

## Изучение содержания $^{137}\text{Cs}$ в почвах в зоне влияния НИФХИ им. Л.Я. Карпова

А.А. Удалова<sup>1,2</sup>, Т.В. Мельникова<sup>1,2</sup>, Я.В. Непогодина<sup>1</sup>, Л.А. Киселева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249020, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ,

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

**Реферат.** В ходе исследовательских работ по изучению состояния природной среды в зоне влияния ядерно- и радиационно опасного предприятия неэнергетического профиля – Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова в г. Обнинске – в период с 2018 по 2023 гг. получен значительный массив радиоэкологических данных. В настоящей работе представлены результаты изучения содержания техногенного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах территории, прилегающей к предприятию. Ежегодный отбор почвенных проб проводился в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения НИФХИ; исследовались точки различных типов: на открытой местности и в лесных насаждениях; антропогенно нарушенные и нетронутые; расположенные у автодорог и в секторе преимущественного распространения выброса. Обнаружено, что удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в почве варьируют от  $2,6 \pm 0,3$  до  $10,6 \pm 0,8$  Бк/кг. Наиболее высокие уровни  $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются в лесном массиве с ненарушенным почвенным покровом; полученные значения соответствуют региональному уровню 10 Бк/кг, сформированному глобальными выпадениями после ядерных испытаний в середине прошлого века. Выявлены прямая корреляционная зависимость между удельной активностью радионуклида и содержанием органического вещества в почвах и обратная зависимость между уровнями  $^{137}\text{Cs}$  и актуальной кислотностью почвенного раствора. Показано, что антропогенная деятельность, связанная со строительными и дорожными работами, оказывает значительное влияние как на физико-химические свойства почвенного покрова, так и на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве. Влияние деятельности НИФХИ на содержание техногенного долгоживущего радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения предприятия не выявлено.

**Ключевые слова:**  $^{137}\text{Cs}$ , почва, радиоактивное загрязнение окружающей среды, исследовательский реактор, производство радиоизотопов.

**Для цитирования:** Удалова А.А., Мельникова Т.В., Непогодина Я.В., Киселева Л.А. Изучение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в зоне влияния НИФХИ им. Л.Я. Карпова. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:128–140. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.09>

## Введение

Широкое внедрение ядерных технологий для решения задач в энергетике, приборостроении, производстве инновационных материалов, медицине, радиофармацевтической промышленности и в других отраслях во многом сдерживается высокой степенью озабоченности безопасностью функционирования ядерно- и радиационно опасных объектов (ЯРОО) как для человека, так и для окружающей среды. Вопросы радиационной безопасности ЯРОО были достаточно глубоко изучены для классического объекта атомной энергетики – атомных электрических станций [1]. В то же время, сегодня существует большое количество разнообразных ЯРОО, реализующих отличные от АЭС производственные и технологические процессы: исследовательские ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, радиофармацевтические производства, облучательские центры. Спектр и уровни воздействия на окружающую среду, экологические аспекты и задачи экологического менеджмента соответствующих предприятий существенно отличаются от АЭС. Исследований, демонстрирующих безопасность такого рода деятельности для окружающей среды, очень немного.

Классическим представителем объектов атомной науки и технологий неэнергетического профиля является АО «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова» (НИФХИ), расположенный в г. Обнинске. Предприятие было создано в 1959 г. и функционирует более 60-ти лет. В настоящее время площадка НИФХИ представляет собой многоцелевой экспериментально-производственный комплекс, включающий в себя исследовательский ядерный реактор ВВР-ц, ускорители электронов и радиоизотопные источники ионизирующих излучений, широкий спектр исследовательских и производственных установок. НИФХИ производит радиоизотопы медицинского назначения, радиофармпрепараты на основе радионуклидов  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{59}\text{Fe}$ ,  $^{14}\text{C}$ , а также радиационно-модифицированные инновационные материалы с улучшенными характеристиками. НИФХИ является ведущим российским производителем  $^{99\text{m}}\text{Tc}$  для ядерной медицины.

Изучение состояния окружающей среды вблизи такого исторического ЯРОО представляет особый интерес, так как за более чем полувековую историю предприятие реализовывало различные научно-производственные задачи в изменяющихся социально-политических условиях, в том числе при эволюционирующих нормативных требованиях экологической и радиационно-гигиенической безопасности. Предприятием проводится производственный экологический контроль и мониторинг воздействия НИФХИ на окружающую среду, результаты которого свидетельствуют о том, что влияние предприятия следует оценивать как незначительное [2].

С 2018 г. коллективом исследователей ИАТЭ НИЯУ МИФИ проводятся исследовательские работы по изучению состояния природной среды в зоне влияния НИФХИ. К настоящему времени получен значительный массив данных о физико-химических характеристиках почв, донных отложений, поверхностных вод, о содержании естественных радионуклидов,  $^{137}\text{Cs}$ , тяжелых металлов в компонентах наземных и водных экосистем. Полученные данные позволяют провести независимую оценку безопасности многолетнего функционирования ЯРОО неэнергетического профиля.

В работе представлены результаты изучения содержания техногенного  $^{137}\text{Cs}$  в почвах территории, прилегающей к НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

## Материалы и методы

В период с 2018 по 2023 гг. проводился ежегодный отбор почвенных проб в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне наблюдения (ЗН) НИФХИ. При выборе мест пробоотбора (рис. 1) учитывались ландшафтные особенности территории и роза ветров. Преимущественное направление ветра в данной местности – с запада и юго-запада [3], поэтому значительное число мест отбора почвы (точки 2.5–2.12) расположено с восточной стороны от НИФХИ, «под факелом». При этом точки 1.6, 1.10, 2.6, 2.7, 2.7а, 2.8, 2.10а находятся на открытой местности с луговой растительностью; почвы по большей части являются антропогенно нарушенными. Остальные места пробоотбора расположены в лесных насаждениях: точки 1.1, 1.7–1.9 – рядом с федеральной автотрассой; точки 2.1–2.4 – в лесопосадках рядом с северо-западным углом предприятия; точки 2.5, 2.9–2.12 – по краю и в глубине леса с подветренной стороны от НИФХИ. В соответствии с территориальным расположением и ландшафтными особенностями места пробоотбора объединены в четыре кластера (см. рис. 1): 1 – антропогенно нарушенные, 2 – лес, у автотрассы, 3 – лес, северо-запад, 4 – лес, восток.



Рис. 1. Расположение точек отбора проб почвы в СЗЗ и ЗН НИФХИ

Также в октябре 2018 г. три пробы почвы (К1, К2, К3) были отобраны в Национальном парке «Угра» (д. Суковка, рядом с г. Юхнов; около 70 км к югу от НИФХИ); они изначально рассматривались как референтные (фоновые) по уровню общего техногенного воздействия.

На каждой пробоотборной площадке пробы почвы отбирали методом конверта в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 (пять точечных проб по углам и в центре квадрата со стороной 10 м массой 1–2 кг с глубины до 20 см, из которых на месте готовили смешанную пробу массой 3–4 кг). В точках 1.9 и 2.4 из-за особенностей рельефа были взяты точечные пробы. Образцы упаковывали в двойные полиэтиленовые пакеты, прилагали к ним этикетки.

Пробы почвы доставляли в лабораторию в день отбора, рассыпали на бумаге и разминали крупные комки, выбирали включения. После доведения до воздушно-сухого состояния образцы растирали в ступке пестиком и просеивали через сито с диаметром отверстий не более 2 мм.

Одновременно с отбором проб почвы проводили измерение мощности AMBIENTного эквивалента дозы (МАЭД) на высоте 1 м с помощью дозиметра-радиометра серии МКС-15Д «СНЕГИРЬ». Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерений –  $\pm 15\%$ .

Измерение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы проводилось с помощью гамма-спектрометров «Прогресс-Гамма» (НПП «Доза») с сцинтилляционным детектором NaI(Tl) (2018–2022 гг.) и ГАММА-1П с полупроводниковым детектором HPGe (2023 г.). Минимально измеряемая активность по  $^{137}\text{Cs}$  – 3 Бк/кг.

В отобранных пробах почв определяли содержание органического вещества по методике [4, 5] в модификации ЦИНАО и актуальную кислотность (рН) почвенного раствора – потенциометрическим методом [6, 7].

Статистическую обработку результатов измерений проводили стандартными методами с использованием программного пакета MS Excel. Статистические различия между выборками анализировали с помощью критерия Стьюдента.

## Результаты и обсуждение

Согласно ежегодным отчетам НИФХИ по экологической безопасности [2], изотопный состав выбросов радиоактивных веществ в атмосферу в результате штатной деятельности предприятия, в основном, определяется производством радиофарм-препаратов, в котором основным источником выброса радионуклидов в атмосферу является производство радиоизотопа  $^{99}\text{Mo}$  – материнского радионуклида для генераторов  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , широко используемого для медицинских диагностических процедур. В состав атмосферных выбросов НИФХИ входят радиоизотопы йода ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ) и благородных газов ( $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{135\text{m}}\text{Xe}$ ) [8]. Среди них наиболее важным с точки зрения дополнительного облучения населения является изотоп  $^{131}\text{I}$  [9], среднее значение объемной активности которого в зоне наблюдения предприятия в период 2018–2022 гг. не превышало 1,1% от допустимой объемной активности для населения [2]; остальные изотопы являются более короткоживущими и не играют значительной роли в дозообразовании.

Радиационный фон в СЗЗ и ЗН предприятия, согласно результатам производственного мониторинга [2], находится в пределах естественного радиационного фона Калужской области. Величина МАЭД в точках пробоотбора (см. рис. 1) была меньше либо на уровне верхней границы природного радиационного фона [10], за период наблюдений с 2018 по 2023 гг. изменяясь в интервале от 0,09 до 0,16 мкЗв/ч.

Долгоживущие техногенные изотопы в атмосферных выбросах НИФХИ отсутствуют, сброс радиоактивных веществ в гидрографическую сеть прекращен с 2017 г. [2]. Однако по данным радиационного мониторинга НПО «Тайфун» [8] в воздухе г. Обнинска регистрируется  $^{137}\text{Cs}$  и другие долгоживущие радионуклиды. Так в 2021, 2022 и 2023 гг. среднегодовая объемная активность  $^{137}\text{Cs}$  в приземном слое атмосферы составила  $5,1 \cdot 10^{-7}$ ,  $3,3 \cdot 10^{-7}$  и  $3,7 \cdot 10^{-7}$  Бк/м<sup>3</sup> (что на восемь порядков ниже допусти-

мой объемной активности 27 Бк/м<sup>3</sup> [11]). Источниками техногенных радионуклидов в окружающей среде могут быть ЯРОО г. Обнинска. Однако необходимо учитывать, что наибольшее загрязнение территории РФ техногенными радионуклидами произошло в 1954 – 1980 гг., в период испытаний ядерного оружия; отдельные регионы подверглись дополнительному загрязнению в результате радиационных аварий.

Находящиеся в атмосфере загрязняющие и радиоактивные вещества осаждаются на подстилающую поверхность, при этом значительная часть выпадений задерживается в почвенном слое, который является мощным природным сорбентом [12]. Обусловленные глобальными выпадениями средние концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в дерново-подзолистых почвах Центральной России составляют 10,0 Бк/кг [13]. Для Калужской области характерен большой диапазон значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах – от 2,9 Бк/кг на границе с Московской областью до 2400 Бк/кг в южной части Калужской области, пострадавшей от Чернобыльской аварии [14]. Изучение пространственного распределения долгоживущих техногенных загрязнителей (например, долгоживущих искусственных радионуклидов) в почвах позволяет оценить вклад разных источников в загрязнение окружающей среды.

Результаты измерения удельной активности техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в СЗЗ и ЗН НИФХИ за период с 2018 по 2023 гг., а также в пробах из Национального парка «Угра» представлены на рис. 2.

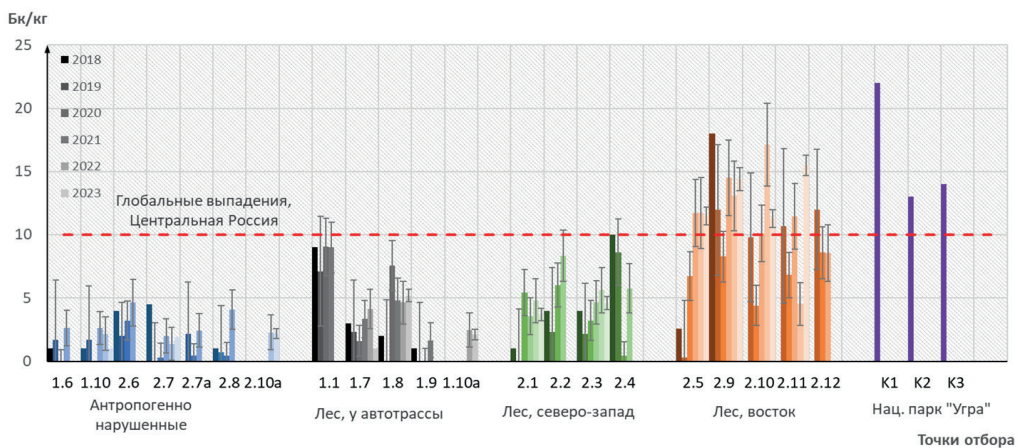


Рис. 2. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в почве в СЗЗ и ЗН НИФХИ в 2018 – 2023 гг.

В первую очередь отметим, что одни из самых высоких уровней удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  (13 – 22 Бк/кг) зарегистрированы в почвах из Национального парка «Угра» (пробы К1, К2, К3). Как известно, радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской аварии подверглись южная и юго-западная части Калужской области, в 15-ти районах которой (включая Юхновский) проводится радиологический мониторинг уровней загрязнения почв по  $^{137}\text{Cs}$ , в семи районах – по  $^{90}\text{Sr}$ , в трех – по  $^{239,240}\text{Pu}$  [15, 16]. В частности, в четырех населенных пунктах Юхновского района осуществляется контроль уровней содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почве [15]. Таким образом, точки К1, К2, К3, которые рассматривались в качестве референтных к территории вблизи НИФХИ по антропогенному фактору, с точки зрения радиационной обстановки фоновыми не являются, поэтому дальнейший пробоотбор на этой территории не проводился. С другой стороны, сравнение получен-

ных результатов (см. рис. 2) показывает, что удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в обследованных точках СЗЗ и ЗН предприятия, много лет осуществляющего ядерно- и радиационно опасную деятельность, не превышают уровни содержания данного радионуклида в почвах Национального парка, относящихся к «чистой» зоне (для д. Суковка, вблизи которой отбирали пробы К1, К2, К3, нет ограничений по радиационному фактору на проживание населения и ведение любой деятельности).

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почвах СЗЗ и ЗН НИФХИ варьировало от 1,0 до  $17,1 \pm 3,3$  Бк/кг (см. рис. 2). Колебания измеренных значений удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в каждой точке отбора в разные годы находятся в пределах статистических погрешностей; достоверное различие выявлено только в точке 2.11 между 2022 и 2023 гг. ( $p < 0,05$ ). Имеет место статистически достоверная корреляция результатов измерений, полученных в разные годы ( $r_{2018-2019} = 0,98$ ;  $r_{2020-2021} = 0,60$ ;  $r_{2021-2022} = 0,77$ ;  $r_{2022-2023} = 0,65$ ,  $p < 0,05$ ), за исключением 2019 и 2020 гг. ( $r_{2019-2020} = -0,03$ ;  $p > 0,05$ ). Известно, что  $^{137}\text{Cs}$  эффективно сорбируется почвенным покровом и имеет низкую подвижность в почвах [12, 17]. Стабильные уровни содержания этого радионуклида на изучаемой территории на протяжении шести лет говорят об отсутствии существенных источников нового поступления  $^{137}\text{Cs}$  в почву в изученный период.

Изучение распределения уровней  $^{137}\text{Cs}$  по выделенным кластерам показало (см. рис. 2, табл. 1), что самые низкие значения удельной активности имеют место в группе точек «1 – антропогенно нарушенные», несмотря на то, что большинство точек этого кластера находится под «факелом» выброса (см. рис. 1). Отметим, что в 43% проб почвы в этом кластере (табл. 1) содержание  $^{137}\text{Cs}$  не было определено, так как находилось ниже предела обнаружения.

Таблица 1

### Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ в почвах в зависимости от территориального расположения и ландшафтных особенностей мест отбора

Кластер	Удельная активность $^{137}\text{Cs}$ в почвах, Бк/кг			А, %
	Min	Max	Среднее по кластеру	
1 – антропогенно нарушенные	< 3	$4,6 \pm 1,8$	$2,6 \pm 0,3^*$	42,9
2 – лес, у автотрассы	< 3	$9,1 \pm 2,3$	$4,6 \pm 0,7^*$	22,7
3 – лес, северо-запад	< 3	$10,0 \pm 0,0$	$5,2 \pm 0,6^*$	20,0
4 – лес, восток	< 3	$18,0 \pm 0,0$	$10,6 \pm 0,8$	4,0

А – доля проб, в которых удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  была ниже предела обнаружения  
\* – достоверные различия с кластером «4 – лес, восток» ( $p < 0,05$ )

Кластеры «2 – лес, у автотрассы» и «3 – лес, северо-запад» демонстрируют схожие результаты (рис. 2, табл. 1) в отношении содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах, что является вполне закономерным, т.к. территориально они расположены рядом. Статистически достоверных различий между средними значениями для этих кластеров не выявлено.

Из рисунка 2 хорошо видно, что практически все значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в кластерах «1 – антропогенно нарушенные», «2 – лес, у автотрассы», «3 – лес, северо-запад» лежат ниже 10 Бк/кг – характерного уровня глобальных выпадений [13]. По всей видимости, низкое содержание  $^{137}\text{Cs}$  в этих почвах связано

с тем, что верхний слой почвы, в котором  $^{137}\text{Cs}$  накапливается при атмосферном пути поступления, был изменен, снят или перемешан. Следует пояснить, что в точках кластера «1 – антропогенно нарушенные» вмешательство человека визуально очевидно – здесь в недавнем прошлом имели место расчистка территории для формирования противопожарной полосы, строительные и дорожные работы, в ходе которых был существенно нарушен верхний слой почвы. Однако зоны расположения точек кластеров «2 – лес, у автотрассы» и «3 – лес, северо-запад» также подвергались антропогенному воздействию при строительстве автотрассы и ограждения НИФХИ, хотя и в более отдаленный период, поэтому почвы на этой территории также являются нарушенными несмотря на наличие лесопосадок.

Наиболее высокие уровни  $^{137}\text{Cs}$  на протяжении всего периода исследования регистрировались в кластере «4 – лес, восток». Эта зона представляет собой лесной массив, не тронутый техногенной деятельностью. Среднее значение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в этой зоне ( $10,6 \pm 0,8$  Бк/кг) достоверно превышает средние значения в других кластерах (см. табл. 1). В отдельных пробах содержание  $^{137}\text{Cs}$  статистически значимо ( $p < 0,05$ ) превышало 10 Бк/кг (точка 2.9 в 2018 г. и 2023 г., точка 2.11 в 2023 г.), однако среднее значение по кластеру совпадает с уровнем глобальных выпадений.

При планировании исследований нами выдвигалась гипотеза о том, что повышенные уровни долгоживущих техногенных радионуклидов в случае их присутствия в выбросах НИФХИ в атмосферу в какой-либо из периодов деятельности предприятия могут быть обнаружены в пробах окружающей среды, взятых в направлении преимущественного распространения облака выброса в соответствии с розой ветров. Однако полученные результаты определения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в пробах почвы показали, что с подветренной стороны, «под факелом» наблюдаются как наиболее высокие уровни в кластере «4 – лес, восток», так и наиболее низкие уровни в кластере «1 – антропогенно нарушенные» (см. рис. 1). По нашему мнению, низкие значения объясняются тем, что данные почвы были изменены в результате антропогенного вмешательства, из-за чего верхний слой почвы, в котором  $^{137}\text{Cs}$  накапливается при атмосферном пути поступления, был изменен, снят или перемешан. Наиболее высокие значения выявлены на лесных почвах с ненарушенным почвенным слоем; удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  находится на уровне глобальных выпадений (около 10 Бк/кг). Согласно полученным данным, влияние деятельности НИФХИ на содержание техногенного долгоживущего радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах СЗЗ и ЗН предприятия не обнаружено.

Знание физико-химических свойств почвы имеет большое значение как для понимания возможных изменений почвы в результате осуществляемой техногенной деятельности, так и для интерпретации поведения загрязняющих веществ в почвенном слое и других компонентах природных экосистем.

Среди изучавшихся в данной работе физико-химических свойств почвы статистически достоверная зависимость удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  установлена для содержания органического вещества и актуальной кислотности почвы (рис. 3, 4).

Самое низкое содержание органического вещества –  $1,9 \pm 0,3\%$ , достоверно отличающееся от остальных кластеров, установлено в кластере «1 – антропогенно нарушенные». Самые высокие значения получены в нетронутым техногенной деятельностью кластере «4 – лес, восток» ( $4,3 \pm 0,3\%$ ), что хорошо видно из рис. 3. В целом, полученные значения вполне характерны для дерново-подзолистых почв, среднее содержание гумуса

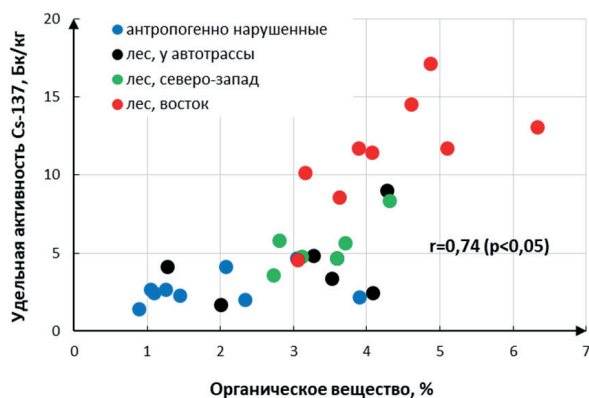
Изучение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах в зоне влияния НИФХИ им. Л.Я. Карлова

Рис. 3. Зависимость между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и содержанием органического вещества в почве (2021 – 2022 гг.)

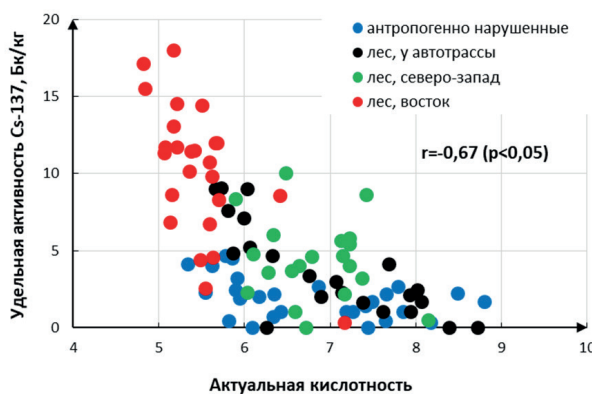


Рис. 4. Зависимость между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и актуальной кислотностью почв (2018 – 2023 гг.)

в которых составляет 2 – 4% [18]. Считается, что органическое вещество способствует снижению подвижности  $^{137}\text{Cs}$  в бедных почвах [12], что согласуется с полученными данными (см. рис. 3), так как с увеличением концентрации органического вещества удельная активность радионуклида растет, и он как бы закрепляется в почве. Однако в условиях исследования, корреляция данных показателей скорее всего связана со степенью нарушенности почвенного покрова. Гумус имеет тенденцию накапливаться в верхнем слое почвы, а дорожные и строительные работы привели к разрушению этого горизонта. Одновременно в нетронутых почвах продолжают оставаться радионуклиды глобальных выпадений, тогда как в нарушенных почвах они удалены либо перемешаны.

Что касается актуальной кислотности, почвы кластера «4 – лес, восток» ( $\text{pH } 5,5 \pm 0,1$ ) проявляют кислую реакцию (рис. 4), характерную для дерново-подзолистых почв [19]. Данный кластер достоверно отличается ( $p < 0,05$ ) от кластеров «1 – антропогенно нарушенные», «2 – лес, у автотрассы», «3 – лес, северо-запад», где актуальная кислотность лежит в границах нейтрального  $\text{pH}$  ( $6,8 \pm 0,2$ ;  $7,0 \pm 0,2$ ;  $6,8 \pm 0,1$  соответственно). Следовало бы ожидать, что при низких значениях  $\text{pH}$  (кислая реакция среды) радионуклид будет в большей степени переходить в подвижную форму и легче вымываться

из почвы, чем при высоких значениях pH. Однако в настоящем исследовании получена противоположная зависимость – между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  в почве и величиной pH имеется статистически достоверная отрицательная корреляция. Вероятно, в данном случае ландшафтные особенности и степень антропогенной нагрузки, как уже обсуждалось выше, имеют более значительное влияние на содержание техногенного радионуклида в почве, чем физико-химические особенности.

## Заключение

Обнинский регион является примером территории, на которой существует ряд радиэкологических задач, связанных с обеспечением безопасности функционирования радиационно-опасных предприятий, которые были введены в эксплуатацию во второй половине прошлого века без должного учета природных особенностей территории и обеспечения необходимого уровня защиты. НИФХИ им. Л.Я. Карпова – один из ключевых компонентов кластера ядерных технологий, приоритетного направления развития Калужской области, и одновременно – одно из предприятий, оказывающих основное влияние на радиационную обстановку в г. Обнинске и его окрестностях.

Представленные в работе результаты изучения содержания техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почве в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения НИФХИ показали, что наиболее высокие уровни удельной активности данного радионуклида наблюдаются в лесном массиве с ненарушенным почвенным покровом. Полученные значения соответствуют региональному уровню, сформированному глобальными выпадениями после ядерных испытаний в середине XX в. Влияние деятельности НИФХИ на содержание техногенного долгоживущего радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в почвах СЗЗ и ЗН предприятия не обнаружено.

Выявлены прямая корреляционная зависимость между удельной активностью радионуклида и содержанием органического вещества в почвах и обратная зависимость между уровнями  $^{137}\text{Cs}$  и актуальной кислотностью почвенного раствора. Показано, что антропогенная деятельность, связанная со строительными и дорожными работами, оказывает значительное влияние как на физико-химические свойства почвенного покрова, так и на содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве.

Проведение развернутых исследований состояния окружающей среды в зоне влияния ядерно- и радиационно опасных объектов позволяет получить объективную независимую информацию, востребованную населением, научной общественностью и атомной отраслью как на региональном, так и на федеральном уровне.

## Литература

1. Радиэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева). М.: 2021, 555 с.
2. Отчет по экологической безопасности за 2022 год. АО «НИФХИ им. Л. Я. Карпова», 2023, 39 с.
3. Архив погоды в Обнинске: Электронный ресурс World weather. 2023. URL: <https://world-weather.ru/archive/russia/obninsk/> (дата обращения: 17.06.2024).
4. ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. 7 с.

5. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. 11 с.
6. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. 6 с.
7. ГОСТ Р 58594-2019. Почвы. Метод определения обменной кислотности. 9 с.
8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2023 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2024, 347 с.
9. Агеева Н.В., Ким В.М., Васильева К.И., Каткова М.Н., Волокитин А.А., Полянская О.Н. Многолетние наблюдения за содержанием  $^{131}\text{I}$  в приземном слое атмосферы г. Обнинска Калужской области. *Радиация и риск*. 2015;24(1): 96–107. URL: [http://radiation-and-risk.com/images/pdf/rr\\_15\\_1\\_9.pdf](http://radiation-and-risk.com/images/pdf/rr_15_1_9.pdf) (дата обращения: 17.06.2024).
10. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2023 г. Калуга: Министерство природных ресурсов и экологии Калужской области, 2024. URL: <https://ecology.admoblkaluga.ru/page/doklad-o-sostoyanii-prirodnikh-resursov/> (дата обращения: 17.06.2024).
11. НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности: Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009, 100 с.
12. Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарев В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология (под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева). М.: Экология, 1991, 396 с.
13. Лашенова Т.Н., Зозуль Ю.Н. Определение фонового содержания радионуклидов и тяжелых металлов в почве. *Атомная энергия*. 2006;100(3):231–237. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1833/1813> (дата обращения: 17.06.2024).
14. Эдомская М.А., Лукашенко С.Н., Ступакова Г.А., Шупик А.А., Шаповалов С.Г. Оценка содержания плутония и цезия-137 в почве и разнотравье Калужской области. *Плодородие*. 2023,1(130):14–19.
15. Данные по радиоактивному загрязнению территории населенных пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-239+240 (Под редакцией С.М. Вакуловского, подготовил В.Н. Яхрюшин). Обнинск: ФГБУ НПО «Тайфун», 2024, 224 с.
16. Ашитко А.Г., Золочевский Д.В., Овсянникова Л.В., Рожкова С.А. Радиационная обстановка на территории Калужской области 30 лет спустя после аварии на Чернобыльской АЭС. *Радиационная гигиена*. 2016;9(2):40–47. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-2-40-47>
17. Санжарова Н.И., Белова Н.В., Андреева Н.В. Эволюция представлений о подвижности  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва-растение и роли калия в этих процессах. *Агрохимия*. 2014;5:79–93.
18. Кирюшин В.И. Агрономическое почвоведение. 2-е изд. Санкт-Петербург: Квадро, 2021, 680 с.
19. Минеев В.Г., Сычев В.Г. Агрохимия. Учебник (под ред. В.Г.Минеева). М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017, 854 с.

## Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант No. 23-29-10166).

Поступила в редакцию 18.10.2024  
После доработки 20.11.2024  
Принята к опубликованию 09.12.2024

## Авторы

Удалова Алла Александровна, профессор отделения ядерной физики и технологий, д.биол.н.,

E-mail: oudalova@mail.ru

Мельникова Татьяна Вадимовна, доцент отделения ядерной физики и технологий, к.х.н.,

E-mail: tritel2010@gmail.com

Непогодина Яна Вячеславовна, аспирант, отделение ядерной физики и технологий,

E-mail: dragonflynepogodina@gmail.com

Киселева Людмила Александровна, заведующая лабораторией, отделение ядерной физики и технологий,

E-mail: kiseleva-lusya@mail.ru

UDC 574.4; 504.05; 621.039

## Study of the $^{137}\text{Cs}$ Content in Soils within the Area Nearby the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry

Udalova A.A.<sup>1,2</sup>, Melnikova T.V.<sup>1,2</sup>, Nepogodina Y.V.<sup>1</sup>, Kiseleva L.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IATE MEFhI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

<sup>2</sup> MEFhI,

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

## Abstract

A large array of radioecological data was obtained in the six-year course of a research work (2018–2023) to investigate the state of the natural environment within the area nearby a non-energetic nuclear facility, the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry (Karpov Institute) in Obninsk. The paper presents the results of investigating the content of the technogenic  $^{137}\text{Cs}$  radionuclide in the soil within the area adjacent to the facility. Soil samples were taken each year in the period between 2018 and 2023 in the Karpov Institute's sanitary protection zone and surveillance zone. The localities explored include: open field and woodland, anthropogenically disturbed and undisturbed, roadside and predominant emission spread areas. The specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  in soil was found to vary within  $2.6 \pm 0.3$  to  $10.6 \pm 0.8$  Bq/kg. The highest  $^{137}\text{Cs}$  levels are observed for the woodland area with the undisturbed soil surface; the obtained values correspond to the regional level of 10 Bq/kg formed by the global fallout after nuclear tests in the middle of the past century. There has been a direct correlation revealed between the specific activity of the radionuclide and the content of organic matter in soil, and an inverse correlation between the levels of  $^{137}\text{Cs}$  and the actual acidity of the soil solution. It is shown that the anthropogenic activity related to construction and road works has a major effect both on the physicochemical properties of the soil and the content of  $^{137}\text{Cs}$  in soil. No impact on the content of the long-lived technogenic  $^{137}\text{Cs}$  radionuclide in soil within the facility's sanitary protection zone and surveillance zone has been revealed from the Karpov Institute operation.

**Key words:**  $^{137}\text{Cs}$ , soil, environment radioactive contamination, research reactor, radioisotope production.

**For citation:** Udalova A.A., Melnikova T.V., Nepogodina Y.V., Kiseleva L.A. Study of the  $^{137}\text{Cs}$  Content in Soils within the Area Nearby the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;1:128–140. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.09> (in Russian).

## References

1. Radioecological situation in the regions where the enterprises of the State Atomic Energy Corporation "Rosatom" are located (Edited by I.I. Linge and I.I. Kryshev). Moscow, 2021, 555 p. (in Russian).
2. Environmental Safety Report for 2022. Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry, 2023, 39 p. (in Russian).
3. Obninsk weather archive: Electronic resource. World weather. 2023. URL: <https://world-weather.ru/archive/russia/obninsk/> (accessed Jun.17, 2024) (in Russian).
4. GOST 27784-88. Soils. Method of determination of ash content of peat and peaty and peaty soil horizons. 7 p. (in Russian).
5. GOST 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. 11 p. (in Russian).
6. GOST 26423-85. Soils. Methods of determination of specific electrical conductivity, pH and dense residue of water extract. 6 p. (in Russian).
7. GOST R 58594-2019. Soils. Method for determination of exchangeable acidity. 9 p. (in Russian).
8. Radiation situation on the territory of Russia and neighbouring countries in 2023. Yearbook. Obninsk: Research and Production Association Typhoon Publ., 2024, 347 p. (in Russian).
9. Ageeva N.V., Kim V.M., Vasilieva K.I., Katkova M.N., Volokitin A.A., Polyanskaya O.N. Multi-year observations of  $^{131}\text{I}$  content in the surface layer of the atmosphere of Obninsk, Kaluga region. *Radiatsiya i Risk*. 2015;24(1):96–107. URL: [http://radiation-and-risk.com/images/pdf/rr\\_15\\_1\\_9.pdf](http://radiation-and-risk.com/images/pdf/rr_15_1_9.pdf) (accessed Jun.17, 2024) (in Russian).
10. Bulletin on the Radiation Situation on the Territory of Russia in July 2023. Research and Production Association Typhoon Publ., 8 p. (in Russian).
11. NRB-99/2009. SanPiN 2.6.1.2523-09 Radiation Safety Norms: Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations. Moscow: Federal Centre of Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009, 100 p. (in Russian).
12. Agricultural radioecology (Edited by R.M. Aleksakhin, N.A. Korneev). Moscow, Ecologiya Publ., 1991, 396 p. (in Russian).
13. Lashchenova T.N., Zozul' Y.N. Determination of the background content of radionuclides and heavy metals in soil. *Atomic Energy*. 2006;100(3):228–233. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-006-0077-5>
14. Edomsкая M.A., Lukashenko S.N., Stupakova G.A., Shupik A.A., Shapovalov S.G. Assessment of plutonium and caesium-137 content in soil and grasses of Kaluga region. *Plodorodie*. 2023;1(130):14–19 (in Russian).
15. Data on radioactive contamination of the territory of populated areas of the Russian Federation with caesium-137, strontium-90 and plutonium-239+240 (Edited by S.M. Vakulovskiy, prepared by V.N. Yakhryushin). Obninsk, Research and Production Association Typhoon Publ., 2024, 224 p. (in Russian).
16. Ashitko A.G., Zolochovsky D.V., Ovsyannikova L.V., Rozhkova S.A. Radiation conditions in Kaluga region 30 years after Chernobyl NPP accident. *Radiation Hygiene [Radiatsionnaya Gygiena]*. 2016;9(2):40–47. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2016-9-2-40-47> (in Russian).
17. Sanzharova N.I., Belova N.V., Andreeva N.V. Evolution of ideas on the mobility of  $^{137}\text{Cs}$  in the soil-plants system and the role of potassium in these processes. *Agricultural chemistry*. 2014;5:79–93 (in Russian).
18. Kiryushin V.I. Agronomic soil science. 2<sup>nd</sup> ed. St. Petersburg, Kvadro Publ., 2021, 680 p. (in Russian).

19. Mineev V.G., Sychev V.G. Agrochemistry. Textbook (Edited by V.G. Mineev). Moscow, VNIIA im. D.N.Pryanishnikova Publ., 2017, 854 p. (in Russian).

### Authors

Alla A. Udalova, Professor, Department of Nuclear Physics and Technology, Dr. Sci. (Biology),  
E-mail: oudalova@mail.ru

Tatiana V. Melnikova, Associate Professor, Department of Nuclear Physics and Technology,  
Cand. Sci. (Chemistry),

E-mail: tritel2010@gmail.com

Yana V. Nepogodina, Postgraduate student, Department of Nuclear Physics and Technology,  
E-mail: dragonflynepogodina@gmail.com

Lyudmila A. Kiseleva, Head of the Laboratory, Department of Nuclear Physics and  
Technology,

E-mail: kiseleva-lusya@mail.ru