

УДК 539.163:631.4:631.5

## ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА РЕПЕРНЫХ УЧАСТКАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДИЙ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2022 г. А. А. Уткин<sup>1,\*</sup><sup>1</sup>Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева, Иваново, Россия

\*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.12.2021 г.

После доработки 21.08.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

Представлены результаты радиационного обследования дерново-подзолистых и серых лесных почв реперных участков сельскохозяйственного назначения Владимирской области. Исследованием установлены фоновые значения удельных активностей исследуемых радионуклидов в почвах реперных участков. По плотности загрязнения пахотного горизонта серых лесных и дерново-подзолистых почв <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr определено, что все реперные участки области относятся к незагрязненным территориям. Определены мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения почв и вклад радионуклидов  $\gamma$ -излучателей в формирование  $\gamma$ -фона почв. С использованием корреляционного анализа определено влияние отдельных физико-химических свойств почв на поведение и распределение радионуклидов в почвах и взаимосвязи между содержанием радионуклидов. Исходя из значений удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в растительной продукции, выращенной на почвах реперных участков, были построены ряды культур по убывающей способности к накоплению радионуклидов из почвы. Вся выращенная растительная продукция по всем видам культур полностью удовлетворяла ветеринарным требованиям, предъявляемым к содержанию <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в растительных кормах (сено, зеленая масса и фуражное зерно). По коэффициентам перехода было установлено, что процесс перехода <sup>90</sup>Sr из обоих типов почв в растения протекал интенсивнее, чем переход <sup>137</sup>Cs. Рассчитанные коэффициенты линейной корреляции между значениями удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в почвах и растениях выявили силу взаимосвязей и характер зависимостей.

**Ключевые слова:** радионуклиды, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>40</sup>K, серая лесная почва, дерново-подзолистая почва, реперные участки, культурные растения, Владимирская область

DOI: 10.31857/S0869803122060133

В современных условиях интенсивного промышленного развития и использования ядерных технологий радиоактивность почв обусловлена как содержанием природных радионуклидов (ЕРН), определяющих естественный радиационный фон, так и накоплением искусственных техногенных радионуклидов (ИРН) в результате проведения испытаний ядерного оружия, аварий на атомных объектах (ПО “Маяк”, Чернобыльская АЭС, АЭС Фукусима-1 и др.) и др. [1–4].

К числу основных ЕРН в почвах относятся <sup>40</sup>K с периодом полураспада ( $T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$  лет), <sup>226</sup>Ra ( $T_{1/2} = 1.62 \times 10^3$  лет) и <sup>232</sup>Th ( $T_{1/2} = 1.40 \times 10^{10}$  лет) [5].

Концентрации ЕРН в почвах могут колебаться в достаточно широких пределах. В первую очередь они определяются их содержанием в материнских породах. Кроме того, они зависят от ландшафта, климатических условий, типа почвы, процессов вертикальной и горизонтальной ми-

грации в почвах, биологической аккумуляции и т.д. [6, 7].

Радиоактивное загрязнение почв может быть обусловлено нахождением в них повышенных количеств некоторых ЕРН, если это стало результатом антропогенной деятельности. Источником такого загрязнения почвы, например, могут стать применяемые минеральные удобрения и агролепранты (природные калийные соли, фосфорные удобрения, фосфогипс и др.) [8].

В наземных экосистемах почвы являются основным “депо” поступающих ИРН, которые накапливаются в растительной продукции и, как следствие, в организме сельскохозяйственных животных и человека.

Основное загрязнение почв и культурных растений сельскохозяйственных угодий на территории России связано с долгоживущими ИРН — <sup>137</sup>Cs ( $T_{1/2} = 30.17$  лет) и <sup>90</sup>Sr ( $T_{1/2} = 28.79$  лет) [5].

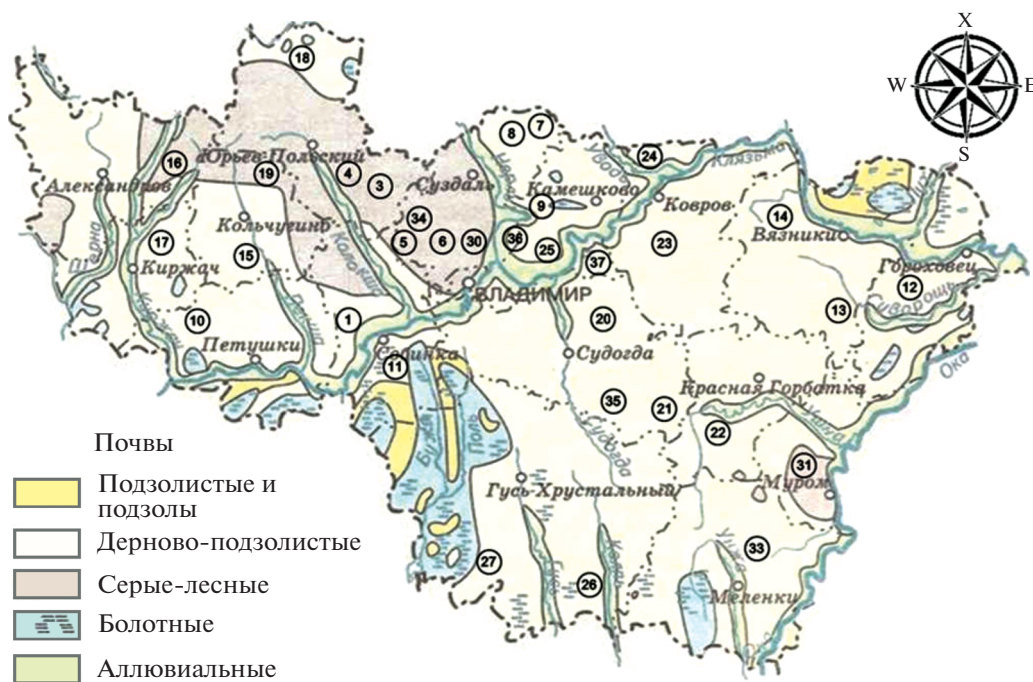


Рис. 1. Почвенная карта Владимирской области.

Примечание. Цифрами на карте обозначены номера реперных участков.

Fig. 1. Soil map of the Vladimir region.

Цель настоящего исследования заключалась в проведении радиационного обследования серых лесных и дерново-подзолистых почв реперных участков сельскохозяйственных угодий Владимирской области на наличие содержания в них  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$ , определении влияния отдельных физико-химических свойств почв на поведение изучаемых радионуклидов (РН) в системе “почва–растение”, возможности получения растительной продукции, соответствующей ветеринарным нормативам.

Кроме того, в рамках данного исследования проводилось определение мощности экспозиционной дозы (МЭД)  $\gamma$ -излучения почв по двум радионуклидам  $\gamma$ -излучателям:  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

Оценка современного уровня  $\gamma$ -излучения и содержания ИРН и ЕРН в почвах и культурных растениях сельскохозяйственных угодий Владимирской области отсутствует в научной литературе, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Агрохимическое и радиологическое обследование почв реперных участков и культурных растений на содержание ЕРН и ИРН проводили в 2019 г., в соответствии с ежегодным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на 33 реперных участках, занятых серыми

лесными и дерново-подзолистыми почвами, расположенными на территории Владимирской области (рис. 1), путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализов.

Крутизна склонов реперных участков не превышала  $5^\circ$  при средней величине в  $1.3^\circ$ . Реперные участки располагались, в основном, на пахотных землях и кормовых естественных угодьях, преобладающая растительность участков – культурные растения: вика посевная (*Vicia sativa* L.), овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), кукуруза сахарная (*Zea mays* L.), рапс (*Brassica napus* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.) и злаковое разнотравье, в основном, в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.) и мятлика лугового (*Poa pratensis* L.).

Общая площадь обследованных почв реперных участков составила 1184 га (100%), в том числе площадь, занятая серыми лесными почвами, – 386 га (32.6%), дерново-подзолистыми – 798 га (67.4%).

С отдельного реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростевого бура отбиралось несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец массой около 0.5 кг был составлен из 25–30 точечных проб и в среднем отбирался с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Смешанную пробу растений массой около 0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10 точечных проб.

Пробы почв и растений отбирали параллельно с одних и тех же мест реперных участков.

Отобранные образцы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на мельнице.

Физико-химические анализы почв были выполнены по следующим методикам: обменная кислотность ( $pH_{KCl}$ ): ГОСТ Р 58594-2019; обменные основания кальция и магния (Ca и Mg): ГОСТ 26487-85; органическое вещество ( $C_{орг}$ ) (по Тюрину в модификации ЦИНАО): ГОСТ 26213-91; сумма поглощенных оснований ( $S$ ) (по методу Каппена): ГОСТ 27821-88; фракции физической глины и ила (по Качинскому) [9].

Определение всех изучаемых РН производили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия) в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс” (ВНИИФТРИ, 2003).

$^{137}Cs$  в почве и  $^{90}Sr$  в почве и растительных образцах определяли согласно методическим рекомендациям [10],  $^{137}Cs$  в растительной продукции по ГОСТ Р 54040-2010. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Мари-нелли объемом 1 л. Растительные образцы на определение  $^{137}Cs$  и  $^{90}Sr$  предварительно озоляли (до концентрации более чем в 10 раз), после чего золу помещали в чашки Петри ( $^{137}Cs$ ) и измерительные кюветы ( $^{90}Sr$ ).

Для получения данных по удельной активности  $^{137}Cs$  в растительных образцах значительно увеличивалось время экспозиции до 2–5 ч и более.

Измерение МЭД  $\gamma$ -излучения проводили согласно методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [11].

МЭД  $\gamma$ -излучения измеряли в полевых условиях на высоте 1 м над поверхностью почвы сцинтилляционным геологоразведочным радиометром СРП-68-01 (Россия). На каждом реперном участке проводили восемь замеров, с последующим подсчетом среднего значения.

Для оценки перехода ИРН из почвы в растения нами рассчитывали коэффициент накопления ( $K_H$ ), равный отношению удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг) к его активности в почве (Бк/кг).

Коэффициент перехода ( $K_H$ ) определяли как отношение удельной активности РН в растениях (Бк/кг) к плотности загрязнения почвы на единицу площади (кБк/м<sup>2</sup>).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределе-

ния с помощью критериев Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова. При ненормальном распределении признака использовали критерий Манна–Уитни. Средние уровни значений изучаемых показателей в исследуемых почвах сравнивали между собой с помощью двухвыборочного  $t$ -критерия Стьюдента. Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Процессы накопления, распределения и миграции РН в почвах зависят от многих факторов, среди которых важное значение играют содержание органического вещества и его качественный состав, кислотность почвенной среды, химический, гранулометрический и минералогический составы, характер увлажнения, рельеф местности и происхождение почвообразующих пород [12].

Чтобы изучить влияние физико-химических показателей почв на особенности поведения в них РН, было проведено агрохимическое обследование исследуемых почв реперных участков. Результаты обследования представлены в табл. 1.

Согласно градации распределения глинистых частиц в гранулометрическом составе серые лесные почвы в среднем имели преимущественно среднесуглинистый состав, дерново-подзолистые – легкосуглинистый.

Среднее содержание органического вещества в дерново-подзолистых почвах было в 1.37 раза меньше, чем серых лесных почв, тем не менее, обе почвы, согласно градации, имели низкое содержание органического вещества.

Почвы реперных участков отличались различной реакцией почвенной среды. В среднем серые лесные почвы имели более кислую реакцию среды (слабокислые), чем дерново-подзолистые (близкие к нейтральным).

Средние значения концентраций Ca и Mg на участках с серыми лесными почвами соответствовали повышенным значениям, с дерново-подзолистыми почвами – средним.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg, в составе поглощенных катионов (параметр  $S$ ), в серой лесной почве составляла 81.7% ( $lim = 73.5–90.4\%$ ), в дерново-подзолистой – 74.3% ( $lim = 58.5–90.0\%$ ), что говорит о важной роли этих элементов в процессах генезиса и химизма изучаемых почв.

Отметим, что варьирование всех физико-химических показателей почв подчинялось закону нормального распределения. Значения критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка

**Таблица 1.** Физико-химические свойства почв  
**Table 1.** Physical and chemical properties of soils

№ реп. уч.*	Число смешанных образцов, <i>n</i>	Район	Фракция, %		$C_{орг}$ , %	рН <sub>KCl</sub>	Ca	Mg	<i>S</i>
			<0.001	<0.01					
Серая лесная почва									
3	6	Ю.-Польский	14.1	38.1	2.9	5.4	12.5	3.3	19.6
4	4	Ю.-Польский	16.2	33.7	3.4	5.6	15.8	2.7	21.0
5	4	Суздальский	22.4	34.9	3.2	5.7	11.3	3.4	20.0
6	3	Суздальский	26.3	31.2	3.2	4.8	11.9	3.1	16.6
16	4	Александровский	17.2	33.7	2.4	5.2	9.6	2.6	14.9
19	4	Кольчугинский	18.2	34.8	3.6	5.9	10.3	1.8	13.9
30	7	Суздальский	13.3	37.0	3.6	5.6	13.1	3.2	19.6
31	10	Муромский	20.9	28.1	1.7	5.5	4.6	1.4	6.9
34	10	Суздальский	17.4	35.6	3.2	5.5	13.4	2.4	24.9
<i>M</i> ±			18.4	34.1	3.0	5.5	11.4	2.7	17.5
± <i>m</i>			1.4	1.0	0.2	0.1	1.0	0.2	1.7
Дерново-подзолистая почва									
1	4	Собинский	10.7	23.1	2.3	6.7	7.6	1.4	13.8
7	4	Суздальский	8.9	17.8	2.0	6.0	5.5	1.5	8.0
8	6	Суздальский	9.6	20.1	2.8	5.5	4.6	1.1	7.3
9	4	Камешковский	8.0	16.2	2.9	5.1	4.5	1.3	7.1
10	1	Петушинский	9.3	20.9	3.1	6.1	5.9	1.9	11.3
11	6	Собинский	10.5	23.1	1.4	6.0	4.3	1.5	8.6
12	7	Гороховецкий	11.2	24.6	2.6	5.6	7.6	2.3	11.8
13	3	Вязниковский	12.7	15.9	1.4	5.4	2.5	0.4	4.4
14	5	Вязниковский	8.4	18.0	1.9	5.9	7.0	1.0	10.3
15	3	Кольчугинский	12.1	23.1	2.4	6.3	9.4	2.3	16.8
17	4	Киржачский	10.4	16.9	2.8	5.5	4.3	1.2	7.5
18	4	Ю.-Польский	9.9	21.8	2.2	5.4	6.4	1.4	10.4
20	4	Судогодский	10.1	17.2	1.7	5.8	4.0	1.4	6.6
21	2	Судогодский	8.3	18.0	2.0	6.3	5.0	1.7	9.3
22	5	Селивановский	8.7	16.7	2.5	5.9	5.9	1.3	8.0
23	7	Ковровский	12.9	17.0	1.7	6.3	3.8	1.1	6.3
24	7	Ковровский	11.0	22.9	1.5	6.2	5.0	1.2	10.6
25	4	Камешковский	9.2	22.3	2.3	5.5	5.1	1.5	8.6
26	2	Г.-Хрустальный	8.6	18.1	1.8	5.7	4.0	1.3	7.9
27	3	Г.-Хрустальный	10.1	23.8	1.4	5.3	3.0	0.5	4.4
33	3	Меленковский	8.0	19.0	2.2	5.2	4.1	0.8	7.5
35	8	Судогодский	9.8	19.7	2.2	6.2	8.8	1.2	13.1
36	6	Суздальский	9.4	20.3	2.1	5.7	6.1	1.6	11.1
37	8	Камешковский	10.4	25.8	2.6	5.8	5.9	1.1	9.5
<i>M</i> ±			9.9	20.1	2.2	5.8	5.4	1.3	9.2
± <i>m</i>			0.3	0.6	0.1	0.1	0.4	0.1	0.6

Примечание. В таблице приведены средние арифметические значения по реперным участкам (то же в табл. 2 и 4).

\* р. уч. — реперный участок (то же в табл. 2 и 4); *M* — среднее арифметическое значение (то же в табл. 2 и 4); ± *m* — ошибка среднего арифметического (то же в табл. 2 и 4).

удовлетворяли следующим условиям:  $p > 0.2$  и  $p > 0.05$  соответственно.

Сравнение физико-химических показателей исследуемых почв по двум аналогичным выборкам показало, что между исследуемыми почвами имеются существенные различия, это подтверждалось расчетом значений  $t$ -критерия Стьюдента ( $p < 0.05$ ).

Результаты определения удельной активности ЕРН позволяют дать более точную характеристику радиационной обстановки на исследуемой территории путем сравнения их удельных активностей в изучаемых почвах с их общемировыми или региональными значениями, а ИРН — со среднестатистическим их содержанием в почвах, обусловленном глобальными выпадениями. Удельные активности ИРН ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ) и ЕРН ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{226}\text{Ra}$ ) в серых лесных и дерново-подзолистых почвах реперных участков приведены в табл. 2.

Известно, что удельные активности ЕРН в почвах мира варьируют в широких диапазонах, а в качестве среднемировых приняты следующие значения:  $^{226}\text{Ra}$  — 30 Бк/кг,  $^{232}\text{Th}$  — 32 Бк/кг,  $^{40}\text{K}$  — 450 Бк/кг. По данным Тихомирова, содержание  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в серых лесных почвах России в среднем составляет 32 и 450 Бк/кг почвы, в дерново-подзолистых — 27 и 360 Бк/кг соответственно [13].

Средние удельные активности  $^{226}\text{Ra}$ , отмеченные на исследованных территориях реперных участков серых лесных и дерново-подзолистых почв Владимирской области (табл. 2), были ниже в 1.30 и 2.17 раза среднемирового значения. Средняя активность  $^{232}\text{Th}$  в реперных участках серых лесных почв Владимирской области в целом соответствовала среднемировому значению и значению, свойственному для данной почвы. В дерново-подзолистых почвах участков средняя активность  $^{232}\text{Th}$  была в 2.14 и 1.81 раза меньше значений среднемировой и региональной активностей. Средняя удельная активность  $^{40}\text{K}$  в серых лесных почвах участков была в 1.13 раза выше, а в дерново-подзолистых почвах — в 1.23 раза ниже фоновых значений для каждой из почв.

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в обследованных реперных участках почв не превышали значений фона глобальных выпадений — 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [14].

Серые лесные почвы отличались несколько меньшими средними уровнями активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , чем дерново-подзолистые почвы, и, наоборот, активность серых лесных почв по содержащимся в них  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  была выше в 2.32, 1.73 и 1.67 раза средних значений удельных активностей в дерново-подзолистых почвах соответственно (табл. 2).

Отмеченные различия по удельной активности  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в исследуемых почвах, по-видимому, можно объяснить разным типом подстилающих пород, на которых сформировались серые лесные и дерново-подзолистые почвы Владимирской области, а также антропогенной деятельностью, обусловленной внесением на серых лесных почвах более высоких доз калийных удобрений, чем на дерново-подзолистых.

Плотность загрязнения (запас)  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном горизонте (0–20 см) исследованных почв составляет 0.74–1.85 и 0.37–1.11 кБк/км<sup>2</sup> соответственно (табл. 2), что значительно ниже допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки в 37 и 3.7 кБк/м<sup>2</sup> соответственно, и позволяет отнести исследованные почвы реперных участков Владимирской области к незагрязненным территориям [1].

Как показал расчет критерия Манна–Уитни при ненормальном распределении показателя, плотность загрязнения участков с серыми лесными почвами по  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  несущественно отличается от уровня этого показателя на участках с дерново-подзолистыми почвами.

Распределение значений плотности загрязнения участков обеих почв по  $^{232}\text{Th}$  отвечает нормальному закону распределения признака и в этой выборке расчет значений  $t$ -критерия Стьюдента выявил достоверное различие.

В среднем по Владимирской области МЭД  $\gamma$ -излучения почв реперных участков не превышает средних значений, характерных для почв сельскохозяйственных угодий России (11.4 мкР/ч) [15] и составляет 8 мкР/ч. Стоит отметить тот факт, что среднее значение МЭД  $\gamma$ -фона участков с серыми лесными почвами было больше в 1.7 раза значения  $\gamma$ -фона участков с дерново-подзолистыми почвами (табл. 2). Вероятной причиной различного проявления МЭД  $\gamma$ -фона было неодинаковое вертикальное распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по профилю изучаемых почв.

Полученные нами значения МЭД  $\gamma$ -излучения полностью подтверждаются сведениями, приведенными в работе Трифоновой [16].

Сравнение значений МЭД  $\gamma$ -фона серой лесной и дерново-подзолистой почв по двум аналогичным выборкам показало, что между исследуемыми почвами имеются существенные различия, это подтверждалось расчетом значений  $t$ -критерия Стьюдента ( $p < 0.05$ ).

Отмеченные корреляционные взаимосвязи между физико-химическими свойствами почв и удельными активностями  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$ , а также между самими изучаемыми РН указаны в табл. 3.

**Таблица 2.** Мощность экспозиционной дозы, удельная активность и плотность загрязнения почв радионуклидами  
**Table 2.** Exposure dose rate, specific activity and density of soil contamination with radionuclides

№ реп. уч.	<sup>137</sup> Cs		<sup>90</sup> Sr		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K		<sup>226</sup> Ra		МЭД
	Бк/кг	кБк/м <sup>2</sup>	Бк/кг	кБк/м <sup>2</sup>	Бк/кг	кБк/м <sup>2</sup>	Бк/кг	кБк/м <sup>2</sup>	Бк/кг	кБк/м <sup>2</sup>	мкР/ч
Серая лесная почва											
3	3.60	0.74	2.57	0.74	33.8	7.77	553	127.28	24.6	5.55	12
4	5.32	1.11	3.80	0.74	34.7	8.14	473	110.63	21.0	4.81	12
5	3.13	0.74	2.24	0.37	39.3	9.25	573	132.83	23.7	5.55	12
6	5.88	1.48	4.20	1.11	36.4	8.51	531	122.10	23.4	5.55	12
16	3.93	0.74	2.81	0.74	37.8	8.14	606	130.98	24.2	5.18	11.5
19	3.29	0.74	2.35	0.37	33.2	7.40	535	116.55	24.4	5.18	12
30	2.86	0.74	2.04	0.37	35.2	8.14	494	113.59	24.1	5.55	12.5
31	2.79	0.74	1.99	0.37	29.5	6.29	327	68.82	20.1	4.07	7
34	4.56	1.11	3.26	0.74	32.7	7.03	491	106.93	22.0	4.81	12
<i>M</i> ±	3.93	0.90	2.81	0.62	34.7	7.85	509	114.41	23.1	5.14	11.4
± <i>m</i>	0.37	0.09	0.26	0.09	1.0	0.29	27	6.45	0.5	0.17	0.6
Дерново-подзолистая почва											
1	3.68	0.74	2.63	0.37	14.1	2.96	360	75.48	17.9	3.70	8
7	4.63	1.11	3.31	0.74	17.2	4.07	398	96.20	14.0	3.33	6
8	3.58	0.74	2.56	0.74	12.2	2.96	296	68.08	12.6	2.96	7
9	3.76	0.74	2.69	0.74	16.0	4.07	286	70.30	14.5	3.70	7
10	3.01	0.74	2.15	0.74	5.4	1.48	124	32.56	7.8	2.22	4.5
11	4.95	1.11	3.54	0.74	14.4	3.70	307	76.59	13.4	3.33	7
12	4.99	1.11	3.56	0.74	27.8	6.66	427	103.23	23.1	5.55	11
13	4.05	1.11	2.89	0.74	5.9	1.48	151	37.37	9.8	2.59	5
14	5.18	1.11	3.70	0.74	11.6	2.59	203	47.73	10.4	2.59	6
15	3.46	0.74	2.47	0.37	25.9	5.92	469	103.97	20.7	4.44	10
17	4.18	1.11	2.99	0.74	11.5	2.59	257	59.57	9.5	2.22	6
18	4.85	1.11	3.46	0.74	30.9	7.03	458	105.45	19.4	4.44	10.5
20	3.25	0.74	2.32	0.37	6.1	1.48	144	34.04	7.1	1.85	5
21	3.74	0.74	2.67	0.74	13.1	3.33	423	102.49	18.5	4.44	5
22	2.41	0.74	1.72	0.37	11.1	2.59	198	48.84	9.5	2.22	5.5
23	2.77	0.74	1.98	0.37	13.6	3.33	220	56.24	13.4	3.33	6
24	4.17	1.11	2.98	0.74	17.3	4.44	403	99.16	21.0	5.18	7
25	4.23	1.11	3.02	0.74	21.2	5.18	450	112.48	20.6	5.18	10
26	7.17	1.85	4.55	1.11	5.7	1.48	160	41.07	10.2	2.59	5
27	2.94	0.74	2.10	0.37	6.5	1.48	130	30.71	7.3	1.85	3.5
33	5.93	1.48	4.24	1.11	19.2	4.81	265	64.75	8.9	2.22	6.5
35	4.53	1.11	3.24	0.74	18.7	4.44	332	81.77	17.1	4.07	6
36	2.79	0.74	1.99	0.37	15.0	3.70	237	59.20	9.6	2.22	6
37	2.96	0.74	2.11	0.37	17.0	4.07	333	81.40	14.2	3.33	7
<i>M</i> ±	4.05	0.97	2.87	0.65	14.9	3.58	293	70.36	13.8	3.31	6.7
± <i>m</i>	0.23	0.06	0.15	0.05	1.4	0.33	23	5.35	1.0	0.23	0.4

**Таблица 3.** Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между свойствами почв и удельными активностями радионуклидов**Table 3.** Pearson linear correlation coefficients between soil properties and specific radionuclide activities

Свойства почвы/РН	Фракция <0.001 мм, %	Фракция <0.01 мм, %	$C_{\text{орг}}, \%$	$\text{pH}_{\text{KCl}}$	Ca, смоль (экв)/100 г	Mg, смоль (экв)/100 г	S, смоль (экв)/100 г	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$
$^{137}\text{Cs}$	<u>0.35</u> -0.29	<u>-0.15</u> -0.06	<u>0.26</u> -0.19	<u>-0.62</u> -0.22	<u>0.53</u> -0.02	<u>0.22</u> -0.03	<u>0.38</u> 0.02	—	<u>1.00</u> <b>0.99</b>	<u>0.20</u> 0.18	<u>0.18</u> 0.14	<u>-0.24</u> 0.13
$^{90}\text{Sr}$	<u>0.35</u> -0.28	<u>-0.15</u> -0.04	<u>0.26</u> -0.18	<u>-0.61</u> -0.23	<u>0.53</u> 0.01	<u>0.22</u> -0.03	<u>0.38</u> 0.03	<u>1.00</u> <b>0.99</b>	—	<u>0.20</u> 0.24	<u>0.18</u> 0.19	<u>-0.24</u> 0.16
$^{232}\text{Th}$	<u>0.19</u> 0.11	<u>0.32</u> <b>0.45</b>	<u>0.36</u> 0.23	<u>-0.22</u> -0.02	<u>0.38</u> <b>0.59</b>	<u>0.74</u> <b>0.47</b>	<u>0.39</u> <b>0.54</b>	<u>0.20</u> 0.18	<u>0.20</u> 0.24	—	<u>0.82</u> <b>0.86</b>	<u>0.54</u> <b>0.79</b>
$^{40}\text{K}$	<u>-0.07</u> 0.07	<u>0.62</u> <b>0.45</b>	<u>0.46</u> 0.18	<u>-0.15</u> 0.23	<u>0.44</u> <b>0.54</b>	<u>0.64</u> <b>0.52</b>	<u>0.47</u> <b>0.56</b>	<u>0.18</u> 0.14	<u>0.18</u> 0.19	<u>0.82</u> <b>0.86</b>	—	<u>0.60</u> <b>0.91</b>
$^{226}\text{Ra}$	<u>-0.07</u> 0.24	<u>0.33</u> <b>0.48</b>	<u>0.23</u> 0.11	<u>-0.05</u> 0.31	<u>0.01</u> <b>0.55</b>	<u>0.44</u> <b>0.52</b>	<u>-0.18</u> <b>0.59</b>	<u>-0.24</u> 0.13	<u>-0.24</u> 0.16	<u>0.54</u> <b>0.79</b>	<u>0.60</u> <b>0.91</b>	—

Примечание. Над чертой – серая лесная почва; под чертой – дерново-подзолистая.

Значимые коэффициенты корреляции при  $p < 0.05$  выделены полужирным (то же в табл. 4):  $t_{\text{крит}} = 2.36$ ,  $n = 9$ ,  $r_{\text{знач}} = 0.67$  – для серой лесной почвы,  $t_{\text{крит}} = 2.07$ ,  $n = 24$ ,  $r_{\text{знач}} = 0.40$  – для дерново-подзолистой.

Данные по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в культурных растениях и  $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения отражены в табл. 4.

Считается, что накопление радионуклидов растениями зависит от типа почвы. В сельскохозяйственной радиобиологии установилось понимание того, что из почв низкого плодородия, кислых и обедненных основаниями Ca и Mg, легкого гранулометрического состава  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  более интенсивно поступают в растения по сравнению с высокоплодородными и богатыми основаниями почвами [17–19].

В то же время немалое влияние на накопление ИРН растениями также оказывают и биологические особенности самих сельскохозяйственных культур, обусловленные видовой принадлежностью. Например, различия в накоплении  $^{90}\text{Sr}$  у зерновых и бобовых культур, выращенных на одной почве, различаются в 85 раз, у корнеплодов и овощных культур – в 350 раз [20], у кукурузы – в 10–15 раз [21].

Установленные для культурных растений величины  $K_{\text{н}}^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для надземной фитомассы травостоев на участках с серыми лесными и дерново-подзолистыми почвами укладывались в пределы от 0.13 до 0.44 и от 0.23 до 0.66 соответственно, что хорошо согласовывалось со значениями  $K_{\text{н}}^{137}\text{Cs} = 0.02–1.1$  и  $K_{\text{н}}^{90}\text{Sr} = 0.02–12$ , приведенными в работе [22].

Однолетние травы (вика, овес) отличались заметно большим в 2.54 и 2.13 раза накоплением  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из дерново-подзолистой почвы, чем из

серой лесной. Растения злаковых трав (полевица, мятлик), кукурузы и клевера в надземной массе в 1.07, 1.14 и 1.47 раза больше накапливали  $^{137}\text{Cs}$  из серой лесной почвы, чем из дерново-подзолистой и в 1.05, 1.12 и 1.37 раза больше  $^{90}\text{Sr}$  соответственно. Накопление  $^{90}\text{Sr}$  из серой лесной почвы зеленой массой рапса было в 1.47 раза больше, чем накопление растениями  $^{137}\text{Cs}$  (рис. 2–3).

Многочисленными исследованиями установлено, что РН в генеративных органах растений (зерно, плоды и др.) накапливаются существенно меньше, чем в надземных вегетативных органах (солома, листья) [23, 24].

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона показал, что между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в зерне и соломе пшеницы отмечена достоверная взаимосвязь прямой зависимости:  $r_{\text{Cs зерно/солома}}^{137} = 0.63$  и  $r_{\text{Sr зерно/солома}}^{90} = 0.45$ , при  $P = 0.95$ ,  $r_{\text{знач}} = 0.75$ .

## ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет значений  $t$ -критерия Стьюдента при сравнении двух независимых выборок серой лесной и дерново-подзолистой почв участков по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  показали, что между значениями удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в серой лесной и дерново-подзолистой почвах отсутствуют статистически значимые различия, для  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  достоверные различия имеются, т.е. присутствие ИРН в исследуемых почвах обусловлено, прежде всего,

Таблица 4. Параметры перехода и удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в культурных растенияхTable 4. Transition parameters and specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in cultivated plants

№ реп. уч.	Культура (вид продукции)	Удельная активность, Бк/кг		$K_{\text{П}}$	
		$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$
Серая лесная почва					
3	Вика, овес (сено)	0.48	0.59	0.58	1.00
4	Кукуруза (зеленая масса)	1.42	1.53	1.14	1.72
5	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.87	0.82	1.20	1.58
16	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.89	0.95	1.05	1.57
19	Рапс (зеленая масса)	1.05	1.11	1.46	2.17
30	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.03	1.11	1.57	2.37
31	Клевер (зеленая масса)	1.24	1.32	2.12	3.16
34	Кукуруза (зеленая масса)	0.93	1.09	0.94	1.53
$M \pm m$	Вика, овес (сено)	$0.48 \pm 0.02$	$0.59 \pm 0.02$	$0.58 \pm 0.02$	$1.00 \pm 0.02$
	Кукуруза (зеленая масса)	$1.18 \pm 0.02$	$1.31 \pm 0.04$	$1.04 \pm 0.02$	$1.63 \pm 0.05$
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	$0.93 \pm 0.03$	$0.96 \pm 0.03$	$1.27 \pm 0.03$	$1.84 \pm 0.06$
	Клевер (зеленая масса)	$1.24 \pm 0.01$	$1.32 \pm 0.01$	$2.12 \pm 0.03$	$3.16 \pm 0.03$
	Рапс (зеленая масса)	$1.05 \pm 0.02$	$1.11 \pm 0.04$	$1.46 \pm 0.02$	$2.17 \pm 0.07$
$r_{\text{ИРН почва/ИРН растение}}$	Вика, овес (сено)	0.54	<b>0.93</b>	$t_{\text{крит}} = 2.78, r_{\text{знач}} = 0.81$	
	Кукуруза (зеленая масса)	<b>0.92</b>	<b>0.88</b>	$t_{\text{крит}} = 2.18, r_{\text{знач}} = 0.53$	
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	<b>0.55</b>	0.27	$t_{\text{крит}} = 2.16, r_{\text{знач}} = 0.51$	
	Клевер (зеленая масса)	<b>0.85</b>	0.59	$t_{\text{крит}} = 2.31, r_{\text{знач}} = 0.63$	
	Рапс (зеленая масса)	0.82	0.31	$t_{\text{крит}} = 4.30, r_{\text{знач}} = 0.95$	
Дерново-подзолистая почва					
7	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.84	0.80	0.75	1.00
8	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.93	0.98	1.13	1.66
9	Клевер (зеленая масса)	1.24	1.50	1.34	2.27
11	Клевер (зеленая масса)	1.12	1.35	0.91	1.53
12	Вика, овес (сено)	1.18	1.22	0.98	1.42
13	Пшеница (зерно/солома)	1.10/1.25	1.14/1.34	1.10/1.24	1.59/1.87
14	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.02	1.07	0.83	1.23
15	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.96	1.03	1.25	1.88
17	Клевер (зеленая масса)	1.39	1.51	1.43	2.18
18	Пшеница (зерно/солома)	0.91/0.95	1.04/1.07	0.82/0.85	1.31/1.34
20	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.89	1.00	1.16	1.74
21	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.01	1.10	1.12	1.63
22	Вика, овес (сено)	1.15	1.21	1.94	2.86
23	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.08	1.14	1.52	2.25
24	Вика, овес (сено)	1.19	1.25	1.16	1.71
26	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.08	1.12	0.59	0.96
27	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.02	1.07	1.47	2.16
33	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.92	1.05	0.64	1.01
35	Кукуруза (зеленая масса)	0.95	1.06	0.85	1.33
36	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.08	1.17	1.55	2.25
37	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.02	1.09	1.41	2.08



Таблица 4. Окончание

№ реп. уч.	Культура (вид продукции)	Удельная активность, Бк/кг		$K_{\Pi}$	
		$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$
$M \pm m$	Вика, овес (сено)	$1.17 \pm 0.03$	$1.23 \pm 0.04$	$1.36 \pm 0.03$	$2.00 \pm 0.03$
	Кукуруза (зеленая масса)	$0.95 \pm 0.02$	$1.06 \pm 0.04$	$0.85 \pm 0.02$	$1.33 \pm 0.02$
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	$0.99 \pm 0.02$	$1.05 \pm 0.03$	$1.12 \pm 0.03$	$1.65 \pm 0.04$
	Клевер (зеленая масса)	$1.25 \pm 0.03$	$1.45 \pm 0.04$	$1.23 \pm 0.04$	$1.99 \pm 0.03$
	Пшеница (зерно/солома)	$1.01 \pm 0.02$	$1.09 \pm 0.02$	$0.96 \pm 0.02$	$1.45 \pm 0.03$
		$1.10 \pm 0.03$	$1.21 \pm 0.03$	$1.05 \pm 0.02$	$1.61 \pm 0.05$
$r_{\text{ИРН почва/ИРН растение}}$	Вика, овес (сено)	<b>0.85</b>	0.44	$t_{\text{крит}} = 2.11, r_{\text{знач}} = 0.46$	
	Кукуруза (зеленая масса)	<b>0.74</b>	0.34	$t_{\text{крит}} = 2.45, r_{\text{знач}} = 0.71$	
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	-0.06	-0.07	$t_{\text{крит}} = 2.01, r_{\text{знач}} = 0.27$	
	Клевер (зеленая масса)	<b>-0.59</b>	<b>-0.92</b>	$t_{\text{крит}} = 2.18, r_{\text{знач}} = 0.53$	
	Пшеница (зерно/солома)	<b>-0.85/-0.78</b>	<b>-0.86/-0.75</b>	$t_{\text{крит}} = 2.57, r_{\text{знач}} = 0.75$	

глобальными выпадениями  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  на территории области, а содержание ЕРН определяется разным происхождением почв и различиями в физико-химических свойствах.

Проведенный корреляционный анализ показал наличие достоверных прямых корреляционных связей высокой силы между МЭД  $\gamma$ -излучения серой лесной:  $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.79$ , при  $r_{\text{знач}} = 0.67$  и дерново-подзолистой:  $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.80$ , при  $r_{\text{знач}} = 0.40$  почвами и удельной активностью  $^{40}\text{K}$ . Следует отметить, что из многих РН, являющихся  $\gamma$ -излучателями,  $^{40}\text{K}$  отличается наибольшими

концентрациями присутствия во многих почвах мира.

Отсутствие значимых связей между МЭД  $\gamma$ -излучения серой лесной:  $r_{(\text{МЭД}/^{137}\text{Cs})} = 0.35$ , при  $r_{\text{знач}} = 0.67$  и дерново-подзолистой:  $r_{(\text{МЭД}/^{137}\text{Cs})} = 0.18$ , при  $r_{\text{знач}} = 0.40$  почвами и удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  можно объяснить очень низкими значениями активности и, следовательно, малым вкладом  $^{137}\text{Cs}$  в формирование суммарного фона  $\gamma$ -излучения серых лесных и дерново-подзолистых почв участков.

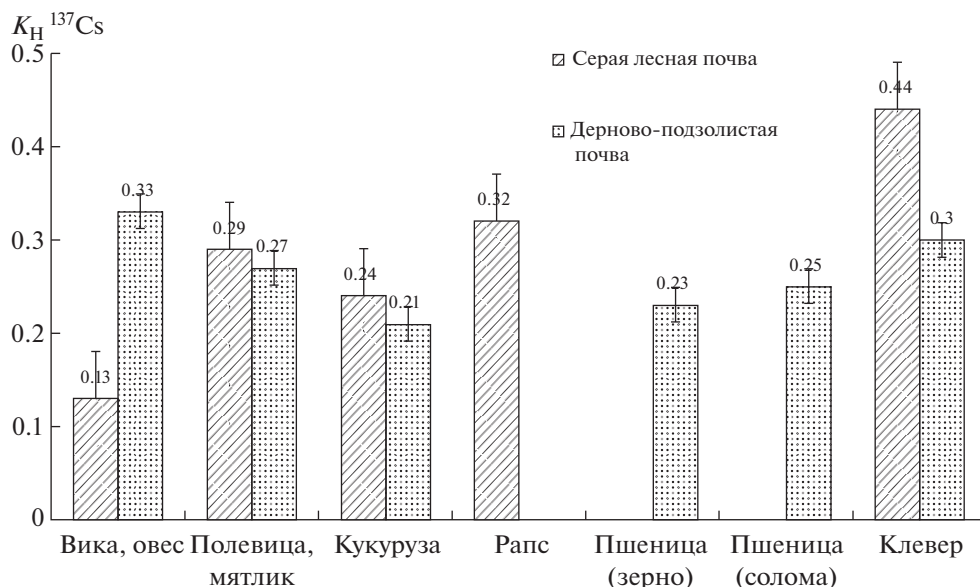


Рис. 2. Коэффициенты накопления  $^{137}\text{Cs}$  растениями.  
Fig. 2. Coefficients of accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by plants.

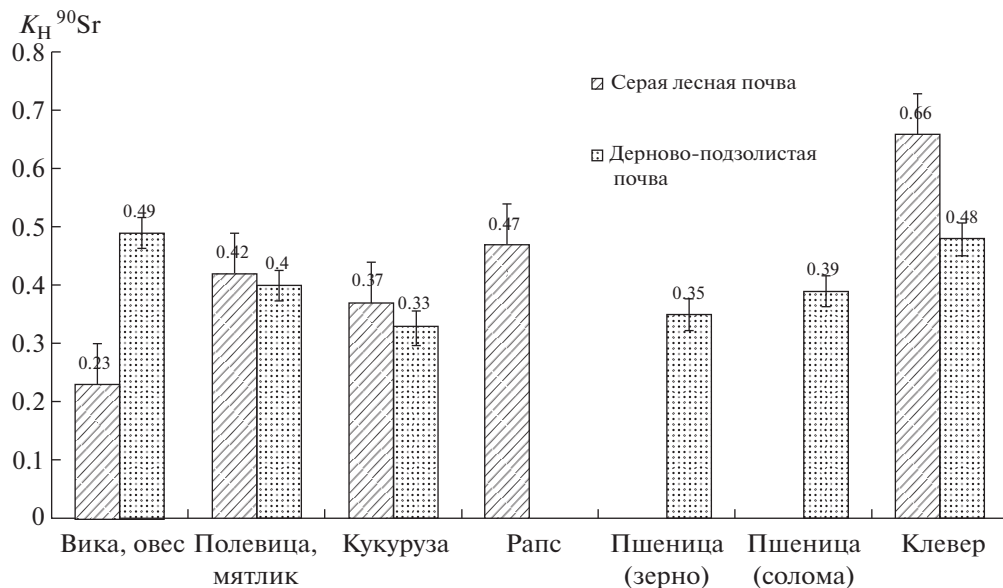


Рис. 3. Коэффициенты накопления  $^{90}\text{Sr}$  растениями.

Fig. 3. Accumulation coefficients of  $^{90}\text{Sr}$  by plants.

Имеются многочисленные данные о связи содержания РН в почве с размером и удельной поверхностью почвенных частиц [6, 23].

Наличие мелкодисперсных частиц фракции физического ила (<0.001 мм, %) не коррелирует с сорбцией изучаемых ИРН и ЕРН почвами. В то же время, судя по значениям коэффициентов корреляции ( $r = 0.45-0.48$ , при  $P = 0.05$ ), достоверно установлено, что содержание частиц фракции физической глины (<0.01 мм, %) приводит к увеличению удельной активности ЕРН в дерново-подзолистой почве. По-видимому, это вызвано тем, что  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  входят в состав почвенных минералов, размер частиц которых составляет от 0.01 до 0.001 мм. На связь присутствия  $^{232}\text{Th}$  в составе первичных минералов фракции почвенных частиц размером порядка 100 мкм указано в работе [25].

Содержание  $C_{\text{орг}}$  и уровень  $\text{pH}_{\text{КСЛ}}$  не оказывали достоверного влияния на аккумуляцию ИРН и ЕРН обеими типами почв (табл. 3).

Обменные Са и Mg, а также другие поглощенные основания (параметр  $S$ ) существенно влияли только на удельную активность  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  в дерново-подзолистых почвах. Между Mg и  $^{232}\text{Th}$  в серых лесных почвах отмечена достоверная положительная взаимосвязь ( $r = 0.74$ ,  $P = 0.05$ ). Предположительно, что между ЕРН и обменными основаниями в дерново-подзолистых почвах существуют какие-то схожие механизмы взаимодействия с органическими и минеральными компонентами почвы.

Анализ корреляционных связей показал, что распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в обеих поч-

вах имеет общую закономерность, на что указывают высокие коэффициенты корреляции Пирсона:  $r_{^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}} = 0.99-1.00$  и  $r_{^{232}\text{Th}/^{40}\text{K}} = 0.82-0.86$ , как и между накоплением  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  в дерново-подзолистых почвах:  $r_{^{226}\text{Ra}/^{232}\text{Th}} = 0.79$  и  $r_{^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}} = 0.91$ .

Настоящим исследованием были определены последовательности культур в ряду накопления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из серой лесной и дерново-подзолистой почв реперных участков. Установлено, что усредненное значение удельной активности в сене и зеленой массе культур как по  $^{137}\text{Cs}$ , так и по  $^{90}\text{Sr}$ , выращенных на участках с серыми лесными почвами, снижалось в ряду: клевер розовый > кукуруза сахарная > рапс > полевица собачья, мятлик луговой > вика посевная, овес посевной. Снижение накопления  $^{137}\text{Cs}$  в сене, зеленой массе и соломе пшеницы из дерново-подзолистой почвы располагалось в ряду: клевер розовый > вика посевная, овес посевной > пшеница мягкая > полевица собачья, мятлик луговой > кукуруза сахарная; соответственно  $^{90}\text{Sr}$ : клевер розовый > вика посевная, овес посевной > пшеница мягкая > кукуруза сахарная > полевица собачья, мятлик луговой.

Величины удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (в пересчете на абсолютно сухое вещество) по всем видам культур на обоих типах почв реперных участков полностью удовлетворяли ветеринарным требованиям к ограничению содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в кормовых сеяных травах (зеленая масса) на уровне не более 370 и 50 Бк/кг, грубых кормах (сено) – не более 600 и 100 Бк/кг и фураж-

ном зерне злаковых – 600 и 65 Бк/кг в сырой массе соответственно [26].

В зерне яровой пшеницы, выращенной на участках с дерново-подзолистыми почвами, как  $^{137}\text{Cs}$ , так и  $^{90}\text{Sr}$  накапливались в 1.09 и 1.11 раза меньше, соответственно, чем в соломе, что может указывать на наличие у растений защитных (барьерных) механизмов, которые препятствуют излишнему проникновению данных ИРН в генеративные органы.

Расчет коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (табл. 4) в сельскохозяйственные культуры из почв показал, что средние значения  $K_{\text{п}}$   $^{90}\text{Sr}$  были больше средних величин  $K_{\text{п}}$   $^{137}\text{Cs}$ , т.е. процесс перехода  $^{90}\text{Sr}$  из обоих типов почв в растения всех видов протекал интенсивнее, чем переход  $^{137}\text{Cs}$ .

При сравнении значений  $K_{\text{п}}$   $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  для одних и тех же видов растений выяснилось, что  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  хуже переходят в растения однолетних трав из серой лесной почвы и растения кукурузы из дерново-подзолистой почвы и лучше переходят в растения клевера из серой лесной почвы и однолетних трав из дерново-подзолистой.

Сила корреляционной взаимосвязи между значениями удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях изменялась в зависимости от типа почвы и вида сельскохозяйственных культур (табл. 4). В основном, между рассматриваемыми показателями отмечалась связь прямой зависимости, однако характер поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения клевера, пшеницы и злаковых трав (полевица, мятлик) на дерново-подзолистой почве отличался для указанных культур на серой лесной почве обратной зависимостью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного радиационного обследования установлено, что средние значения удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в серых лесных и дерново-подзолистых почвах реперных участков Владимирской области не превышали значений фона глобальных выпадений. Удельные активности  $^{226}\text{Ra}$  в обеих почвах,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в дерново-подзолистых почвах не превышали среднемировых и среднероссийских значений активности. Активность серых лесных почв по  $^{40}\text{K}$  и  $^{232}\text{Th}$  была несколько выше среднемирового значения и типичного значения, характерного для данной почвы соответственно.

Усредненная удельная активность серых лесных почв по  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  была меньше, а по  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  – больше, чем у дерново-подзолистых почв.

Присутствие  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в исследуемых почвах обусловлено, прежде всего, глобальными выпадениями ИРН на территории области, а содержание ЕРН определяется разным генезисом и антропогенной деятельностью.

Формируемое  $\gamma$ -излучение почв участков не превышает средних значений, характерных для почв сельскохозяйственных угодий России. Наибольший вклад в формирование  $\gamma$ -излучения почв отмечался со стороны  $^{40}\text{K}$ , а наименьший – от  $^{137}\text{Cs}$ , на обоих типах почв участков.

Плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном горизонте исследованных почв была значительно ниже допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки – 37 и 3.7 кБк/м<sup>2</sup> соответственно, что позволяет отнести почвы всех участков к незагрязненным территориям.

Существенная корреляционная взаимосвязь отмечалась между удельными активностями  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  и  $^{226}\text{Ra}$  с частицами фракции физической глины, а также содержанием обменных Са и Mg и других поглощенных оснований в дерново-подзолистой почве и обменного Mg с  $^{232}\text{Th}$  в серой лесной почве. В остальных случаях достоверно отмеченной взаимосвязи между другими физико-химическими свойствами почв с удельными активностями изучаемых РН не обнаружено.

Характер распределения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  в обеих исследуемых почвах участков имеет общую закономерность, как и между накоплением  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  в дерново-подзолистых почвах, на что указывают достоверные высокие коэффициенты корреляции.

Усредненное значение удельной активности в зеленой массе культурных растений по  $^{137}\text{Cs}$  и по  $^{90}\text{Sr}$ , выращенных на серых лесных почвах, снижалось в ряду: клевер > кукуруза > рапс > полевица, мятлик > вика, овес. Снижение накопления  $^{137}\text{Cs}$  растениями в зеленой массе и соломе пшеницы из дерново-подзолистой почвы располагалось в ряду: клевер > вика, овес > пшеница > полевица, мятлик > кукуруза; соответственно  $^{90}\text{Sr}$ : клевер > > вика, овес > пшеница > кукуруза > полевица, мятлик.

Величины удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по всем видам культур на почвах участков полностью удовлетворяли ветеринарным требованиям к ограничению содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растительной продукции.

Корреляционная взаимосвязь между значениями удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях, в основном, определялась прямой зависимостью, но характер поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения клевера и пшеницы на дерново-подзолистой почве отличался обратной достоверной зависимостью.

Корреляционная взаимосвязь между значениями удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях, в основном, определялась прямой зависимостью, но характер поступления  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения клевера и пшеницы на дерново-подзолистой почве отличался обратной достоверной зависимостью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкологическая оценка земель, проектирование адаптивно-ландшафтных систем земледелия и агротехнологий. Методическое руководство / Под редакцией акад. РАСХН В.И. Кирюшина, акад. РАСХН А.Л. Иванова. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2005. 784 с. [Agroekologicheskaya otsenka zemel', proektirovanie adaptivno-landshaftnykh sistem zemledeliya i agrotekhnologii. Metodicheskoe rukovodstvo / Pod redaktsiei akad. RASKhN V.I. Kiryushina, akad. RASKhN A.L. Ivanova. M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2005. 784 p. (In Russ.)]
2. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др.* Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 752 с. [*Alexakhin R.M., Buldakov L.A., Gubanov V.A. i dr.* Krupnye radiatsionnye аварии: posledstviya i zashchitnye меры. M.: IzdAT, 2001. 752 p. (In Russ.)]
3. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: Биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018. 278 с. [Radioecological consequences of the Chernobyl accident: Biological effects, migration, rehabilitation of contaminated areas / Eds N.I. Sanzharova, S.V. Fesenko. M.: RAN, 2018. 278 p. (In Russ.)]
4. *Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y. et al.* Assessment of environmental  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 124. P. 130–140.
5. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Fizicheskie velichiny: Spravochnik / Pod red. I.S. Grigor'eva i E.Z. Meilikhova. M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (In Russ.)]
6. *Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И.* Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон Республики Коми // *Почвоведение.* 2017. № 7. С. 824–829. [*Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Shuktomova I.I.* Artificial and natural radionuclides in soils of the southern and middle taiga zones of Komi Republic // *Eurasian Soil Science.* 2017. V. 50. № 7. P. 814–819. (In Russian)]  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17050033>
7. *Дричко В.Ф., Крисюк Б.Э., Травникова И.Г. и др.* Частотное распределение концентраций радия-226, тория-228 и калия-40 в различных почвах // *Почвоведение.* 1977. № 9. С. 75–80. [*Drichko V.F., Kri-syuk B.E., Travnikova I.G. i dr.* Chastotnoe raspredelenie koncentracij radiya-226, toriya-228 i kaliya-40 v razlichnyh pochvah // *Pochvovedenie.* 1977. № 9. S. 75–80. (In Russ.)]
8. *Алексахин Р.М.* Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // *Почвоведение.* 2009. № 12. С. 1487–1498. [*Alexakhin R.M.* Radioactive Contamination as a type of soil degradation // *Eurasian Soil Science.* 2009. V. 42. № 12. P. 1386–1396. (In Russian)]
9. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 73 с. [*Gavrilova I.P., Kasimov N.S.* Praktikum po geokhimii landshafta. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1989. 73 p. (In Russ.)]
10. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах: Метод. рекомендации МР 2.6.1.0094–14. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 43 с. [Radiokhimicheskoe opredelenie udel'noi aktivnosti tseziya-137 i strontsiya-90 v probakh pishchevoi produktsii, pochvy, drugih ob'ektov okruzhayushchei sredy i bioprobakh: Metod. rekomendatsii MR 2.6.1.0094–14. M.: Federal'nyi tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2014. 43 p. (In Russ.)]
11. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с. [Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya. M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003. 240 s. (In Russ.)]
12. *Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. и др.* Содержание радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // *Почвоведение.* 2017. № 12. С. 1457–1467. [*Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sanzharova N.I. et al.* Concentrations of radionuclides ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , And  $^{137}\text{Cs}$ ) in chernozems of Volgograd oblast sampled in different years // *Eurasian Soil Science.* 2017. V. 50. № 12. P. 1395–1405. (In Russ.)].  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17120036>
13. *Почвоведение: Учеб. для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г.Д. Белицина, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришина и др. М.: Высш. школа, 1988. 400 с. [Pochvovedenie: Ucheb. dlya un-tov. V 2 ch. / Pod red. V.A. Kovdy, B.G. Rozanova. Ch. 1 Pochva i pochvo-obrazovanie / G.D. Belitsina, V.D. Vasil'evskaya, L.A. Grishina i dr. M.: Vysshaya shkola, 1988. 400 p. (In Russ.)]*
14. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Госкомгидромет СССР. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991. [Radiatsionnaya obstanovka na territorii SSSR v 1990 g. / Pod red. K.P. Makhon'ko. Goskomgidromet SSSR. Obninsk: NPO “Taifun”, 1991. (In Russ.)]
15. *Орлов П.М., Сычев В.Г., Жиленко С.В.* Радиоактивность почв юга России // *Нива Поволжья.* 2017. № 1 (42). С. 53–60. [*Orlov P.M., Sychov V.G., Zhilenko S.V.* Radioactivity of soils in the south of Russia // *Volga Region Farmland.* 2017. № 1 (42). P. 53–60. (In Russ.)]
16. *Трифонов Т.А.* Экологический атлас Владимирской области / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2007. 92 с. [*Trifonova T.A.* Ekologicheskii atlas Vladimirskoi oblasti / Pod red. T.A. Trifonovoi. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2007. 92 p. (In Russ.)]
17. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с. [Sel'skokhozyaistvennaya radioekologiya /

- Pod red. R.M. Alexakhina, N.A. Korneeva. M.: Ekologiya, 1992. 400 p. (In Russ.)]
18. *Staunton S., Hinsinger P., Guivarch A. et al.* Root uptake and translocation of radiocaesium from agricultural soils by various plant species // *Plant and Soil*. 2003. V. 254. P. 443–455.
  19. *Zhu Y.-G., Smolders E.* Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // *J. Exp. Bot.* 2000. V. 51. № 351. P. 1635–1645.
  20. *Архипов Н.П., Федоров Е.А., Алексахин Р.М. и др.* Почвенная химия и корневое накопление искусственных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений // *Почвоведение*. 1975. № 11. С. 40–52. [*Arhipov N.P., Fedorov Ye.A., Alexakhin R.M. i dr.* Pochvennaya himiya i kornevoe nakoplenie iskustvennykh radionuklidov v urozhae sel'skohozyajstvennykh rastenij // *Pochvovedeniye*. 1975. № 11. P. 40–52. (In Russ.)]
  21. *Schneider R., Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I. et al.* Soil-to-plant and soil-to-grain transfer of <sup>137</sup>Cs in fieldgrow maize hybrids during two contrasting seasons: assessing the phenotypic variability and its genetic component // *Radiat. Environ. Biophys.* 2008. V. 47. P. 241–252.
  22. *Черных Н.А., Овчаренко М.М.* Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах: Учеб. пособие. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с. [*Chernykh N.A., Ovcharenko M.M.* Tyazhelye metally i radionuklidy v biogeotsenozakh: Uchebnoe posobie. M.: Agrokonsalt, 2002. 200 p. (In Russ.)]
  23. *Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В. и др.* Современное состояние исследований поведения <sup>90</sup>Sr в системе почва–сельскохозяйственные растения (обзор) // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019. Т. 59. № 6. С. 643–665. [*Sanzharova N.I., Geshel I.V., Krylenkin D.V. et al.* Current state of studies on <sup>90</sup>Sr behavior in the soil–agricultural plants system (overview) // *Radiation biology. Radioecology*. 2019; 6 (59): P. 643–665. (In Russ.)] <https://doi.org/10.1134/S0869803119060109>
  24. *Андреева Н.В., Белова Н.В., Кузнецов В.К. и др.* Влияние различных видов органических удобрений на переход <sup>137</sup>Cs в урожай зерновых культур // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60. № 1. С. 117–125. [*Andreeva N.V., Belova N.V., Kuznetsov V.K. et al.* Influence of different types of organic fertilizers on the transfer of <sup>137</sup>Cs into the grain crops harvest // *Radiation biology. Radioecology*. 2020. V. 60. № 1. P. 117–125 (In Russ.)] <https://doi.org/10.31857/S086980312001004X>
  25. *Рубцов Д.М.* Распределение урана и радия в горных подзолистых почвах редколесья // *Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах*. М.: Наука, 1972. С. 42–52. [*Rubtsov D.M.* Raspredele-nie urana i radiya v gornyykh podzolistykh pochvakh redkoles'ya // *Radioekologicheskie issledovaniya v prirodnykh biogeotsenozakh*. M.: Nauka, 1972. P. 42–52. (In Russ.)]
  26. Инструкция о радиологическом контроле качества кормов. Контрольные уровни содержания радионуклидов цезия-134, -137 и стронция-90 в кормах и кормовых добавках (Утв. Главным государственным ветеринарным инспектором РФ 01.12.1994 г. № 13–7–2/216). [*Instrukciya o radiologicheskom kontrole kachestva kormov. Kontrol'nye urovni sodержaniya radionuklidov ceziya-134, -137 i stronciya-90 v kormah i kormovykh dobavkakh* (Utv. Glavnym gosudarstvennym veterinarnym inspektorom RF 01.12.1994 g. № 13–7–2/216). (In Russ.)]

## Assessment of the Radiation Situation in Reference Areas of Agricultural Lands of the Vladimir Region

A. A. Utkin<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>D.K. Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy, Ivanovo, Russia

<sup>#</sup>E-mail: aleut@inbox.ru

The paper presents the results of a radiation survey of sod-podzolic and gray forest soils of reference agricultural plots of the Vladimir region. The study established background values of specific activities of the studied radionuclides in the soils of reference sites. According to the density of contamination of the arable horizon of gray forest and sod-podzolic soils <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr, it was determined that all reference areas of the region belong to uncontaminated territories. The power of the exposure dose of gamma radiation of soils and the contribution of radionuclides of gamma emitters to the formation of the gamma background of soils are determined. Using correlation analysis, the influence of individual physical and chemical properties of soils on the behavior and distribution of radionuclides in soils and the relationship between the content of radionuclides was determined. Based on the values of the specific activity of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in plant products grown on the soils of reference sites, rows of crops were constructed according to the decreasing ability to accumulate radionuclides from the soil. All grown plant products for all types of crops fully met the veterinary requirements for the content of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in plant feeds (hay, green mass and feed grain). According to the transition coefficients, it was found that the process of transition of <sup>90</sup>Sr from both types of soils to plants proceeded more intensively than the transition of <sup>137</sup>Cs. The calculated coefficients of linear correlation between the values of the specific activity of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr in soils and plants revealed the strength of the relationships and the nature of the dependencies.

**Keywords:** radionuclides, <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>40</sup>K, gray forest soil, sod-podzolic soil, reference sites, cultivated plants, Vladimir region