

АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ,
ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ

Научная статья

631.4:546.36:631.5

doi: 10.31774/2712-9357-2023-13-2-228-241

Миграция ^{137}Cs в экосистеме поймы р. Унеча

Андрей Леонидович Силаев¹, Евгений Владимирович Смольский²

^{1, 2}Брянский государственный аграрный университет, Кокино, Российская Федерация

¹kafear@bgsha.com, <https://orcid.org/0000-0001-7837-4254>

²sev_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7534-5893>

Аннотация. Цель: изучение миграции и концентрации ^{137}Cs в профиле аллювиальных почв и перехода радионуклида в растения в пойменной экосистеме р. Унеча. **Материалы и методы.** Полевые исследования проводили в 2019–2021 гг. в Брянской области (Клинцовский район, с. Лопатни, правый берег р. Унеча, действующая мелиорационная система). Плотность загрязнения ^{137}Cs территории после аварии на ЧАЭС составляла 185–555 кБк/м². Отбирались сопряженные почвенные и растительные образцы в различных подсистемах поймы (приусловой, центральной, притеррасной). Общепринятыми лабораторными методами определяли агрохимические показатели плодородия и удельную активность ^{137}Cs в почве и растениях. **Результаты.** Установили сильную изменчивость агрохимических показателей аллювиальных почв по слоям через 5 см в пределах 0–20 см. Обнаружили высокое содержание подвижного фосфора и низкое – калия, сильноокислую реакцию среды, тенденцию к росту содержания органического углерода от приусловой к притеррасной подсистеме поймы. Горизонтальное распределение ^{137}Cs в почвах поймы р. Унеча определялось генезисом почв пойменных подсистем, максимум удельной активности ^{137}Cs 3953 Бк/кг установили в притеррасной части поймы. Максимальную концентрацию ^{137}Cs обнаружили в приусловой и центральной подсистеме в слое почвы 0–5 см, а в притеррасной в слое 5–10 см. В пойме р. Унеча коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растения снижается от центральной к приусловой и притеррасной. **Выводы.** Формирование агрохимических показателей плодородия аллювиальных почв и вертикальное распределение ^{137}Cs определяется генезисом почв пойменных подсистем, оно может быть равномерно убывающим или с концентрированием в отдельных слоях на биохимических барьерах. В пойменной экосистеме концентрация ^{137}Cs в слое 0–20 см возрастает от приусловой к притеррасной подсистеме. Кормопроизводство в условиях радиоактивного загрязнения приусловой и центральной частей поймы возможно без применения защитных мероприятий.

Ключевые слова: пойменная экосистема, аллювиальная почва, плодородие, радиоактивное загрязнение, распределение, ^{137}Cs , корреляция

Для цитирования: Силаев А. Л., Смольский Е. В. Миграция ^{137}Cs в экосистеме поймы р. Унеча // Мелиорация и гидротехника. 2023. Т. 13, № 2. С. 228–241. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-228-241>.

AGROCHEMISTRY, AGROSOIL SCIENCE,
PLANT PROTECTION AND QUARANTINE

Original article

^{137}Cs migration in the floodplain ecosystem of the Unecha river

Andrei L. Silaev¹, Evgeny V. Smolsky²

^{1, 2}Bryansk State Agrarian University, Kokino, Russian Federation

¹kafeap@bgsha.com, <https://orcid.org/0000-0001-7837-4254>

²sev_84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7534-5893>

Abstract. Purpose: to study the ^{137}Cs migration and concentration in the alluvial soils profile and the radionuclide transfer to plants in the river Unecha floodplain ecosystem. **Materials and methods.** Field studies were carried out in 2019–2021 in Bryansk region (Klintsovsky district, the village of Lopatni, the right bank of the river Unecha, the current reclamation system). The density of ^{137}Cs contamination of the territory after the Chernobyl accident was 185–555 kBq/m². Conjugated soil and plant samples were taken in various subsystems of the floodplain (near-channel, central, near-terrace). Agrochemical indicators of fertility and ^{137}Cs specific activity in soil and plants were determined using generally accepted laboratory methods. **Results.** A strong variability of the agrochemical parameters of alluvial soils in layers every 5 cm within 0–20 cm was determined. A high content of mobile phosphorus and a low content of potassium, a strongly acid reaction of the environment, and a tendency to the growth in the organic carbon content from the near-channel to near-terrace floodplain subsystem was found. The ^{137}Cs horizontal distribution in the river Unecha floodplain soils was determined by soil genesis of the floodplain subsystems; the maximum specific activity of ^{137}Cs 3953 Bq/kg was found in the near-terrace part of the floodplain. The ^{137}Cs maximum concentration was found in the near-channel and central subsystem in the soil layer of 0–5 cm, and in the near-terrace subsystem in the layer of 5–10 cm. In the floodplain of the river Unecha, the ^{137}Cs coefficient transfer from soil to plants decreases from the central to the near-channel and near-terrace. **Conclusions.** The formation of agrochemical indicators of alluvial soil fertility and the ^{137}Cs vertical distribution is determined by soil genesis in floodplain subsystems; it can be uniformly decreasing or concentrated in separate layers at biochemical barriers. In the floodplain ecosystem, the ^{137}Cs concentration in the 0–20 cm layer increases from the near-channel to near-terrace subsystem. Forage production under the conditions of radioactive contamination of the near-river and central parts of the floodplain is possible without the use of protective measures.

Keywords: floodplain ecosystem, alluvial soil, fertility, radioactive contamination, distribution, ^{137}Cs , correlation

For citation: Silaev A. L., Smolsky E. V. ^{137}Cs migration in the floodplain ecosystem of the Unecha river. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2023;13(2):228–241. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-2-228-241>.

Введение. Выпадение искусственных радиоактивных осадков в результате аварии на Чернобыльской АЭС привело к выведению больших площадей естественных кормовых угодий из кормопроизводства, что снижает развитие животноводческой отрасли и продовольственную безопасность в регионе [1, 2].

Распределение и концентрации искусственных радионуклидов в пойменных экосистемах колеблются в зависимости от ряда факторов, таких как пестрота почвенного покрова, поемность, плодородие, техногенное воздействие [3, 4].

Аллювиальные почвы являются техногенно-геохимическими маркерами загрязнения и преобразования химических элементов в бассейне реки, они способны аккумулировать макро- и микроэлементы. Несмотря на сравнительно небольшие площади, пойменные экосистемы играют значимую роль в ведении лугового кормопроизводства [5–7].

Необходимость исследования поведения ^{137}Cs в экосистеме поймы обуславливается рядом факторов: 1) миграция радионуклида по профилю аллювиальной почвы и удаление из зоны наибольшего распространения корней обуславливает его транзит в растения; 2) действует на уровень экспозиционной дозы, что определяет дозу внешнего облучения человека [8–10].

Вопросы распределения ^{137}Cs в профиле почв пойменных экосистем и перехода его в растения после периода первого полураспада остаются недостаточно изученными. Существует необходимость изучения поведения ^{137}Cs в системе «почва – растение» для определения его перехода в корма заливных лугов.

Цель работы – исследовать распределение ^{137}Cs в профиле почв пойменной экосистемы и переход радионуклида в корм.

Материалы и методы. Исследования проводили в 2019–2021 гг. в западной части Брянской области, в пойменной экосистеме р. Унеча, которая образует прирусловую, центральную и притеррасную подсистемы, характеризующиеся индивидуальными закономерностями поступления, накопления, перемещения элементов. Плотность загрязнения ^{137}Cs территории исследования после аварии на ЧАЭС составляла 185–555 кБк/м², ведение кормопроизводства на пойменных лугах возможно только при применении специальных защитных мероприятий [11].

Методом почвенных ключей с каждого ключевого почвенного участка, который представлял собой полнопрофильный разрез и четыре полужабы (рисунок 1), отбирались почвенные образцы со стенок разрезов через 5 см, перемешивались и усреднялись методом квартования для опре-

деления агрохимических свойств почвы и удельной активности ^{137}Cs . Ключевые участки находились в разных подсистемах пойменной экосистемы. Соответствие точек отбора и аллювиальных почв представлено в таблице 1.

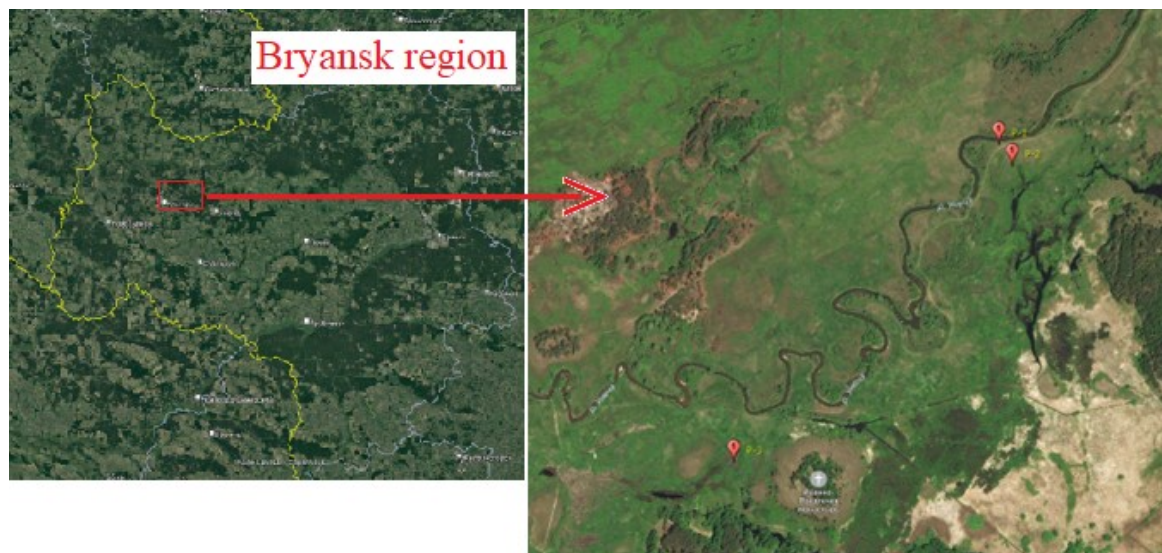


Рисунок 1 – Расположение ключевых почвенных участков

Figure 1 – Location of key soil areas

Таблица 1 – Агрохимические свойства плодородия аллювиальных почв

Table 1 – Agrochemical indicators of alluvial soils fertility

Слой почвы, см	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca (обменный)	Mg (обменный)	pH _{KCl}	C _{общ}
	мг/кг		ммоль/100 г		ед.	%
1	2	3	4	5	6	7
Аллювиальная дерновая кислая слоистая примитивная укороченная супесчаная (P1)						
0–5	371	106	6,5	1,4	4,98	3,2
5–10	327	55	6,1	2,1	5,40	2,7
10–15	287	27	5,5	0,6	5,39	1,5
15–20	256	27	3,8	0,5	5,28	0,6
Среднее	310	54	5,5	1,2	5,26	2,0
V, %	16	69	22	65	4	59
Аллювиальная луговая кислая маломощная укороченная легкосуглинистая (P2)						
0–5	346	131	13,3	2,4	4,83	7,7
5–10	318	74	9,1	1,3	4,22	3,4
10–15	248	48	10,6	1,5	4,36	2,5
15–20	53	41	5,9	1,5	4,65	1,9
Среднее	241	74	9,7	1,7	4,52	3,9
V, %	55	56	32	29	6	68
Аллювиальная перегнойно-болотная среднесуглинистая (P3)						
0–5	460	162	3,4	2,5	4,51	25,6
5–10	213	113	3,5	2,8	4,27	10,2

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2	3	4	5	6	7
10–15	192	75	1,9	1,8	4,67	8,1
15–20	183	73	2,0	2,7	4,54	11,4
Среднее	262	106	2,7	2,5	4,50	13,8
$V, \%$	51	40	32	18	4	58

Растительные образцы отбирали сопряженно с почвенными, использовали метод рамки, которую накладывали на четыре учетные площадки. Растительную массу перемешивали и высушивали до воздушно-сухого состояния для определения в ней удельной активности ^{137}Cs .

Показатели почвенного плодородия определяли: кислотность почв по ГОСТ 26483-85 «Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО»; органическое вещество по ГОСТ 26213-91 «Почвы. Методы определения органического вещества»; подвижного фосфора и обменного калия по ГОСТ 26207-91 «Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО»; обменные кальций и магний по ГОСТ 26487-85 «Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО» [12] в лаборатории кафедры агрохимии, почвоведения и экологии Брянского ГАУ.

Удельную активность ^{137}Cs в почвенных и растительных образцах определяли в центре коллективного пользования научным оборудованием ФГБОУ ВО Брянский ГАУ на УСК «Гамма Плюс» (Россия), пределы допускаемой относительной погрешности $\pm 20 \%$.

Коэффициент вариации использовали для определения варьирования агрохимических свойств почв пойменной экосистемы, он отображал изменчивость показателя [13].

Коэффициент перехода ^{137}Cs рассчитывали как отношение удельной активности ^{137}Cs в почве к надземной части растения.

Для выявления факторов, связанных с распределением ^{137}Cs , использовали корреляционный анализ, количество пар при анализе равнялось 12, он позволяет определить связи между исследуемыми переменными, к которым в нашем случае относятся: удельная активность ^{137}Cs , обменная кислотность, органическое вещество, подвижные формы фосфора и калия, а также обменные кальций и магний. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием MS Excel 2016.

Результаты и их обсуждение. Агрохимические свойства определяются генезисом почв пойменных экосистем и обусловлены различиями в их положении по рельефу, продолжительностью поемного процесса, видовым составом растительного покрова, гранулометрическим и минералогическим составом материнской породы и другими факторами.

Природные условия запада Брянской области обуславливают содержание подвижных форм фосфора в слое почвы 0–20 см в среднем высокое или очень высокое, а подвижных форм калия низкое или среднее в зависимости от пойменной подсистемы. Выявили наибольшие концентрации (соответственно 346–460 и 106–162 мг/кг) подвижного фосфора и калия в слое 0–5 см вне зависимости от положения почвы в системе поймы реки, по-видимому, данные элементы аккумулируются дерниной с территории водосбора. Анализ данных показателей по слоям почвы установил сильную изменчивость (коэффициент вариации $> 20\%$) показателей содержания доступных элементов питания по исследуемым слоям почв, за исключением изменения содержания фосфора в почве прирусловой поймы, где наблюдали среднюю изменчивость (таблица 1).

Положение почвы по рельефу, продолжительность пойменного процесса, водный режим данной территории обуславливают кислую реакцию среды почвенного раствора, при этом обнаружили, что менее обводненная почва прирусловой поймы имеет слабокислую степень кислотности, а почвы центральной и притеррасной пойм – сильнокислую. Показатель кис-

лотности почв изменяется незначительно как по слоям исследуемых почв, так и по почвам подсистем поймы.

Среднее содержание обменных форм кальция и магния варьировало соответственно в границах 2,7–9,7 и 1,2–2,5 ммоль/100 г почвы, наибольшие количества обменного кальция обнаружили в почве центральной поймы, а обменного магния в притеррасной. Установили сильную изменчивость данных показателей по исследуемым слоям почв (таблица 1).

Обнаружили тенденцию к увеличению содержания органического углерода в почве от 2,0 до 13,8 % в слое 0–20 см от прирусловой до притеррасной подсистем поймы р. Унеча. Наблюдали сильную изменчивость по слоям исследуемых почв данного показателя.

Распределение ^{137}Cs по профилю почвы подчиняется ряду тенденций и закономерностей, подвержено влиянию множества факторов и выражается в виде сложных и разнообразных биогеохимических процессов. Высокой неоднородностью и сложностью характеризуется концентрация ^{137}Cs в различных подсистемах пойменной экосистемы, отличающихся друг от друга водным режимом, растительностью, рельефом, гранулометрическим и минералогическим составом и плодородием почв [14].

Природные условия запада Брянской области, плодородие аллювиальных почв и плотность радиоактивного загрязнения по-разному действуют на распределение ^{137}Cs в почвенном профиле и удельную активность ^{137}Cs в отдельных почвенных слоях (таблица 2).

Таблица 2 – Удельная активность ^{137}Cs в аллювиальных почвах

В Бк/кг

Table 2 – ^{137}Cs specific activity in alluvial soils

In Bq/kg

Слой почвы, см	Аллювиальная дерновая кислая слоистая примитивная укороченная супесчаная (P1)		Аллювиальная луговая кислая маломощная укороченная легкосуглинистая (P2)		Аллювиальная перегнойно-болотная среднесуглинистая (P3)	
1	2	3	4	5	6	7
0–5	A _д	1147,0	A _д	2626,0	A _д	577,1
5–10	A	1101,0	A	1701,0	A _г	3953,4

Продолжение таблицы 2

Table 2 continued

1	2	3	4	5	6	7
10–15	В	864,4	А	388,1	А _g	992,2
15–20	С	487,1		215,3	В _g	736,1
20–25		200,6	В _g	84,6		148,5
25–30		83,5		2,0		53,3
30–35		55,7		1,9		38,4
35–40		13,5	С _g	1,2	С _g	12,2
40–45		2,2		1,0		4,1
45–50		3,7		2,0		4,3
50–55		0,6		0,6		3,6
55–60		1,5		2,6		0,4

В прирусловой и центральной частях поймы наибольшую удельную активность ^{137}Cs (соответственно 1147 и 2626 Бк/кг) выявили в горизонте А_д, в притеррасной (3954 Бк/кг) – в горизонте А. По-видимому, это связано с высокой обводненностью территории притеррасной части поймы, с глубиной обнаружили снижение удельной активности ^{137}Cs в слоях исследуемых почв. Наблюдали высокую концентрацию ^{137}Cs в горизонте В аллювиальных почв и далее в горизонте С. По нашему мнению, легкий гранулометрический состав почв прирусловой части поймы, высокая обводненность и повышенное содержание высокодисперсных частиц в почве притеррасной части способствуют данному явлению. Вертикальная миграция в почве центральной части поймы идет более медленно, и говорить достоверно о наличии ^{137}Cs в горизонте В_g в настоящее время нельзя, учитывая малые значения удельной активности радионуклида. В почве притеррасной поймы распределение имеет вид резко убывающей кривой, при этом часть радионуклида мигрировала в горизонт В_g, где, по-видимому, имеются условия для его закрепления, несмотря на высокую обводненность профиля.

Установили тренд к возрастанию удельной активности ^{137}Cs в слое почвы 0–20 см от прирусловой к притеррасной подсистеме поймы (таблица 2).

Наибольшей информативностью в пойменной экосистеме обладает корнеобитаемый слой почв, свойства которого являются чувствительным

индикатором техногенного загрязнения и показателем урожайности луговых трав и качества получаемого корма.

По прошествии 33 лет после выпадения искусственных радионуклидов в результате аварии на ЧАЭС в корнеобитаемом слое 0–20 см находилось в зависимости от расположения аллювиальной почвы в пойменной экосистеме от 90,9 до 98,0 % ^{137}Cs , в нижележащих слоях до 60 см находилось от 2,0 до 9,1 % от общего количества ^{137}Cs (рисунок 2).

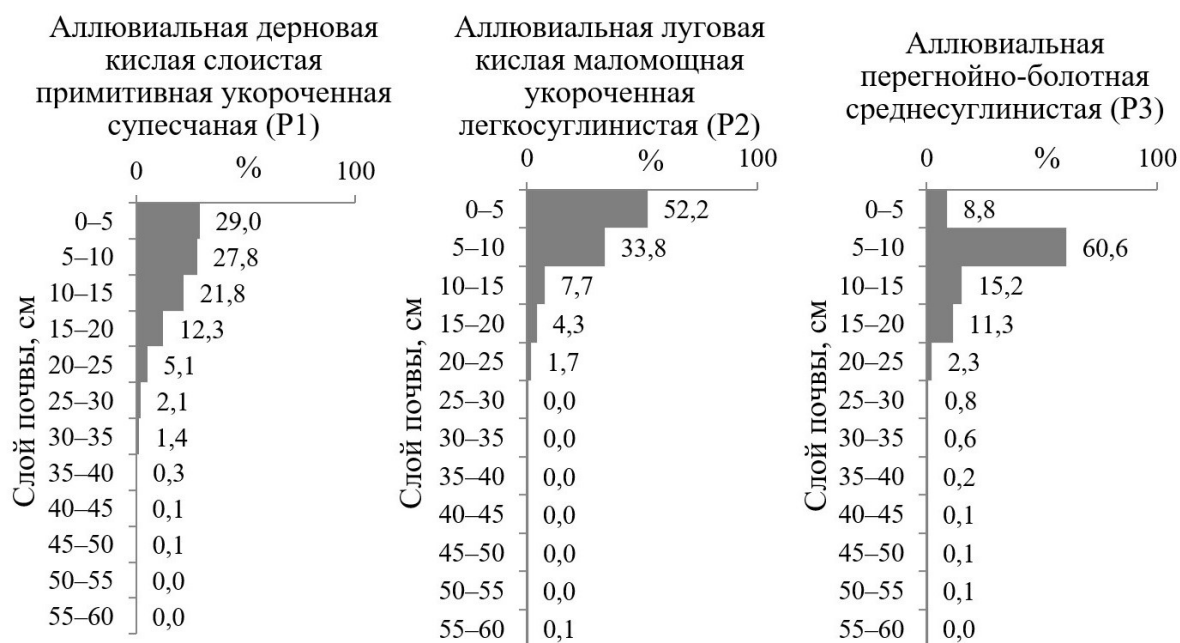


Рисунок 2 – Распределение ^{137}Cs по слоям аллювиальной почвы, % от общего количества в слое 0–60 см

Figure 2 – ^{137}Cs distribution across alluvial soil layers, % of total amount in layer 0–60 cm

Рассматривая перераспределение ^{137}Cs по слоям почв поймы р. Унеча, обнаружили, что в центральной пойме более 50 % ^{137}Cs находилось в слое 0–5 см, в то время как в прирусловой пойме – 29 %, а в притеррасной только 8,8 %. По нашему мнению, это связано с обводненностью почв и гранулометрическим составом, а также развитием растительности, так, в центральной пойме основная часть ^{137}Cs закрепляется в слое с наибольшим количеством корней (рисунок 2).

Проведенный корреляционный анализ связи между удельной активностью ^{137}Cs в слоях почв и агрохимическими показателями почвенного плодородия выявил среднюю положительную ($0,30 < r < 0,70$) связь между содержанием обменного магния и подвижного калия и удельной активностью ^{137}Cs (таблица 3).

Таблица 3 – Корреляционная зависимость удельной активности ^{137}Cs в почве от агрохимических показателей плодородия
Table 3 – Correlation dependence of ^{137}Cs specific activity in soil on agrochemical fertility indicators

Показатель	r
P_2O_5 , мг/кг	0,11
K_2O , мг/кг	0,47
Ca (обменный), ммоль/100 г	0,18
Mg (обменный), ммоль/100 г	0,48
pH _{KCl} , ед.	–0,29
$\text{C}_{\text{общ}}$, %	0,12

Определяя катионообменную емкость, электроположительно заряженные элементы могут притягиваться к отрицательно заряженной поверхности органического вещества, глинистых частиц и оксидов Fe и Al. Поэтому высокая емкость катионного обмена уменьшает мобильность ^{137}Cs и вследствие этого доступность для растений. Как следствие – появление средних корреляционных связей между емкостью катионного обмена и удельной активностью ^{137}Cs в пойменных почвах [14].

Органическое вещество почвы и илистые частицы гранулометрического состава по-разному влияют на удерживание или ремобилизацию ^{137}Cs , находящегося в аллювиальных почвах, и частично объясняют характер распределения данного элемента в профиле.

Переход ^{137}Cs из почвы в растения в пойменной экосистеме зависел от генезиса аллювиальной почвы. Так, наибольший (0,62) коэффициент перехода выявили для условий притеррасной подсистемы поймы р. Унеча, а наименьший (0,47) для центральной подсистемы (таблица 4).

Таблица 4 – Переход ^{137}Cs из почвы в растения

Table 4 – ^{137}Cs transition from soil to plants

Вариант	Удельная активность ^{137}Cs , Бк/кг		Коэффициент перехода ^{137}Cs
	почва, слой 0–20 см	воздушно-сухая масса травостоя	
Аллювиальная дерновая кислая слоистая примитивная укороченная супесчаная (P1)	900	501	0,56
Аллювиальная луговая кислая маломощная укороченная легко-суглинистая (P2)	1233	580	0,47
Аллювиальная перегнойно-болотная среднесуглинистая (P3)	1565	968	0,62

Установили увеличение коэффициента перехода ^{137}Cs из почвы в растения от центральной к прирусловой и притеррасной подсистемам поймы р. Унеча. Полученные корма в условиях притеррасной части поймы не соответствовали нормативу по допустимому содержанию ^{137}Cs даже по прошествии 33 лет после аварии на ЧАЭС. Использование прирусловой и центральной частей поймы в хозяйственной деятельности возможно и без применения защитных мероприятий.

Заключение. Формирование агрохимических показателей плодородия аллювиальных почв обусловлено их генезисом. Выявили высокое содержание подвижного фосфора и низкое подвижного калия, кислую реакцию среды, увеличение содержания органического углерода от прирусловой к притеррасной части поймы. Установили сильную изменчивость большинства агрохимических показателей плодородия в профиле почв. Вертикальное распределение ^{137}Cs может быть равномерно убывающим или с концентрированием в отдельных слоях на биохимических барьерах. В пойменной экосистеме концентрация ^{137}Cs в слое 0–20 см возрастает от прирусловой к притеррасной подсистеме. Коэффициент перехода ^{137}Cs из почвы в растения снижается от центральной к прирусловой и притеррасной части поймы. Ведение кормопроизводства в условиях радиоактив-

ного загрязнения прирусловой и центральной частей поймы возможно без применения защитных мероприятий.

Список источников

1. Эффективность защитных мероприятий при реабилитации кормовых угодий России и Беларуси, загрязненных после катастрофы на Чернобыльской АЭС / Н. М. Белоус, А. Г. Подоляк, А. Ф. Карпенко, Е. В. Смольский // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 4. С. 405–413.
2. Радиоэкологическая оценка сельскохозяйственных земель и продукции юго-западных районов Брянской области, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС / А. В. Панов, П. В. Прудников, И. Е. Титов, В. В. Кречетников, А. Н. Ратников, О. А. Шубина // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 1. С. 25–35. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-25-35>.
3. Закономерности миграции ^{137}Cs в аллювиальной почве / С. М. Пакшина, Л. П. Харкевич, Н. М. Белоус, Е. В. Смольский // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2019. № 97. С. 165–180. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-165-180>.
4. Influence of rehabilitation measures on ^{137}Cs uptake by crops from soils contaminated during the Chernobyl NPP accident / A. V. Panov, R. M. Aleksakhin, A. A. Muzalevskaya, P. V. Prudnikov, A. A. Novikov // Eurasian Soil Science. 2009. Vol. 42, № 4. P. 445–457. <https://doi.org/10.1134/S1064229309040127>.
5. Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences / G. V. Dobrovolski, P. N. Balabko, N. V. Stasyuk, E. P. Bykova // Arid Ecosystems. 2011. Vol. 1, № 3. P. 119–124. <https://doi.org/10.1134/S207909611103005X>.
6. Современное состояние экосистемы правобережной поймы Средней Десны и перспективы ее рационального использования / Д. Е. Просянкин, П. Н. Балабко, Е. В. Просянкин, Г. В. Чекин // Агрохимический вестник. 2012. № 5. С. 9–13.
7. Почвы мелиорированной поймы верхнего течения реки Оки, используемые в интенсивном земледелии / П. Н. Балабко, А. А. Снег, Т. В. Локалина, В. Н. Щедрин // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 3(23). С. 116–137. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1101> (дата обращения: 01.03.2023).
8. Панов А. В., Фесенко С. В., Алексахин Р. М. Эффективность мероприятий, направленных на снижение доз облучения жителей сельских населенных пунктов в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2001. Т. 41, № 6. С. 682–694.
9. Радиоэкологическое обоснование контрольных уровней содержания ^{137}Cs в кормах сельскохозяйственных животных / С. В. Фесенко, Н. Н. Исамов, П. В. Прудников, Е. С. Емлютина // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61, № 6. С. 652–663. DOI: 10.31857/S0869803121060047.
10. Разработка комплекса мероприятий по коренному улучшению естественных кормовых угодий, загрязненных радионуклидом цезий-137 / В. Ф. Шаповалов, В. Г. Плющихов, Н. М. Белоус, А. А. Курганов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2014. № 1. С. 13–20.
11. Панов А. В. Возвращение радиоактивно загрязненных территорий к нормальной жизнедеятельности: современные проблемы и пути решения (к 35-летию аварии на Чернобыльской АЭС) // Медико-биологические и социально-психологические проблемы

безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2021. № 1. С. 5–13. DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-05-13.

12. Практикум по агрохимии / под ред. проф. В. Г. Минеева. М.: МГУ, 2001. 689 с.

13. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

14. Современное распределение ^{137}Cs в почвах естественных кормовых угодий / С. Ф. Чесалин, А. Л. Силаев, Г. В. Чекин, Е. В. Смольский // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 6. С. 28–34.

References

1. Belous N.M., Podolyak A.G., Karpenko A.F., Smolsky E.V., 2016. *Effektivnost' zashhitnykh meropriyatiy pri reabilitatsii kormovykh ugodiy Rossii i Belarusi, zagryaznennykh posle katastrofy na Chernobyl'skoy AES* [Efficiency of protective measures in rehabilitation of forage lands in Russia and Belarus contaminated after the Chernobyl NPP]. *Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], vol. 56, no. 4, pp. 405–413. (In Russian).

2. Panov A.V., Prudnikov P.V., Titov I.E., Krechetnikov V.V., Ratnikov A.N., Shubina O.A., 2019. *Radioekologicheskaya otsenka sel'skokhozyaystvennykh zemel' i produktsii yugo-zapadnykh rayonov Bryanskoy oblasti, zagryaznennykh radionuklidami v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoy AES* [Radioecological assessment of the agricultural lands and products in south-west districts of the Bryansk region contaminated by radionuclides as the result of the Chernobyl NPP accident]. *Radiatsionnaya gigiena* [Radiation Hygiene], vol. 12, no. 1, pp. 25–35, <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-1-25-35>. (In Russian).

3. Pakshina S.M., Kharkevich L.P., Belous N.M., Smolsky E.V., 2019. *Zakonomernosti migratsii ^{137}Cs v allyuvial'noy pochve* [Regularities of ^{137}Cs migration in the alluvial soil]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva* [Dokuchaev Soil Bulletin], no. 97, pp. 165–180, <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-97-165-180>. (In Russian).

4. Panov A.V., Aleksakhin R.M., Muzalevskaya A.A., Prudnikov P.V., Novikov A.A., 2009. Influence of rehabilitation measures on ^{137}Cs uptake by crops from soils contaminated during the Chernobyl NPP accident. *Eurasian Soil Science*, vol. 42, no. 4, pp. 445–457, <https://doi.org/10.1134/S1064229309040127>.

5. Dobrovolskiy G.V., Balabko P.N., Stasyuk N.V., Bykova E.P., 2011. Alluvial soils of river floodplains and deltas and their zonal differences. *Arid Ecosystems*, vol. 1, no. 3, pp. 119–124, <https://doi.org/10.1134/S207909611103005X>.

6. Prosyannikov D.E., Balabko P.N., Prosyannikov E.V., Chekin G.V., 2012. *Sovremennoe sostoyanie ekosistemy pravoberezhnoy поймы Средней Десны i perspektivy ee ratsional'nogo ispol'zovaniya* [Modern condition of the ecosystem of the right-bank floodplain Middle Desna and prospect of its rational use]. *Agrokhimicheskiy vestnik* [Agrochemical Bulletin], no. 5, pp. 9–13. (In Russian).

7. Balabko P.N., Sneg A.A., Lokalina T.V., Shchedrin V.N., 2016. [Reclaimed floodplain soils of the upper Oka river used in intensive farming]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 3(23), pp. 116–137, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1101> [accessed 01.03.2023]. (In Russian).

8. Panov A.V., Fesenko S.V., Aleksakhin R.M., 2001. *Effektivnost' meropriyatiy, napravlennykh na snizhenie doz oblucheniya zhiteley sel'skikh naselennykh punktov v otdalennyi period posle avarii na Chernobyl'skoy AES* [Effectiveness of measures aimed at reducing radiation doses to residents of rural settlements in the remote period after the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], vol. 41, no. 6, pp. 682–694. (In Russian).

9. Fesenko S.V., Isamov N.N., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S., 2021. *Radioekologicheskoe obosnovanie kontrol'nykh urovney sodержaniya ^{137}Cs v kormakh sel'skokho-*

zyaystvennykh zhiivotnykh [Radioecological justification of reference levels of ^{137}Cs concentration in fodder of agricultural animals]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation Biology. Radioecology], vol. 61, no. 6, pp. 652–663, DOI: 10.31857/S0869803121060047. (In Russian).

10. Shapovalov V.F., Plyushchikov V.G., Belous N.M., Kurganov A.A., 2014. *Razrabotka kompleksa meropriyatiy po korennomu uluchsheniyu estestvennykh kormovykh ugodyi, zagryaznennykh radionuklidom tseziy-137* [Development of a set of measures to radical improvement of the natural forage lands contaminated by radionuclide cesium-137]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo* [RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries], no. 1, pp. 13–20. (In Russian).

11. Panov A.V., 2021. *Vozvrashchenie radioaktivno zagryaznennykh territoriy k normal'noy zhiznedeystel'nosti: sovremennye problemy i puti resheniya (k 35-letiyu avarii na Chernobyl'skoy AES)* [Returning radioactively contaminated territories to normal life: current problems and ways for solution (35 years after the Chernobyl NPP accident)]. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh* [Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations], no. 1, pp. 5–13, DOI: 10.25016/2541-7487-2021-0-1-05-13. (In Russian).

12. *Praktikum po agrokhimii* [Agrochemistry Workshop]. Moscow, Moscow State University, 2001, 689 p. (In Russian).

13. Dospekhov B.A., 1985. *Metodika polevogo opyta* [Method of Field Experiment]. Moscow, Agropromizdat Publ., 351 p. (In Russian).

14. Chesalin S.F., Silaev A.L., Chekin G.V., Smolsky E.V., 2021. *Sovremennoe raspredelenie ^{137}Cs v pochvakh estestvennykh kormovykh ugodyi* [Present ^{137}Cs distribution in soils of natural forage lands]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skohozyaystvennoy akademii* [Bulletin of Kursk State Agricultural Academy], no. 6, pp. 28–34. (In Russian).

Информация об авторах

А. Л. Силаев – заведующий кафедрой агрохимии, почвоведения и экологии, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент;

Е. В. Смольский – профессор кафедры агрохимии, почвоведения и экологии, доктор сельскохозяйственных наук, доцент.

Information about the authors

A. L. Silaev – Head of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Ecology, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor;

E. V. Smolsky – Professor of the Department of Agrochemistry, Soil Science and Ecology, Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.03.2023; одобрена после рецензирования 05.05.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 01.03.2023; approved after reviewing 05.05.2023; accepted for publication 11.05.2023.