Belarus*

³*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

*E-mail: nikitinale@gmail.com

The transformation of the hydrological regime of floodplains due to climate change and anthropogenic impact on water redistribution processes within natural landscapes can significantly impact the bioavailability of long-lived radioactive isotopes of cesium and strontium. A laboratory experiment demonstrated that varying the moisture content of alluvial soil within 40–100% from its full water-holding capacity leads to the redistribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr between different chemical forms. Soil saturation with water increases the proportion of water-soluble ^{137}Cs , while the proportion of water-soluble ^{90}Sr decreases. The ion-exchangeable form of ^{137}Cs remains unaffected by soil moisture. The behavior of the ion-exchangeable form of ^{90}Sr in response to changes in soil moisture is dependent on soil characteristics: a significant increase in the proportion of ^{90}Sr was observed in sod-gley soil developed on

sandy alluvium as soil moisture increased; however, this phenomenon was not observed in sod-gleyed soil developed on loamy alluvium. The proportion of ^{137}Cs extracted by sodium tetrphenylborate increases when alluvial soils are saturated with water. Similarly, the mobile form of ^{90}Sr behaves in the same manner, but when soil moisture reaches 100% of its full water-holding capacity in sod-gley soil, a sharp decrease in the proportion of the mobile form of this radionuclide is observed. Overall, there is a trend towards increased proportions of bioavailable forms of ^{137}Cs and ^{90}Sr in alluvial soils with increased moisture content, although the peculiarities and magnitude of this phenomenon depend on the specific soil characteristics.

Keywords: alluvial soil; cesium-137; strontium-90; bioavailability; physico-chemical forms; soil moisture

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Никитин Александр Николаевич (Nikitin Aleksander Nikolaevich), <https://orcid.org/0000-0002-1369-0093>, Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus); e-mail: nikitinale@gmail.com

Тагай Светлана Алексеевна (Tagai Svetlana Alekseevna), <https://orcid.org/0000-0001-8387-1095>, Полесский государственный радиационно-экологический заповедник, Хойники, Беларусь (Polesye State Radiation-Ecological Reserve, Choiniki, Belarus); e-mail: lanabuz@tut.by

Соколик Галина Андреевна (Sokolik Galina Andreevna), Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (Belarussian State University, Minsk, Belarus); e-mail: sokolikga@mail.ru

Попеня Марина Викторовна (Papienia Maryna Viktrauna), <https://orcid.org/0000-0001-7059-9934>, Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (Belarussian State University, Minsk, Belarus); e-mail: marine_p19@mail.ru

Кольцов Илья Андреевич (Koltsov Ilya Andreevich), Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь (Belarussian State University, Minsk, Belarus); e-mail: koltsovilya.me@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Никитин А.Н. — научное руководство работой, подбор объектов исследования, определение методов исследования и программы работ, проведение математической и статистической обработки данных, анализ полученных результатов.

Тагай С.А. — постановка эксперимента с изменением форм нахождения ^{137}Cs в почвах.

Соколик Г.А. — постановка эксперимента с изменением форм нахождения ^{90}Sr в почве.

Попеня М.В., Кольцов И.А. — радиохимический анализ образцов почвы и экстрактов для определения содержания в них ^{90}Sr , обработка результатов эксперимента по изменению форм нахождения ^{90}Sr в почве.