

УДК 632.118.3:632.122.1(470.315)

МОНИТОРИНГ ^{137}Cs , ^{90}Sr И ^{40}K В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. А. А. Уткин^{1,*}, Н. И. Аканова², И. Б. Нода³¹ Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева
153012 Иваново, ул. Советская, 45, Россия² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия³ Станция агрохимической службы “Ивановская”
153506 Ивановская обл., с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Представлены результаты радиационного мониторинга дерново-подзолистых почв реперных участков сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., проведенного в 2014 и 2021 г. Установлены фоновые величины удельных активностей исследованных радионуклидов в почвах реперных участков. По плотности загрязнения пахотного горизонта почв ^{137}Cs и ^{90}Sr был определен уровень экологической обстановки, что позволило отнести почвы всех реперных участков области к незагрязненным территориям, пригодным без ограничений для сельскохозяйственного использования. Определены мощность экспозиционной дозы γ -излучения почв и вклад ^{40}K и ^{137}Cs в формирование γ -фона почв. Корреляционным анализом определены влияние отдельных физико-химических свойств почв на поведение и распределение радионуклидов в почве и взаимосвязи между содержанием самих радионуклидов. Исходя из величин удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, выращенной в 2014 и 2021 г., были построены ряды культурных растений с убывающей способностью к накоплению из почвы данных радионуклидов. Вся выращенная растительная продукция всех видов культур полностью удовлетворяла ветеринарным нормативам, предъявляемым к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительных кормах (зеленой массе, соломе и фуражном зерне). Рассчитаны коэффициенты накопления и перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения. Коэффициенты линейной корреляции между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях позволили выявить силу и характер этих зависимостей.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , дерново-подзолистая почва, растения, реперные участки, Ивановская обл.

DOI: 10.31857/S0002188123070116, EDN: OGIFAF

ВВЕДЕНИЕ

Почвы являются основным “депо” поступающих в них различных токсикантов, в т.ч. и искусственных радионуклидов (ИРН), которые могут в больших количествах накапливаться в растительной продукции, поступать с ней в организмы сельскохозяйственных животных и человека. Основное загрязнение почв и культурных растений агроценозов в России связано с долгоживущими ИРН: ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ лет) и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28.79$ лет) [1].

Почвы, как природные объекты, сформированные при эволюции нашей планеты, также могут содержать в себе и естественные радионуклиды (ЕРН), которые определяют природный радиационный фон почв [2]. К числу наиболее

широко распространенных ЕРН в почвах относится ^{40}K , с периодом полураспада $T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ лет [1].

В Ивановской обл., как в развивающемся аграрном регионе, расположенном в центре европейской части России, распространены дерново-подзолистые почвы, доля которых в почвенном покрове пахотных земель области составляет 92% [3], на которых возделывают широкий набор сельскохозяйственных культур. В научной литературе источники поступления и особенности накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K дерново-подзолистыми почвами и растениями в почвенно-климатических условиях Ивановской обл. остаются слабо

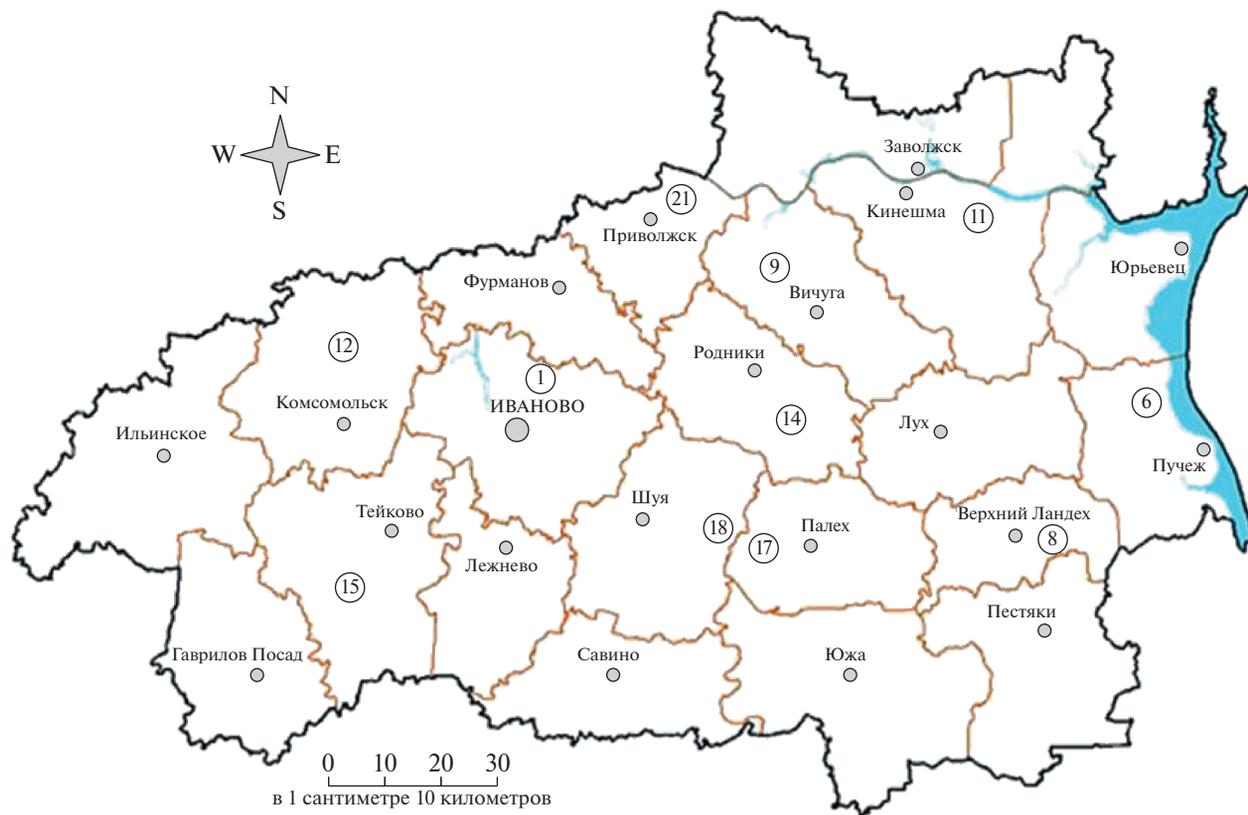


Рис. 1. Карта Ивановской области: числами обозначены номера реперных участков.

изученными по сравнению с почвами других регионов России [4, 5].

Цель работы – проведение локального радиационного мониторинга дерново-подзолистых почв реперных участков сельскохозяйственных угодий Ивановской обл. на наличие содержания в них ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K , определение влияния отдельных физико-химических свойств почв на поведение изученных радионуклидов (РН) в системе почва–растение, возможности получения безопасной растительной продукции, соответствующей ветеринарным нормативам.

Комплексную оценку современного уровня γ -излучения и содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в дерново-подзолистых почвах и культурных растениях агроценозов Ивановской обл. проводили впервые. Данные, полученные в ходе проведенного мониторинга, в научной литературе ранее не находили своего глубокого изучения и освещения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое и радиологическое обследования почв реперных участков и культурных рас-

тений на содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K проводили в 2014 и 2021 г. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на 11 реперных участках, занятых дерново-подзолистыми почвами, расположенных в отдельных районах Ивановской обл. (рис. 1), путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализов. Общая площадь дерново-подзолистых почв реперных участков – 207,7 га. Реперные участки в основном не имели уклона и располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков – культурные растения: овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) и злаковое разнотравье преимущественно в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и щучки дернистой (*Deschampsia cespitosa* L.).

С отдельного реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростьевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец массой ~0,5 кг составляли из 25–30 точечных проб и в среднем отбира-

ли 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 с одних и тех же локаций реперных участков. Отборные 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, содержание обменных оснований кальция и магния (**Ca** и **Mg**) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество ($\text{C}_{\text{орг}}$) (по Тюрину в модификации ЦИНАО) – ГОСТ 2621391, сумма поглощенных оснований (S) (по Каппену) – ГОСТ 27821-88, фракции физической глины и ила – по Качинскому [5].

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

Содержание ^{137}Cs в почве и ^{90}Sr в почве и растительных образцах определяли согласно методическим рекомендациям [6], ^{137}Cs в растительной продукции – по ГОСТ Р 54040-2010. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л. Растительные образцы на определение ^{137}Cs и ^{90}Sr предварительно озоляли (концентрировали 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 γ -излучения проводили по методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [7]. МЭД γ -излучения измеряли в полевых условиях на высоте 1 м над поверхностью почвы радиометром СРП-68-01. На каждом участке проводили 8 замеров, с последующим подсчетом среднего показателя.

Для оценки перехода ИРН из почвы в растения рассчитывали коэффициент накопления ($K_{\text{н}}$), равный отношению удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к его активности в почве (Бк/кг сухой массы). Коэффициент перехода ($K_{\text{п}}$) определяли как отношение удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к плотности загрязнения почвы на единицу площади (кБк/м²).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Средние величины изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью 2-х выборочного t -критерия Стьюдента для зависимых переменных ($p < 0.05$), при ненормальном – критерия Вилкоксона ($p < 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Накопление, распределение и миграция радионуклидов в почвах зависят от многих факторов, среди которых прежде всего большое значение имеют содержание органического вещества и его качественный состав, кислотность почвенной среды, химический и гранулометрический составы, характер увлажнения и рельеф местности [8].

Для изучения влияния физико-химических показателей почв на особенности поведения в них РН было проведено обследование дерново-подзолистых почв реперных участков, его результаты приведены в табл. 1.

Согласно градации распределения глинистых частиц почвы, большинство участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав. Средние величины обеспеченности почв участков $\text{C}_{\text{орг}}$ в 2014 и 2021 г. соответствовали низкому уровню обеспеченности. За период наблюдения средняя величина обменной кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед.

Дерново-подзолистые почвы большинства участков с 2014 по 2021 г. преимущественно имели среднюю и повышенную степень обеспеченности обменными Ca и Mg соответственно. С 2014 г. среднее содержание Ca и Mg увеличилось на 1.5 и 26.1% соответственно, но тем не менее, продолжало соответствовать средней и повышенной степеням обеспеченности основаниями.

Средняя доля присутствия обменных Ca и Mg в общем составе поглощенных катионов в 2014 и 2021 г. составляла 63.4% (lim = 38.2–92.4%) и 58.6% (lim = 22.8–97.7%) соответственно, что свидетельствовало о важной роли этих элементов в процессах химизма дерново-подзолистых почв Ивановской обл. Показатели суммы поглощенных оснований (параметр S) почв большинства реперных участков соответствовали повышен-

Таблица 1. Физико-химические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

Реперный участок, №*	Число смешанных образцов, <i>n</i>	Район	Фракция (мм), %**		$C_{орг}$, %	pH_{KCl}	Ca	Mg	S
			<0.001	<0.01					
1	2	Ивановский	4.8	18.3	<u>2.1</u>	<u>5.2</u>	<u>5.9</u>	<u>2.1</u>	<u>11.8</u>
					2.0	5.8	5.0	2.5	10.8
6	2	Пучежский	2.0	9.3	<u>2.1</u>	<u>5.6</u>	<u>7.9</u>	<u>2.6</u>	<u>10.7</u>
					1.7	6.3	4.6	2.8	9.1
8	3	Верхнеландеховский	3.5	16.0	<u>1.9</u>	<u>5.0</u>	<u>8.4</u>	<u>2.3</u>	<u>12.5</u>
					1.6	5.5	4.4	1.7	8.2
9	4	Вичугский	3.0	14.1	<u>2.3</u>	<u>6.1</u>	<u>7.9</u>	<u>2.5</u>	<u>27.9</u>
					2.1	6.2	7.6	3.4	27.6
11	2	Кинешемский	5.5	25.0	<u>2.4</u>	<u>5.5</u>	<u>4.4</u>	<u>1.8</u>	<u>16.0</u>
					2.2	5.9	9.4	3.5	16.2
12	5	Комсомольский	5.7	20.0	<u>2.1</u>	<u>6.2</u>	<u>8.5</u>	<u>2.8</u>	<u>17.0</u>
					2.1	6.2	5.1	2.8	20.7
14	3	Родниковский	5.2	31.0	<u>1.8</u>	<u>5.1</u>	<u>6.1</u>	<u>1.9</u>	<u>12.2</u>
					2.0	5.4	7.9	3.0	11.8
15	4	Тейковский	2.3	9.0	<u>2.0</u>	<u>6.5</u>	<u>7.6</u>	<u>2.8</u>	<u>16.8</u>
					2.5	6.2	5.1	2.1	9.9
17	4	Палехский	3.3	16.3	<u>2.2</u>	<u>6.0</u>	<u>5.5</u>	<u>2.3</u>	<u>12.5</u>
					3.0	6.8	7.6	2.0	19.4
18	4	Шуйский	4.9	16.2	<u>3.1</u>	<u>5.7</u>	<u>4.6</u>	<u>2.2</u>	<u>17.2</u>
					3.0	5.7	8.4	3.6	0.3
21	3	Приволжский	5.1	19.9	<u>2.8</u>	<u>6.4</u>	<u>6.2</u>	<u>2.6</u>	<u>38.6</u>
					2.6	6.5	8.7	4.0	30.8
<i>M ± m</i>			4.1 ± 0.4	17.7 ± 1.9	<u>2.3 ± 0.1</u> 2.3 ± 0.1	<u>5.8 ± 0.2</u> 6.0 ± 0.1	<u>6.6 ± 0.4</u> 6.7 ± 0.6	<u>2.3 ± 0.1</u> 2.9 ± 0.2	<u>17.6 ± 2.5</u> 16.8 ± 2.3

Примечания. 1. *M* – среднее арифметическое, *m* – ошибка среднего арифметического В таблице приведены средние арифметические. То же в табл. 2–4. 2. Над чертой – 2014 г., под чертой – 2021 г. То же в табл. 2–4.

*Нумерация реперных участков та же в табл. 2–4.

**Определяли на момент закладки почвенного разреза.

ным степеням обеспеченности. Средняя величина *S* почв участков за период наблюдений уменьшилась на 0.8 смоль(экв)/100 г почвы.

Отметим, что варьирование всех физико-химических показателей дерново-подзолистых почв участков подчинялось закону нормального распределения. Величины критерия Шапиро–Уилка удовлетворяли условию $p > 0.05$.

Сравнение физико-химических показателей почв по 2-м аналогичным зависимым выборкам 2014 и 2021 г. показало, что существенные различия отличались только для pH_{KCl} , это подтверждено расчетом величин *t*-критерия Стьюдента ($p < 0.05$).

Результаты определения удельной активности ERH позволили дать более точную характеристику радиационной обстановки исследованной тер-

ритории путем сравнения их удельных активностей в изученных почвах с их общемировыми или региональными показателями, а IPR – со среднестатистическим их содержанием в почвах, обусловленном глобальными выпадениями. Удельные активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в почвах участков представлены в табл. 2.

Удельные активности ^{40}K в почвах Земли варьируют в широких диапазонах, в качестве среднемирового принята величина 450 Бк/кг почвы. По данным Тихомирова [10], содержание ^{40}K в дерново-подзолистых почвах России в среднем составляет 360 Бк/кг. Средняя удельная активность ^{40}K в дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. за период мониторинга была в 1.12–1.14 раза больше фоновой величины.

Таблица 2. Мощность экспозиционной дозы, удельная активность и плотность загрязнения почв ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁴⁰K

Реперный участок, №			⁹⁰ Sr		⁴⁰ K		МЭД
	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	мкР/ч
1	7.4	0.052	3.5	0.025	408	2.87	10.5
	6.4	0.045	4.1	0.029	440	3.09	10.6
6	4.1	0.029	6.0	0.042	440	3.09	12.0
	8.5	0.060	2.1	0.015	482	3.39	10.8
8	3.9	0.027	8.1	0.057	308	2.16	8.0
	7.3	0.051	2.4	0.017	330	2.32	7.4
9	3.9	0.027	10.4	0.073	447	3.14	13.0
	7.9	0.055	3.8	0.027	461	3.24	10.8
11	8.2	0.057	3.5	0.025	473	3.32	14.5
	8.0	0.056	2.4	0.017	464	3.26	10.8
12	5.7	0.040	9.0	0.063	348	2.45	11.0
	7.0	0.049	3.1	0.022	376	2.64	8.7
14	7.9	0.055	6.3	0.044	433	3.04	13.0
	6.9	0.048	3.9	0.027	394	2.77	10.0
15	4.6	0.032	7.4	0.052	314	2.206	9.0
	7.3	0.051	3.3	0.023	312	2.19	7.6
17	5.7	0.040	5.7	0.040	335	2.35	10.0
	5.4	0.038	3.4	0.024	387	2.72	8.0
18	6.7	0.047	6.8	0.048	440	3.09	10.5
	7.0	0.049	4.1	0.029	421	2.96	11.0
21	6.2	0.043	7.1	0.050	485	3.41	13.0
	8.3	0.058	2.9	0.020	433	3.04	12.5
<i>M ± m</i>	5.8 ± 0.5	0.041 ± 0.003	6.7 ± 0.6	0.047 ± 0.004	403 ± 19	2.83 ± 0.14	15.4 ± 1.2
	7.3 ± 0.3	0.051 ± 0.002	3.2 ± 0.2	0.023 ± 0.002	409 ± 17	2.88 ± 0.12	9.8 ± 0.5

Удельные активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в дерново-подзолистых почвах обследованных участков не превышали величины фона глобальных выпадений – 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [11]. Усредненная удельная активность почв участков по величинам активности ¹³⁷Cs и ⁴⁰K в 2021 г. была в 1.26 и 1.01 раза больше, чем в 2014 г., удельная активность ⁹⁰Sr со временем наблюдения уменьшилась в 2.09 раза.

Плотность загрязнения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в пахотном горизонте (0–20 см) почв была значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки в 1 и 0.1 Ки/км² соответственно, что позволило отнести исследованные почвы участков к незагрязненным территориям [7].

Варьирования показателей МЭД γ-фона, удельных активностей и плотностей загрязнения почв участков ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr подчинялись закону нормального распределения признака. Сравнение показателей МЭД γ-фона, удельных активностей

и плотностей загрязнения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr зависимых выборок 2014 и 2021 г. выявило присутствие значимых различий между ними ($p < 0.05$), что подтверждено расчетом величин *t*-критерия Стьюдента. Расчет *t*-критерия Стьюдента для удельной активности и плотности загрязнения ⁴⁰K показал, что между ними отсутствовали существенные различия ($p > 0.05$).

В среднем, за время проведения мониторинга МЭД γ-излучение дерново-подзолистых почв реперных участков не превышало средний показатель, характерный для почв сельскохозяйственных угодий России (11.4 мкР/ч) [12].

Проведенный корреляционный анализ показал наличие достоверных прямых корреляционных связей Пирсона высокой силы между МЭД γ-излучения почвы и удельной активностью ⁴⁰K в 2014 г.: $r_{(МЭД/^{40}K)} = 0.87$ и в 2021 г.: $r_{(МЭД/^{40}K)} = 0.75$ при $p < 0.05$. Следует отметить, что из ряда РН, являющихся γ-излучателями, ⁴⁰K отличается наи-

Таблица 3. Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между свойствами почв и удельными активностями РН

Свойства почвы/РН	Фракция, %		C _{орг} , %	рН _{КСl}	Ca	Mg	S	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁴⁰ K
	<0.001 мм	<0.01 мм								
¹³⁷ Cs	<u>0.79*</u>	<u>0.80*</u>	<u>0.21</u>	<u>-0.31</u>	<u>-0.80*</u>	<u>-0.68*</u>	<u>-0.10</u>	-	<u>-0.70*</u>	<u>0.45</u>
	<u>-0.12</u>	<u>-0.15</u>	<u>-0.04</u>	<u>-0.04</u>	<u>0.07</u>	<u>0.54</u>	<u>0.16</u>		<u>-0.55</u>	<u>0.42</u>
⁹⁰ Sr	<u>-0.25</u>	<u>-0.29</u>	<u>-0.02</u>	<u>0.43</u>	<u>0.70*</u>	<u>0.62*</u>	<u>0.41</u>	<u>-0.70*</u>	-	<u>-0.25</u>
	<u>0.24</u>	<u>0.20</u>	<u>-0.20</u>	<u>-0.20</u>	<u>0.22</u>	<u>0.13</u>	<u>0.22</u>	<u>-0.55</u>		<u>-0.05</u>
⁴⁰ K	<u>0.35</u>	<u>0.36</u>	<u>0.54</u>	<u>-0.05</u>	<u>-0.48</u>	<u>-0.35</u>	<u>0.46</u>	<u>0.45</u>	<u>-0.25</u>	-
	<u>0.13</u>	<u>0.11</u>	<u>0.14</u>	<u>0.14</u>	<u>0.40</u>	<u>0.67*</u>	<u>0.33</u>	<u>0.42</u>		

*Значимые коэффициенты корреляции при $p < 0.05$. То же в табл. 4.

большими концентрациями присутствия во многих почвах мира.

Отсутствие значимых корреляционных связей между МЭД γ -излучения почвы и удельной активностью ¹³⁷Cs в 2014 и 2021 г. ($r_{(МЭД/^{137}Cs)} = 0.47$ и 0.53 соответственно, при $p < 0.05$) можно объяснить низкими величинами активности и, следовательно, малым вкладом ¹³⁷Cs в формирование суммарного фона γ -излучения исследованных почв реперных участков.

Отмеченные корреляционные взаимосвязи между физико-химическими свойствами дерново-подзолистой почвы и удельными активностями ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁴⁰K, а также между самими изученными РН отражены в табл. 3.

Судя по величинам коэффициентов корреляции ($r = 0.79-0.80$, $p < 0.05$), достоверно установлено, что содержание частиц фракций физической глины и ила приводило к увеличению удельной активности ¹³⁷Cs в почве только в 2014 г. Вероятно, это могло быть связано с созданием в 2014 г. более благоприятных внешних условий среды для адсорбции ¹³⁷Cs минеральными и органическими частицами дерново-подзолистых почв, чем в 2021 г. В остальных случаях наличие мелкодисперсных частиц не коррелировало с накоплением почвами изученных РН.

Содержание C_{орг} и уровень рН_{КСl} не оказывали достоверного влияния на аккумуляцию ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁴⁰K исследованной почвой.

Обменные основания Ca и Mg существенно влияли на удельную активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в 2014 г. Поглощенные основания (S) не оказывали заметного влияния на активность изученных РН.

Среднюю и высокую корреляционную взаимосвязь обратной зависимости ($r = -0.55$ и $r = -0.70$) между присутствием ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почве предпо-

жительно можно объяснить различными механизмами поглощения данных ИРН почвой (табл. 3). Следует отметить, что между сорбцией почвами ¹³⁷Cs и ⁴⁰K отмечена прямая корреляция средней силы. Возможно, это обстоятельство связано с тем, что ¹³⁷Cs и ⁴⁰K – химические аналоги, а значит, и многие особенности их поглощения почвами могут быть идентичными.

Данные удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениях и $K_{п}$ ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr из почвы в растения даны в табл. 4. Поступление РН из почв в растения зависит от типа почвы и ее свойств. В сельскохозяйственной радиобиологии установилось понимание того, что из кислых почв, обедненных основаниями Ca и Mg, легкого гранулометрического состава ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr более интенсивно поступают в растения по сравнению с высокоплодородными и богатыми основаниями почвами [13].

Кроме того, немаловажное влияние на накопление ИРН растениями оказывают и биологические особенности культур, обусловленные видовой и сортовой принадлежностью. Например, различия в накоплении ⁹⁰Sr у зерновых и бобовых культур, выращенных на одной почве, различаются в 85 раз, у корнеплодов и овощных культур – в 350 раз [14], у кукурузы – в 10–15 раз [15], ¹³⁷Cs у картофеля – в 14 раз, у моркови – в 2.5 раза [16].

Исследованием были определены последовательности культур в рядах накопления и перехода ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr из дерново-подзолистой почвы реперных участков в 2014 и 2021 г. Установлено, что средняя величина удельной активности ¹³⁷Cs в зеленой массе культур снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > > клевер розовый, тимофеевка луговая; удельная активность ⁹⁰Sr снижалась в ряду: клевер розовый, тимофеевка луговая > полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая.

Таблица 4. Параметры перехода и удельная активность ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в растениях

Реперный участок, №	Культура (вид продукции)	Удельная активность, Бк/кг		K _п	
		¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
1	Овес (зерно/солома)	1.50/3.00	1.10/1.31	0.78/1.56	1.21/1.44
	Овес (зерно/солома)	1.50/4.00	0.50/2.20	0.90/2.40	0.47/2.06
6	Озимая пшеница (зерно/солома)	1.70/3.10	0.30/3.30	1.58/2.89	0.19/2.10
	Овес (зерно/солома)	2.00/2.10	1.10/1.50	0.90/0.95	2.01/2.73
8	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	3.30	4.35	3.30	2.10
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	3.30	1.30	1.75	2.10
9	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	3.20	0.70	3.20	0.26
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	1.90	0.20	0.93	0.20
11	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	2.90	8.26	1.38	9.18
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	3.50	2.20	1.69	3.54
12	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	2.80	1.04	1.89	0.45
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	2.10	0.40	1.16	0.50
14	Ячмень (зерно/солома)	1.80/2.70	0.80/2.70	0.88/1.33	0.49/1.66
	Яровая пшеница (зерно/солома)	1.10/3.30	1.00/1.90	0.62/1.86	1.00/1.89
15	Ячмень (зерно/солома)	1.70/2.90	0.70/1.90	1.44/2.45	0.37/1.00
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	2.10	0.40	1.11	0.47
17	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	3.10	1.36	2.09	0.92
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	3.40	1.30	2.42	1.47
18	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	2.90	1.06	1.67	0.60
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	3.20	1.70	1.77	1.60
21	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	3.70	1.06	2.33	0.93
	Овес (зерно/солома)	2.20/2.70	1.50/1.90	1.03/1.26	2.00/2.53
M ± m	Овес (зерно/солома)	1.80 ± 0.18/ 2.95 ± 0.40	1.05 ± 0.21/ 1.73 ± 0.20	0.90 ± 0.05/ 1.54 ± 0.31	1.42 ± 0.37/ 2.19 ± 0.29
	Яровая пшеница (зерно/солома)	1.10 ± 0.16/ 3.30 ± 0.43	1.00 ± 0.18/ 1.90 ± 0.20	0.16 ± 0.01/ 0.48 ± 0.16	0.26 ± 0.05/ 0.49 ± 0.06
	Ячмень (зерно/солома)	1.75 ± 0.05/ 2.80 ± 0.10	0.75 ± 0.05/ 2.30 ± 0.40	1.16 ± 0.28/ 1.89 ± 0.56	0.43 ± 0.06/ 1.33 ± 0.33
	Озимая пшеница (зерно/солома)	1.70 ± 0.12/ 3.10 ± 0.45	0.30 ± 0.06/ 3.30 ± 0.44	1.58 ± 0.23/ 2.89 ± 0.49	0.19 ± 0.04/ 2.10 ± 0.39
	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	3.03 ± 0.08	2.13 ± 0.56	2.26 ± 0.33	1.39 ± 0.51
	Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	2.90 ± 0.26	1.15 ± 0.26	1.64 ± 0.19	1.35 ± 0.39
	r ИРН почва/ r ИРН растение	Овес (зерно/солома)	0.86/−0.97*	−0.63/0.49	
Яровая пшеница (зерно/солома)	0.34/0.29	0.41/0.45			
Ячмень (зерно/солома)	0.79*/−0.43	0.57/0.65			
Озимая пшеница (зерно/солома)	0.51/0.29	0.09/0.35			
Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса)	−0.77	−0.23			
Клевер, тимофеевка (зеленая масса)	−0.42	0.15			

Интенсивность перехода ^{137}Cs из почвы в растения снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > клевер розовый, тимофеевка луговая; для ^{90}Sr : полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > клевер розовый, тимофеевка луговая.

Ряды последовательности культур по величине удельной активности и $K_{\text{П}}$ для ^{137}Cs сопоставимы между собой, в отношении ^{90}Sr отмечено не сопоставление позиций в рядах.

Среди зерновых культур удельная активность ^{137}Cs в зерне снижалась в ряду: овес > ячмень > озимая пшеница > яровая пшеница; в соломе: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Удельная активность ^{90}Sr в зерне злаков снижалась в ряду: овес > яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница; в соломе: озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес.

Фактические величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr (на абсолютно сухое вещество) всех видов культур полностью удовлетворяли ветеринарным требованиям к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовых травах (зеленой массе) на уровне ≤ 370 и 50 Бк/кг, грубых кормах (соломе) – ≤ 600 и 100 Бк/кг и фуражном зерне злаковых – 600 и 65 Бк/кг в сырой массе соответственно [17].

Накопление ^{137}Cs и ^{90}Sr одними и теми же культурами менялось по годам. В 2014 г. растения в основном интенсивнее поглощали ^{137}Cs , чем ^{90}Sr , в 2021 г. – наоборот, о чем свидетельствовали рассчитанные величины $K_{\text{Н}}$ (рис. 2).

Установленные для культур величины $K_{\text{Н}}$ ^{137}Cs и $K_{\text{Н}}$ ^{90}Sr для надземной фитомассы травостоев на обследованных участках укладывались в пределы от 0.16 до 0.85 и от 0.05 до 0.93 соответственно, что хорошо подтверждали величины $K_{\text{Н}}$ $^{137}\text{Cs} = 0.12$ – 2.08 и $K_{\text{Н}}$ $^{90}\text{Sr} = 0.20$ – 0.86 , приведенные в работе [18].

Многочисленными исследованиями установлено, что ИРН в генеративных органах растений (зерно, плоды и др.) накапливаются в меньших количествах, чем в вегетативных органах (соломе, листьях) [19, 20]. В нашем исследовании зерно озимой и яровой пшеницы, овса и ячменя во всех случаях меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с соломой этих культур. Эффективность защитного действия от проникновения ^{137}Cs в зерно из вегетативных органов снижалась в ряду: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень; для ^{90}Sr ряд был следующим: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона, показал, что между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне и соломе овса отмечены недостоверные взаимосвязи: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.71$ и $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.43$; в зерне и соломе озимой пшеницы выявлена недостоверная взаимосвязь для: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.76$ и достоверная для $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.89$; в зерне и соломе яровой пшеницы достоверная взаимосвязь для: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.80$ и недостоверная для $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.58$; в зерне и соломе ячменя выявлены недостоверные взаимосвязи для: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.69$ и $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.70$.

Расчет коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 4) из почвы в культуры показал, что процесс перехода ^{90}Sr из почвы в растения овса и яровой пшеницы проходил интенсивнее, чем переход ^{137}Cs , для остальных культур – наоборот.

Сила корреляционной взаимосвязи между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур. Между рассмотренными показателями в основном отмечали прямую связь средней силы.

ВЫВОДЫ

1. Средние величины удельных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. не превышали фоновых показателей глобальных выпадений. Удельная активность почв для ^{40}K была в 1.12 – 1.14 раза больше типичного показателя, характерного для исследованной почвы.

2. Усредненная удельная активность почв участков для ^{137}Cs и ^{40}K в 2021 г. была больше, чем в 2014 г., удельная активность ^{90}Sr во время наблюдения уменьшилась.

3. Присутствие ^{137}Cs и ^{90}Sr в дерново-подзолистой почве обусловлено глобальными выпадениями ИРН на территории области, содержание ^{40}K определяется генезисом и физико-химическими свойствами почв.

4. Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном горизонте почв участков была значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки – 1 и 0.1 Ки/км² соответственно, что позволило отнести почвы всех участков к незагрязненным территориям.

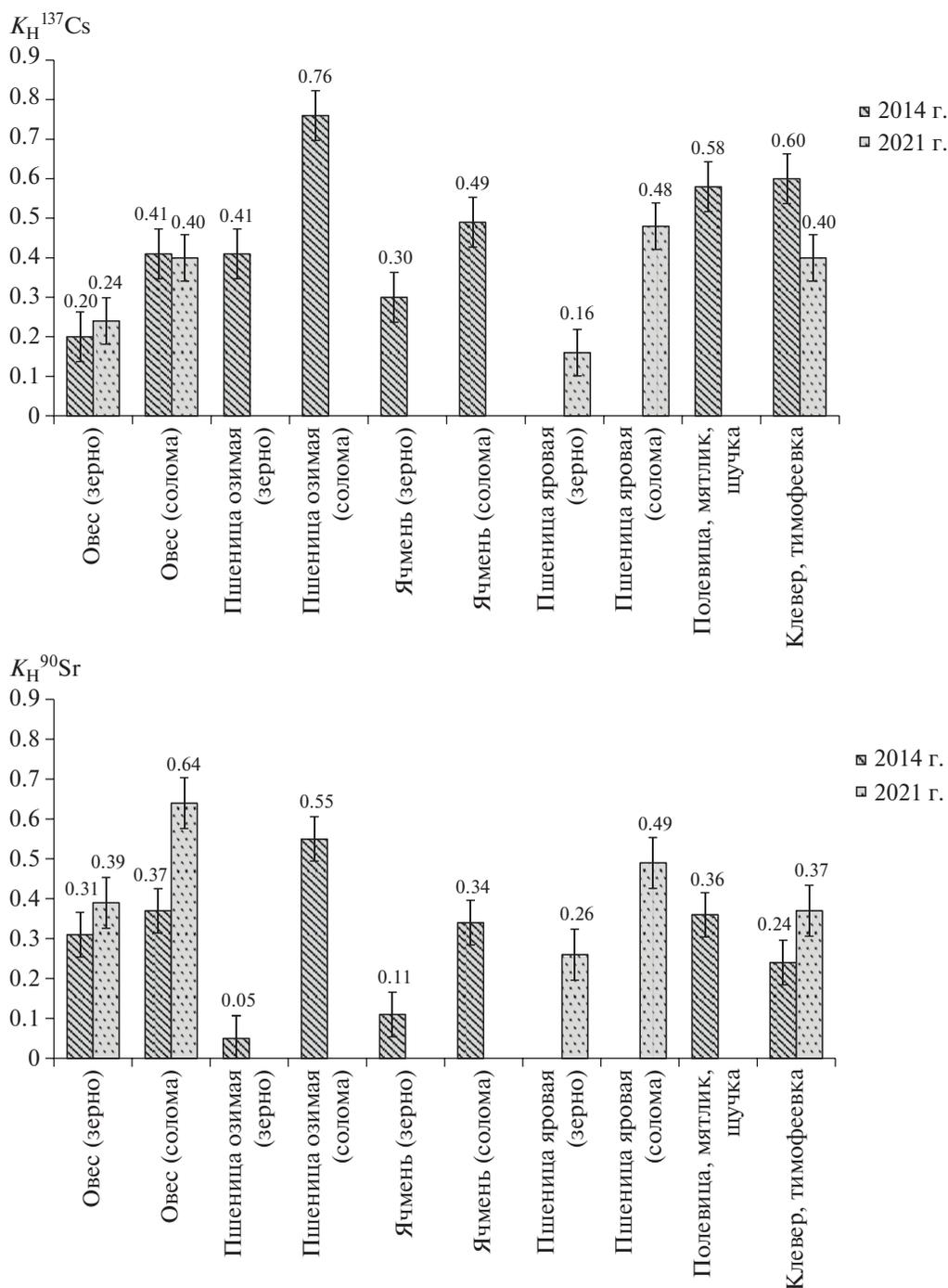


Рис. 2. Коэффициенты накопления растениями: (а) – ^{137}Cs , (б) – ^{90}Sr .

5. Сформированное γ -излучение почв участков не превышало средний показатель, характерный для почв сельскохозяйственных угодий России. Наибольший достоверный вклад в формирование γ -излучения почв отмечен со стороны ^{40}K , наименьший и несущественный – от ^{137}Cs .

6. Между удельной активностью ^{137}Cs с частями фракций физической глины и ила в 2014 г.

отмечена существенная корреляционная взаимосвязь. В остальных случаях достоверно отмеченной корреляции между другими физико-химическими свойствами почвы и удельными активностями изученных радионуклидов не обнаружено.

7. Усредненная величина удельной активности в зеленой массе культур ^{137}Cs снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дерни-

стая > клевер розовый, тимофеевка луговая; активность ^{90}Sr снижалась в ряду: клевер розовый, тимофеевка луговая > полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая. У зерновых культур удельная активность ^{137}Cs в зерне снижалась в ряду: овес > ячмень > озимая пшеница > яровая пшеница; в соломе: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Удельная активность ^{90}Sr в зерне снижалась в ряду: овес > яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница; в соломе: озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес.

8. Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех видах культур и выращенной продукции полностью удовлетворяли ветеринарным нормам к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, предназначенной на корм животным.

9. Судя по полученным величинам коэффициентов накопления, поглощение ^{137}Cs и ^{90}Sr всеми растениями укладывалось в нормативные пределы, характерные для наземной фитомассы.

10. Зерно всех злаков меньше накапливало как ^{137}Cs , так и ^{90}Sr , по сравнению с соломой этих культур.

11. Между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях отмечена в основном корреляция прямой зависимости средней силы взаимосвязи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические величины: Справк / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
2. Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y. Assessment of environmental ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // J. Environ. Radioact. 2013. V. 124. P. 130–140.
3. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищ-во научн. изданий КМК, 2006. 509 с.
4. Уткин А.А. Оценка радиационной обстановки на реперных участках сельскохозяйственных угодий Владимирской области // Радиационная биология. Радиэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 660–672. <https://doi.org/10.31857/S0869803122060133>
5. Уткин А.А. Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах и растениях реперных участков Владимирской области // Радиационная биология. Радиэкология. 2023. Т. 63. № 2. С. 194–205. <https://doi.org/10.31857/S0869803123020121>
6. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
7. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992.
8. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформтех, 2003. 240 с.
9. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. Содержание радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120036>
10. Почвоведение. Уч-к для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование. М.: Высш. шк., 1988. 400 с.
11. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. Махонько К.П. Госкомгидромет СССР. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991.
12. Орлов П.М., Сычев В.Г., Жиленко С.В. Радиоактивность почв юга России // Нива Поволжья. 2017. № 1(42). С. 53–60.
13. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
14. Архипов Н.П., Федоров Е.А., Алексахин Р.М. Почвенная химия и корневое накопление искусственных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений // Почвоведение. 1975. № 11. С. 40–52.
15. Schneider R., Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I. Soil-to-plant and soil-to-grain transfer of ^{137}Cs in fieldgrown maize hybrids during two contrasting seasons: assessing the phenotypic variability and its genetic component // Radiat. Environ. Biophys. 2008. V. 47. P. 241–252.
16. Кожуханов Т.Е., Лукашенко С.Н. Содержание радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в продукции растениеводства на территориях, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону // Радиационная биология. Радиэкология. 2017. Т. 57. № 2. С. 220–225.
17. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs . Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 (утв. Минсельхозом РФ 19.12.2000).
18. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Особенности миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва–растение // Вестн. ОГУ. 2005. № 12. С. 42–46.
19. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В. Современное состояние исследований поведения ^{90}Sr в системе почва–сельскохозяйственные растения (обзор) // Радиационная биология. Радиэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 643–665.
20. Андреева Н.В., Белова Н.В., Кузнецов В.К. Влияние различных видов органических удобрений на переход ^{137}Cs в урожай зерновых культур // Радиационная биология. Радиэкология. 2020. Т. 60. № 1. С. 117–125.

Monitoring of ^{37}C , ^{90}Sr and ^{40}K in Sod-Podzolic Soils and Plants of Reference Sites of the Ivanovo Region

A. A. Utkin^{a,#}, N. I. Akanova^b, and I. B. Noda^c

^a D.K. Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy
ul. Sovetskaya 45, Ivanovo 153012, Russia

^b D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

^c Agrochemical Service Station "Ivanovskaya"
ul. Centralnaya, 8, Ivanovo region, Bogorodskoe 153506, Russia

#E-mail: aleut@inbox.ru

The results of radiation monitoring of sod-podzolic soils of reference agricultural plots of the Ivanovo region, conducted in 2014 and 2021, are presented. Background values of the specific activities of the studied radionuclides in the soils of reference sites have been established. According to the pollution density of the arable horizon of soils ^{137}Cs and ^{90}Sr , the level of the ecological situation was determined, which made it possible to attribute the soils of all reference areas of the region to uncontaminated territories suitable without restrictions for agricultural use. The power of the exposure dose of gamma radiation of soils and the contribution of ^{40}K and ^{137}Cs to the formation of the gamma background of soils were determined. Correlation analysis determined the influence of individual physical and chemical properties of soils on the behavior and distribution of radionuclides in the soil and the relationship between the content of the radionuclides themselves. Based on the values of the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in plant products grown in 2014 and 2021, rows of cultivated plants with a decreasing ability to accumulate these radionuclides from the soil were constructed. All grown plant products of all types of crops fully met the veterinary standards required to limit the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in plant feeds (green mass, straw and feed grain). The coefficients of accumulation and transition of ^{137}Cs and ^{90}Sr from soil to plants are calculated. The coefficients of linear correlation between the values of the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils and plants revealed the strength and nature of these dependencies.

Keywords: radiation monitoring, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , sod-podzolic soil, plants, reference sites, Ivanovo region.