

УДК 632.122.1:632.118.3:631.445.25

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОФИЛЕ СВЕТЛО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ И РАСТЕНИЯХ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2024 г. А. А. Уткин^{1,*}, И. Б. Нода²¹Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы
117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, Россия²Станция агрохимической службы “Ивановская”
153506 с. Богородское, Ивановская обл., ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Представлены результаты многолетнего радиационного мониторинга светло-серой лесной почвы и культурных растений реперного участка. Корреляционным анализом определены взаимосвязи между распределением искусственных и естественных радионуклидов в профиле почвы с ее агрохимическими свойствами. Распределение радионуклидов в профиле почвы обусловлено интенсивностью подзолистого процесса. В профиле отмечена элювиально-иллювиальная дифференциация радионуклидов, когда в иллювиальном горизонте происходило увеличение их аккумуляции. По плотности загрязнения пахотного слоя почвы цезием-137 и стронцием-90 был определен удовлетворительный уровень экологической обстановки, по которому почва участка относится к незагрязненной. Построены ряды культурных растений с возрастающей способностью к накоплению цезия-137 и стронция-90 из почвы. Зерно всех зерновых культур меньше накапливало цезия-137 и стронция-90 по сравнению с соломой. Вся выращенная растительная продукция все видов культур полностью удовлетворяла ветеринарным и гигиеническим нормативам по содержанию цезия-137 и стронция-90 в кормах (зеленая масса, солома и фуражное зерно) и продовольственном зерне. Рассчитаны коэффициенты накопления и перехода цезия-137 и стронция-90 из почвы в растения.

Ключевые слова: светло-серая лесная почва, искусственные (техногенные) радионуклиды, естественные (природные) радионуклиды, культурные растения, радиационный мониторинг.

DOI: 10.31857/S0002188124070094, EDN: CFJKZO

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в России и в мире проблема загрязнения почв и культурных растений агроценозов радионуклидами (*РН*) продолжает оставаться весьма острой и актуальной.

В результате проведения испытаний ядерного оружия, аварий на атомных объектах (ПО “Маяк”, проект “Глобус-1”, Чернобыльская АЭС, АЭС “Фукусима-1” и др.) и интенсивного развития ядерной энергетики в биосферу поступили значительные количества обладающих высокой биодоступностью, преимущественно долгоживущих искусственных (техногенных) радионуклидов (*ИРН*), таких как цезий-137 (¹³⁷Cs) ($T_{1/2} = 30.17$ лет) и стронций-90 (⁹⁰Sr) ($T_{1/2} = 28.79$ лет) [1, 2].

Поступающие в почвы ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr способны накапливаться в растительной продукции, ухудшая ее качество, организме сельскохозяйственных

животных и человека, вызывая мутации и онкологические заболевания [3].

Кроме *ИРН* в почвах содержатся естественные (природные) радионуклиды (*ЕРН*), во многом определяющие природный радиационный фон почв [4]. К основным *ЕРН* относятся: калий-40 (⁴⁰K) ($T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$ лет), радий-226 (²²⁶Ra) ($T_{1/2} = 1.62 \times 10^3$ лет) и торий-232 (²³²Th) ($T_{1/2} = 1.40 \times 10^{10}$ лет) [5].

В результате неконтролируемого применения минеральных удобрений и агроメリорантов (природных калийных солей, фосфоритной муки, гипса, фосфогипса, аммофоса, отходов промышленности и др.), содержащих *ЕРН*, может происходить радиоактивное загрязнение почв [6].

В Ивановской обл., как в развивающемся аграрном регионе России, в пахотном фонде почв региона в основном преобладают дерново-подзолистые почвы (92%), однако не малый

интерес в этой связи представляют и более плодородные светло-серые лесные почвы, доля которых составляет 7.6% или 24 тыс. га [7]. Контроль за содержанием и поведением в почвах и растениях *РН* является важной агроэкологической задачей современного земледелия.

Цель работы заключалась в проведении локального радиационного мониторинга светло-серых лесных почв Ивановской обл. по установлению уровней содержания и особенностей распределения по профилю светло-серой лесной почвы радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th , определении влияния отдельных агрохимических свойств почвы на поведение изученных *РН* в системе почва–культурное растение, особенностях накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr различными сельскохозяйственными культурами, возможности получения безопасной растительной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим и ветеринарным нормативам.

Оценку радиационной ситуации по содержанию и распределению ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в светло-серых лесных почвах и культурных растениях агроценозов Ивановской обл., проводили впервые. Полученные данные, в научной литературе ранее не публиковались, что повышает ценность проведенного исследования.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование агрохимических показателей и содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{226}Ra и ^{232}Th в профиле светло-серой лесной почвы реперного участка проводили в 2008, 2013 и 2018 гг. Почвенные образцы отбирали из слоев 0–20, 20–40, 40–60, 60–80 и 80–100 см почвы. Масса индивидуального почвенного образца составляла ≈ 0.5 кг из каждого горизонта.

Определение удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном горизонте (0–20 см) исследованной почвы и их накопление культурами проводили ежегодно в период 2009–2022 гг.

Исследование осуществляли в соответствии с ежегодным локальным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на реперном участке, расположенном в Гаврилово-Посадском р-не. Почва реперного участка в течение проведения мониторинга находилась в обработке. Площадь участка составляла 25 га.

С реперного участка с 2009 по 2022 г. с помощью тростевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы из пахотного слоя. Один смешанный образец, массой ≈ 0.5 кг составляли из 30–35 точечных проб и в среднем с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Смешанную пробу растений массой ≈ 0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10 точечных проб. Пробы почв и растений отбирали с одних и тех же локаций участка.

Определяли следующие показатели почвы: обменную кислотность ($\text{pH}_{\text{КСЛ}}$) – по ГОСТ Р 58594–2019, содержание органического вещества ($\text{C}_{\text{орг}}$) – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО по ГОСТ 26213–91, подвижных фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) – по ГОСТ Р 54650–2011 (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО), обменных оснований кальция и магния (Ca и Mg) – по ГОСТ 26487–85, фракций физической глины (<0.01 мм) и ила (<0.001 мм) – по Качинскому [8].

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

Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растительных образцах определяли согласно методическим рекомендациям [9], ^{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 при температуре 450°C (концентрировали более чем в 10 раз), после чего золу помещали в чашки Петри (^{137}Cs) и измерительные кюветы (^{90}Sr).

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

Для оценки перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения рассчитывали коэффициент накопления ($\text{K}_\text{Н}$), равный отношению удельной активности *ИРН* в растениях (Бк/кг сухой массы) к его активности в почве (Бк/кг сухой почвы).

Коэффициент перехода ($\text{K}_\text{П}$) определяли как отношение удельной активности *ИРН* в растениях (Бк/кг) к плотности загрязнения ими пахотного слоя почвы на единицу площади (кБк/м²).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения признака с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием программы “Statistica” (10 версия). Оценку уровня корреляции проводили по шкале Чеддока.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Агрохимическая характеристика профиля светло-серой лесной почвы представлена в табл. 1.

Обследование почвы реперного участка в 2008, 2013 и 2018 гг. с последующим усреднением показателей выявило, что вниз по профилю отмечено увеличение кислотности на 1.1 ед. pH_{KCl} , снижение содержания $C_{орг}$ на 1.8%, содержания подвижных P_2O_5 и K_2O на 146 и 223 мг/кг почвы соответственно, обменного Mg – на 1.1 смоль(экв)/100 г и глинистой фракции частиц (<0.01 мм) на 0.7%, при этом содержание обменного Ca и илистой фракции частиц (<0.001 мм) с глубиной увеличилось на 4.8 смоль (экв)/100 г и 13.7% соответственно.

Варьирование всех исследованных агрохимических показателей почвы подчинялось закону нормального распределения. Величина критерия Шапиро–Уилка удовлетворяла следующему условию: $p > 0.05$.

Об участии компонентов твердой фазы почв в процессах закрепления PH можно судить по их присутствию в профиле [10].

Результаты определения удельной активности изученных PH в профиле почвы позволили дать

детальную характеристику радиационной обстановки на исследованной территории, установить влияние отдельных компонентов и свойств почвы на механизмы закрепления или миграции PH в почвах.

Зная влияние свойств почвы на поведение PH , можно управлять механизмами поступления их в растения, принимать меры по снижению их накопления в растительной продукции и поступлению с кормом и пищей в организмы животных и человека.

Сорбция PH отдельными компонентами и соединениями почвы препятствует их передвижению по профилю, проникновению в грунтовые воды и их загрязнению. PH в основном содержатся в верхнем, наиболее богатом органическим веществом и тонкодисперсными минералами слое почвы [8, 10]. Чем полнее и сильнее PH поглощаются почвенно-поглощающим комплексом (ППК), тем меньше они будут вымываться осадками, передвигаться по профилю почвы и в меньших количествах будут аккумулироваться в растениях.

Удельные активности и особенности распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K по профилю светло-серой лесной почвы участка отражены в табл. 2.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика профиля светло-серой лесной почвы

Горизонт	Глубина отбора, см	Фракция, %		$C_{орг}$, %	pH_{KCl}	P_2O_5	K_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}
		< 0.01 мм	< 0.001 мм						
Апах	0–20	17.2	14.5	2,3	5.8	255	303	8.1	2.7
Апах/А2В	20–40	18.9	9.4	1,4	5.8	172	146	7.4	2.0
А2В/В	40–60	18.3	17.1	0.8	5.4	163	80	10.9	2.9
В	60–80	16.5	28.2	0,6	5.5	197	109	9.1	3.0
В	80–100	16.5	28.2	0,5	4.7	109	80	12.9	1.6
$M \pm m^*$		17.5 ± 0.5	19.5 ± 3.8	1.1 ± 0.3	5.4 ± 0.2	179 ± 24	144 ± 42	9.7 ± 1.0	2.4 ± 0.3
V^{**}		6.2	43.3	66.6	8.3	30	65	23.0	25.0
Lim ***		16.5–18.9	9.4–28.2	0.5–2.3	4.7–5.8	109–255	80–303	7.4–12.9	1.6–3.0

* $M \pm m$ – среднее арифметическое и его ошибка (то же в табл. 2); ** V – коэффициент вариации (то же в табл. 2); *** Lim – пределы величин (то же в табл. 2).

Таблица 2. Удельная активность PH в профиле светло-серой лесной почвы, Бк/кг

Глубина отбора, см	^{137}Cs	^{90}Sr	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
0–20	5.8	6.6	14.1	28.7	472
20–40	5.4	7.0	14.7	31.4	457
40–60	4.1	7.7	15.9	25.6	417
60–80	8.5	5.7	6.4	32.5	476
80–100	4.2	5.2	16.3	25.6	399
* $M \pm m$	5.6 ± 0.8	6.4 ± 0.4	13.5 ± 1.8	28.8 ± 1.4	444 ± 15
** V	31.8	15.6	30.1	11.1	8
***Lim	4.1–8.5	5.2–7.7	6.4–16.3	25.6–32.5	399–476

Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в верхнем пахотном (0–20 см) слое профиля почвы реперного участка не превышали предельных показателей фона глобальных выпадений: 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [11].

Удельные активности EPH в почвах Мира варьируют в широких диапазонах. Например, по данным Тихомирова, удельные активности ^{232}Th и ^{40}K в серых лесных почвах России в среднем составляют 32 и 450 Бк/кг почвы, что вполне согласуется с удельными активностями данных EPH в верхнем слое исследованной почвы.

В качестве среднемировой принята величина удельной активности для ^{226}Ra равная 30 Бк/кг. Удельные активности ^{226}Ra , отмеченные в верхнем слое светло-серой лесной почвы Ивановской обл., были в 2.1 раза меньше среднемирового показателя [12].

Варьирование показателей удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th и ^{40}K в почвенном профиле (0–100 см), за исключением ^{226}Ra , подчинялось закону нормального распределения.

Установлено, что изменения показателей удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K с увеличением глубины отбора проб по профилю характеризовались снижающимися трендами. Принимая во внимание угол наклона тренда и значение коэффициента регрессии в уравнении линейной регрессии, наиболее сильное снижение удельной активности вниз по профилю отмечали для ^{40}K , наименее сильное – для ^{137}Cs .

Для определения характера и степени влияния отдельных агрохимических свойств почвы на содержание и распределение PH в профиле изученной почвы, а также установления взаимосвязей между самими PH проводили расчет коэффициентов корреляции, величины которых приведены в табл. 3.

Кислотность почвенного раствора, содержание органического вещества, состав поглощенных катионов и величина емкости катионного обмена, гранулометрический и минералогический составы почвы в значительной степени влияют на поведение PH в почве [10, 13–15].

Наиболее тесная корреляционная взаимосвязь между изменением содержания органического вещества по профилю светло-серой лесной почвы и удельной активностью изученных PH отмечена по отношению к ^{40}K , наименее тесная – к ^{137}Cs и ^{226}Ra (табл. 3).

Выявленные взаимосвязи показали, что органическое вещество в недостаточной степени способствовало удержанию всех изученных PH в профиле светло-серой лесной почвы. Таким образом, создаются условия и опасность миграции изученных PH вниз по профилю почвы.

Судя по величинам коэффициентов корреляции снижение обменной кислотности заметно влияло на закрепление ^{90}Sr , ^{232}Th и, особенно, ^{40}K по профилю почвы, по отношению к ^{226}Ra отмечена обратная зависимость.

С повышением содержания в почве илестых (тонкодисперсных) частиц увеличивается в почве содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr [14, 16]. В нашем исследовании, судя по рассчитанным коэффициентам линейной корреляции, заметное влияние на адсорбцию оказывала только фракция физической глины (<0.01 мм) по отношению к ^{90}Sr , при этом более тонкодисперсные илестые частицы не принимали участия в поглощении этого PH . В целом гранулометрический состав почвенных коллоидов не оказывал существенного влияния на сорбцию и распределение ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в профиле светло-серой лесной почвы. Предположительно, это могло быть связано с тем, что исследованная почва участка содержала недостаточное

Таблица 3. Коэффициенты корреляции между свойствами светло-серой лесной почвы и удельными активностями PH

Свойства почвы	Фракция, %		$C_{\text{орг}}$, %	pH_{KCl} , ед.	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	^{137}Cs	^{90}Sr	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
	<0.01 мм	<0.001 мм											
PH					мг/кг почвы		смоль(экв)/100 г почвы						
^{137}Cs	-0.39	0.29	0.01	0.40	0.50	0.17	-0.50	0.52	–	-0.33	-0.90	0.85	0.81
^{90}Sr	0.86	-0.79	0.37	0.60	0.29	0.14	-0.40	0.41	-0.33	–	0.00	-0.11	0.07
^{226}Ra	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>-0.40</i>	<i>-0.67</i>	-0.90	<i>-0.67</i>	<i>0.60</i>	<i>-0.70</i>	-0.90	<i>0.00</i>	–	<i>-0.87</i>	<i>-1.00</i>
^{232}Th	0.04	-0.13	0.18	0.63	0.46	0.23	-0.78	0.27	0.85	-0.11	<i>-0.87</i>	–	0.86
^{40}K	0.01	-0.28	0.55	0.82	0.85	0.62	-0.88	0.53	0.81	0.07	<i>-1.00</i>	0.86	–

Примечание. Обычным начертанием выделены коэффициенты линейной корреляции Пирсона, курсивом – ранговой корреляции Спирмена (то же в табл. 4). Полужирным выделены значимые коэффициенты корреляции при $p < 0.05$ (то же в табл. 4).

количество тонкодисперсных частиц и имела супесчаный состав.

Влияние содержания обменных Са и Mg неоднозначно сказывалось на распределении изученных *РН*. Кальций проявлял высокую конкуренцию за места сорбции на поверхности ППК ко всем *РН*, за исключением ^{226}Ra , особенно к ^{40}K , о чем свидетельствовала существенная ($p < 0.05$) высокая корреляция (табл. 3). Распределение обменного Mg по профилю было связано с распределением *РН*, за исключением ^{226}Ra , с которым Mg, вероятно, вступал в конкуренцию.

Установлено, что подвижный P_2O_5 почвы способен принимать участие в закреплении микроколичеств ^{90}Sr путем соосаждения на поверхности фосфатов [14]. В проведенном исследовании отмечено, что между концентрацией подвижного P_2O_5 и удельными активностями изученных *РН*, за исключением ^{226}Ra , установлены положительные корреляционные взаимосвязи (табл. 3).

Калий и ^{137}Cs являются химическими элементами-аналогами, проявляющими взаимные антагонистические свойства. Проведенный нами корреляционный анализ не показал, что между этими элементами имеется какая-либо конкуренция за места сорбции на поверхности ППК. Кроме того, подвижный K_2O не оказывал заметного влияния на распределение по почвенному профилю ^{90}Sr и ^{232}Th . Между содержанием подвижного K_2O и удельной активностью ^{40}K по профилю отмечена заметной силы положительная корреляция: $r = 0.62$.

Установленные положительные корреляции между удельными активностями отдельных *РН* (табл. 3) позволили предположить у них схожие механизмы поглощения различными центрами сорбции светло-серой лесной почвы. Подтверждение полученным нами величинам коэффициентов корреляции между удельными активностями ^{40}K и ^{232}Th можно найти в работе [17].

Распределение ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th , ^{226}Ra и ^{40}K в профиле светло-серой лесной почвы во многом связано с интенсивностью подзолистого процесса, при этом в почвенном профиле проявляется элювиально-иллювиальная дифференциация *РН*. Иллювиальная толща (60–100 см) горизонта В характеризуется значительной уплотненностью и более тяжелым гранулометрическим составом, за счет увеличения в 2 раза содержания илестых частиц по сравнению с их содержанием в Апах и, таким образом, является геохимическим барьером, в котором происходит аккумуляция всех изученных *РН*.

Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя светло-серой лесной почвы за период 2009–2022 гг. проведения мониторинга составляла

$M \pm m = 0.045 \pm 0.002$ Ки/км² (lim = 0.034–0.054) и $M \pm m = 0.025 \pm 0.003$ Ки/км² (lim = 0.015–0.051) соответственно, что существенно меньше уровней, соответствующих относительно удовлетворительной экологической обстановке – 1.0 и 0.1 Ки/км² соответственно, и позволяет отнести исследованную почву участка к незагрязненной территории.

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

Многочисленными исследованиями, в т.ч. проведенными на серых лесных почвах, установлено, что в генеративных органах (зерно) культурных растений ^{137}Cs и ^{90}Sr накапливаются значительно меньше, чем в надземных вегетативных органах (соломе, листьях) [18–23].

Настоящим исследованием установлено, что для всех зерновых культур была отмечена общая закономерность, когда в их основной продукции (зерне) содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr было меньше, чем в побочной (соломе), что может указывать на наличие у культур защитных механизмов, которые препятствуют излишнему проникновению *ИРН* в зерно.

Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в основной продукции зерновых культур возрастали в ряду: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес, ^{137}Cs в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес, ^{90}Sr в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

Удельная активность ^{137}Cs в зеленой массе однолетних трав (вике, овсе) была больше в 4.8 раза, чем ^{90}Sr .

Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr во всех видах культур полностью удовлетворяли санитарно-гигиеническим требованиям к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовых сеяных травах (зеленой массе) на уровне ≤ 100 и 50 Бк/кг, грубых кормах (солома) – ≤ 400 и 180 Бк/кг, фуражном и продовольственном зерне – ≤ 200 и 140 и 70 и 40 Бк/кг соответственно [24–25].

Расчет $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr в сельскохозяйственные культуры из почвы показал, что средние величины $K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$ были больше средних показателей $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$, т.е. процесс перехода ^{90}Sr из обоих типов почв в растения всех видов был интенсивным, чем переход ^{137}Cs .

При сравнении величин $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ и ^{90}Sr для одних и тех же видов культур выяснили, что ^{137}Cs в основном хуже переходил в основную и побочную продукцию по сравнению со ^{90}Sr , что подтверждено данными других исследований, проведенных на серых лесных почвах [20, 21].

Таблица 4. Коэффициенты перехода и удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции культур, Бк/кг

Культура (вид продукции)	^{137}Cs	^{90}Sr	$K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$	$K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$
Яровая пшеница (зерно/ солома)	$1.9 \pm 0.5/2.9 \pm 0.6$	$1.4 \pm 0.4/3.6 \pm 0.7$	$1.0 \pm 0.1/1.5 \pm 0.2$	$0.7 \pm 0.1/1.9 \pm 0.2$
Ячмень (зерно/солома)	$1.5 \pm 0.7/3.0 \pm 0.7$	$1.1 \pm 0.4/2.0 \pm 0.6$	$0.9 \pm 0.4/1.6 \pm 0.4$	$1.7 \pm 0.6/3.0 \pm 1.0$
Овес (зерно/солома)	$3.1 \pm 0.5/3.6 \pm 0.7$	$2.0 \pm 0.4/3.2 \pm 0.8$	$2.0 \pm 0.3/2.3 \pm 0.3$	$1.9 \pm 0.2/3.0 \pm 0.6$
Озимая пшеница (зерно/ солома)	$1.4 \pm 0.3/2.3 \pm 0.3$	$0.9 \pm 0.2/1.8 \pm 0.3$	$0.8 \pm 0.2/1.4 \pm 0.2$	$1.0 \pm 0.1/2.0 \pm 0.3$
Кукуруза (зерно/стебли)	$1.2 \pm 0.3/1.4 \pm 0.4$	$0.6 \pm 0.2/0.7 \pm 0.2$	$0.7 \pm 0.1/0.9 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.1/1.3 \pm 0.2$
Однолетние травы (зеленая масса)	2.9 ± 0.4	0.6 ± 0.1	2.0 ± 0.3	0.6 ± 0.1
$\Gamma_{\text{ИРН почва/ИРН растение}}$				
Яровая пшеница (зерно/ солома)	$-0.42/-0.21$	$-0.47/-0.33$		
Ячмень (зерно/солома)	$-1.00/-0.99$	$-0.95/-0.71$		
Овес (зерно/солома)	$-0.34/0.08$	$-0.38/-0.42$		
Озимая пшеница (зерно/ солома)	$-0.63/-0.64$	$0.80/0.45$		
Кукуруза (зерно/стебли)	$-0.41/-0.25$	$-0.52/-0.16$		
Однолетние травы (зеленая масса)	-0.46	-0.55		
$\Gamma_{\text{ИРН основная продукция/ИРН побочная продукция}}$				
Яровая пшеница	0.79	0.75		
Ячмень	0.99	0.90		
Овес	0.65	0.49		
Озимая пшеница	0.99	0.10		
Кукуруза	0.53	0.76		

Интенсивность перехода ^{137}Cs из почв, как в основную, так и побочную продукцию культур совпадала с рядом увеличения удельной активности. Интенсивность перехода ^{90}Sr в продукцию культур не совпадала с рядом содержания ^{90}Sr в продукции культур. Величины $K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$ для основной продукции возрастали в ряду: яровая пшеница > озимая пшеница > кукуруза > ячмень > овес; $K_{\text{П}}^{90}\text{Sr}$ для побочной продукции: кукуруза > яровая пшеница > озимая пшеница > ячмень > овес.

Сила корреляционной взаимосвязи между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растениях изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур (табл. 4). Преимущественно между рассмотренными показателями отмечена связь обратной зависимости и умеренной силы сопряженности. Отметим, что содержание ^{90}Sr в зерне и соломе озимой пшеницы возрастало с увеличением удельной активности ^{90}Sr в пахотном слое почвы.

Озимые зерновые культуры, как правило, накапливают в 2.0–2.5 раза меньше ^{137}Cs и ^{90}Sr , чем яровые зерновые [14]. Частичное подтверждение этому факту получено в нашем исследовании,

когда зерно озимой пшеницы в среднем меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr в 1.4 и 1.5 раза, чем зерно яровых зерновых (ячменя, овса и пшеницы), а солома — в 1.3 и 1.45 раза меньше соответственно (табл. 4).

Установленные для сельскохозяйственных культур на обследованном реперном участке величины $K_{\text{Н}}^{137}\text{Cs}$ и $K_{\text{Н}}^{90}\text{Sr}$ укладывались в пределы 0.18–0.55 и 0.14–0.7 соответственно, что аналогично показателям $K_{\text{Н}}^{137}\text{Cs}$ 0.02–1.1 и $K_{\text{Н}}^{90}\text{Sr}$ 0.02–12 для незагрязненных почв, приведенным в работе [26].

Накопление ^{90}Sr основной и побочной продукцией большинства зерновых культур происходило в 1.35–2.09 и 1.27–1.75 раза более интенсивно соответственно, чем ^{137}Cs , о чем свидетельствовали полученные показатели $K_{\text{Н}}$ и, наоборот, для зеленой массы однолетних трав величина $K_{\text{Н}}^{137}\text{Cs}$ была в 3.43 раза больше, чем $K_{\text{Н}}^{90}\text{Sr}$ (рис. 1).

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона показал, что между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне и соломе зерновых культур отмечена линейная положительная корреляция в основном высокой и очень высокой силы сопряженности.

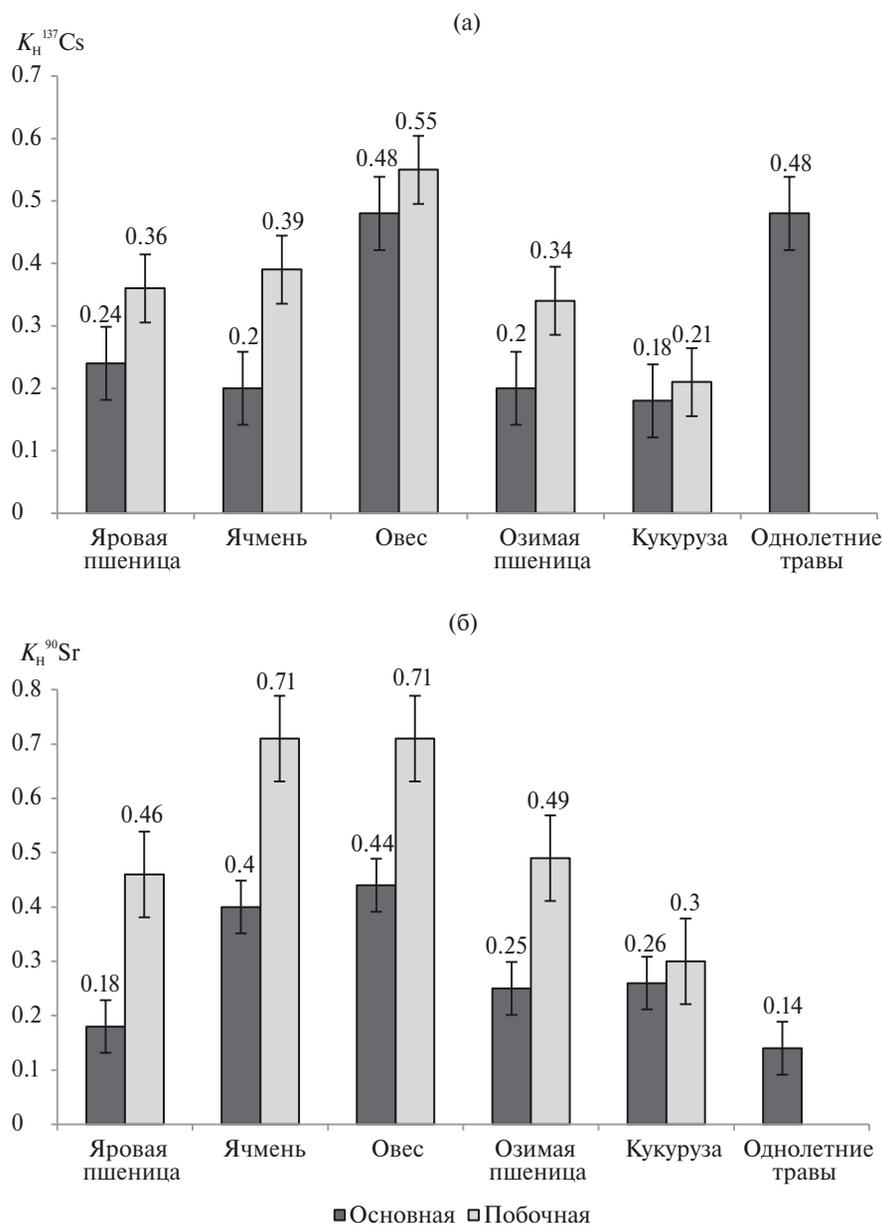


Рис. 1. Коэффициенты накопления ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) продукцией культур.

ВЫВОДЫ

1. Величины удельных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном слое почвы реперного участка не превышали предельных показателей фона глобальных выпадений. Удельные активности ^{232}Th и ^{40}K соответствовали типичным показателям, характерным для типа исследованной почвы. Удельная активность ^{226}Ra была в 2.1 раза меньше среднемировой.

2. Изменения величин удельных активностей ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в профиле почвы характеризовались снижающимися трендами. Наиболее сильное

снижение содержания отмечено для ^{40}K , наименее сильное – для ^{137}Cs .

3. Корреляционный анализ не выявил сопряженности между содержанием $C_{\text{орг}}$ и удельными активностями радионуклидов (PH) в профиле почвы, за исключением ^{40}K . Снижение обменной кислотности заметно влияло на закрепление ^{90}Sr , ^{232}Th и особенно ^{40}K по всей глубине исследованного профиля почвы. Тонкодисперсные илистые и глинистые частицы почвы не оказывали существенного влияния на сорбцию ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K . Между содержанием глинистых частиц и удельной активностью ^{90}Sr отмечена достоверная положительная корреляция.

Обменный Са проявлял высокую конкуренцию за места сорбции на поверхности ППК ко всем *РН*, за исключением ^{226}Ra , особенно к ^{40}K . Распределение обменного Mg по профилю было связано с распределением *РН*, кроме ^{226}Ra , с которым Mg мог вступать в конкуренцию на границе раздела твердой и жидкой фаз почвы.

Между подвижными P_2O_5 и K_2O и удельными активностями ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{232}Th и особенно ^{40}K установлены положительные корреляции различной силы взаимосвязи.

4. Высокие положительные корреляционные сопряженности между удельными активностями и распределением по профилю ^{137}Cs и ^{232}Th , ^{137}Cs и ^{40}K , ^{232}Th и ^{40}K позволили предположить у них схожие механизмы поглощения различными центрами сорбции почвы.

5. Распределение всех изученных *РН* в профиле почвы обусловлено интенсивностью подзолистого процесса. В профиле проявлялась элювиально-иллювиальная дифференциация *РН*, когда в иллювиальном горизонте происходило увеличение аккумуляции изученных *РН* за счет повышения содержания в 2 раза илестых частиц по сравнению с их содержанием в верхнем слое профиля.

6. Плотности загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr пахотного слоя почвы участка были значительно меньше допустимых уровней удовлетворительной экологической обстановки, что позволило отнести почву участка к незагрязненной территории.

7. Зерно всех зерновых культур меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с соломой.

8. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне возростала в ряду: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес, ^{137}Cs в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес, ^{90}Sr в побочной продукции: кукуруза > озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

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

10. K_H ^{137}Cs и ^{90}Sr всеми растениями укладывались в нормативные пределы, характерные для растений, выращенных на незагрязненных почвах.

11. Накопление ^{90}Sr основной и побочной продукцией большинства зерновых культур происходило в 1.35–2.09 и 1.27–1.75 раза более интенсивно, чем ^{137}Cs . Зерно озимой пшеницы в среднем меньше накапливало ^{137}Cs и ^{90}Sr в 1.4 и 1.5 раза, чем зерно

яровых зерновых, солома – в 1.3 и 1.45 раза меньше соответственно.

12. В основном между величинами удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растениях отмечена связь обратной зависимости и умеренной силы сопряженности. Между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне и соломе зерновых культур выявлена линейная положительная корреляция в основном высокой и очень высокой силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А.* Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. М.: ИздАТ, 2001. 752 с.
2. 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.
3. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
4. *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.
5. Физические величины: Спр-ник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
6. *Алексахин Р.М.* Радиоактивное загрязнение почв как тип их деградации // Почвоведение. 2009. № 12. С. 1487–1498.
7. *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.
8. *Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
9. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах: Метод. рекоменд. МР 2.6.1.0094–14. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 43 с.
10. *Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М., Василенко И.Я., Дричко В.Ф., Иванов Ю.А., Маслов В.И., Маслова К.И., Никифоров В.С., Поликарпов Г.Г., Попова О.Н., Сироткин А.Н., Таскаев А.И., Тестов Б.В., Титаева Н.А., Февралева Л.Т.* Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с.
11. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991.

12. Почвоведение. Учеб.-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.
13. Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Тимофеева Н.А., Махонина Г.И., Молчанова И.В., Чеботина М.Я. Поведение радиоактивных изотопов в системе почва–раствор // Радиоактивность и методы ее определения. М.: Наука, 1966. С. 41–81.
14. Юдинцева Е.В. Снижение содержания радиоактивных веществ в продукции растениеводства (рекомендации). М.: Агропромиздат, 1989. 40 с.
15. Рачкова Н.Г., Шуктомова И.И., Таскаев А.И. Состояние в почвах естественных радионуклидов урана, радия и тория (обзор) // Почвоведение. 2010. № 6. С. 698–705.
16. Баранов В.И., Морозова Н.Г. Поведение естественных радионуклидов в почвах // Современные проблемы радиобиологии. М.: Атомиздат, 1971. С. 13–40.
17. 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.
18. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Учеб. пособ. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.
19. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В., Гордиенко Е.В. Современное состояние исследований поведения ^{90}Sr в системе почва–сельскохозяйственные растения (обзор) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 643–665.
20. Уткин А.А. Оценка радиационной обстановки на реперных участках сельскохозяйственных угодий Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 660–672.
<https://doi.org/10.31857/S0869803122060133>
21. Уткин А.А. Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах и растениях реперных участков Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 2. С. 199–210.
<https://doi.org/10.31857/S0869803123020121>
22. Уткин А.А., Аканова Н.И., Нода И.Б. Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в дерново-подзолистых почвах и растениях реперных участков Ивановской области // Агрохимия. 2023. № 7. С. 75–85.
<https://doi.org/10.31857/S0002188123070116>
23. Utkin A.A. Assessment of the radiation situation in reference areas of agricultural lands of the Vladimir oblast // Biol. Bul. 2023. V. 50. № 11. P. 261–272.
<https://doi.org/10.1134/S1062359023110225>
24. 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).
25. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарные правила и нормы. СанПиН 2.3.2.1078–01. М., 2002. 144 с.
26. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. Учеб. пособ. М.: Агроконсалт, 2002. 200 с.

Content and Distribution of Radionuclides in the Profile of Light Gray Forest Soil and Agroecosystem Plants

A. A. Utkin^{a,*}, I. B. Noda^b

^a Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
ul. Miklukho-Maklaya 6, Moscow 117198, Russia

^b Agrochemical service station "Ivanovskaya",
Tsentralnaya ul. 8, Ivanovo region, p. Bogorodskoye 153506, Russia

^{*} E-mail: aleut@inbox.ru

The results of long-term radiation monitoring of light gray forest soil and cultivated plants of the reference area are presented. Correlation analysis has determined the relationship between the distribution of artificial and natural radionuclides in the soil profile with its agrochemical properties. The distribution of radionuclides in the soil profile is determined by the intensity of the podzolic process. The profile shows the eluvial-illuvial differentiation of radionuclides, when an increase in their accumulation occurred in the illuvial horizon. According to the density of contamination of the surface soil layer with cesium-137 and strontium-90, a satisfactory level of the environmental situation was determined, according to which the soil of the site is classified as uncontaminated. Rows of cultivated plants with an increasing ability to accumulate cesium-137 and strontium-90 from the soil have been constructed. The grain of all grain crops accumulated less cesium-137 and strontium-90 compared to straw. All grown plant products of all types of crops fully met veterinary and hygienic standards for the content of cesium-137 and strontium-90 in feed (green mass, straw and feed grain) and food grains. The coefficients of accumulation and transfer of cesium-137 and strontium-90 from soil to plants were calculated.

Keywords: light gray forest soil, artificial (man-made) radionuclides, natural (natural) radionuclides, cultivated plants, radiation monitoring.