

## Содержание естественных радионуклидов и $^{137}\text{Cs}$ в водоемах вблизи НИФХИ им. Л.Я. Карпова

А.А. Удалова<sup>1,2</sup>, Т.В. Мельникова<sup>1,2</sup>, Д.А. Минаков<sup>1</sup>, Я.В. Непогодина<sup>1</sup>, Л.А. Киселева<sup>1</sup>, М.А. Шпилько<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ИАТЭ НИЯУ МИФИ,  
249039 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, 1

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ,  
115409 Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31

<sup>3</sup> АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,  
249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

**Реферат.** В ходе пятилетних исследований (2019–2023 гг.) изучалась радиоэкологическая ситуация в районе расположения АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (далее НИФХИ) в г. Обнинске – ядерно- и радиационно опасного объекта с длительной историей эксплуатации, реализующего неэнергетические применения ядерных и радиационных технологий. Представлены результаты изучения содержания естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  в водных объектах, расположенных в зоне влияния предприятия. Исследовали шесть водоемов разного типа: проточные водоемы – реки; расположенные в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения НИФХИ искусственные водоемы (пруды), наполняющиеся только в результате выпадения осадков, и слабопроточный водоем 1, питаемый поступающими с территории НИФХИ водами. Ежегодно проводили отбор проб воды (весной, летом и осенью) и донных отложений. Определены значения водородного показателя (рН 6,52–9,06) и минерализация (18,3–802,3 мг/л) воды, мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) над поверхностью воды (от  $0,09 \pm 0,01$  до  $0,12 \pm 0,01$  мкЗв/ч) и содержание  $^{137}\text{Cs}$  и естественных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в воде и донных отложениях. Показано, что физико-химические показатели, уровни МАЭД и содержание  $^{137}\text{Cs}$  и естественных радионуклидов в воде малых водоемов искусственного происхождения в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения предприятия, а также в реках соответствуют значениям, характерным для водных объектов центральной России. Исключением является водоем 1, который имеет признаки повышенного техногенного воздействия: уровни МАЭД достигали  $0,37$  мкЗв/ч со средним значением  $0,19 \pm 0,01$  мкЗв/ч; удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в отдельных пробах воды превышала уровень вмешательства для питьевой воды до 35 и 2 раз соответственно. В донных отложениях водоема 1 выявлены отклонения от уровня глобальных выпадений: средние значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  менялись от  $1020 \pm 271$  до  $2083 \pm 403$  Бк/кг с максимальным зафиксированным значением  $6700 \pm 700$  Бк/кг. Выявленное радиоактивное загрязнение носит локальный характер, на прилегающих территориях повышенных уровней

$^{137}\text{Cs}$  не обнаружено. Однако для корректного вывода о состоянии радиационной безопасности в месте расположения водоема 1 и принятия решения о необходимости вмешательства желательно провести дополнительные целевые исследования.

**Ключевые слова:**  $^{137}\text{Cs}$ , естественные радионуклиды, водоемы, донные отложения, радиоактивное загрязнение окружающей среды, исследовательский реактор, производство радионуклидов.

**Для цитирования:** Удалова А. А., Мельникова Т. В., Минаков Д. А., Непогодина Я. В., Киселева Л. А., Шпилько М. А. Содержание естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  в водоемах вблизи НИФХИ им. Л. Я. Карпова. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:86–99. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.08>

## Введение

Большая часть опыта радиоэкологических исследований основана на оценке последствий радиационных аварий и мониторинге таких крупных и потенциально опасных промышленных объектов, как атомные электрические станции [1–4]. Однако не менее важным является экологический мониторинг неэнергетических ядерных объектов. В результате их функционирования могут формироваться специфические условия, меняющие уровни и характер распределения радионуклидов в окружающей среде [5].

В Обнинске более 60-ти лет функционируют несколько радиационно опасных объектов (РОО), в процессе работы которых в окружающую среду поступают как радиоактивные, так и химические вещества, которые необходимо контролировать не только на территории предприятий, но и в санитарно-защитной зоне, зоне наблюдения и на прилегающих к ним территориях. Особое место среди таких предприятий занимает НИФХИ, радиационное воздействие которого на окружающую среду началось с пуска в эксплуатацию в 1962 г. гамма-установок (источник Со-60) и исследовательского ядерного реактора ВВР-ц в 1964 г. В 1980 г. на базе реактора начало действовать и развиваться производство радионуклидов медицинского назначения и радиофармпрепаратов на их основе. С течением времени количество производимой предприятием продукции постепенно увеличивалось, с ним же росла и антропогенная нагрузка на окружающую среду.

В процессе производства медицинских радионуклидов и радиофармпрепаратов образуются техногенные радионуклиды, такие как  $^{131}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$  и др., которые могут поступать в окружающую среду в ходе штатных сбросов (прекращены в НИФХИ с 2017 г.) и выбросов, при нарушениях технологических процессов или инцидентах при обращении с радиоактивными отходами или отработавшим ядерным топливом. Особого внимания среди упомянутых радионуклидов заслуживает  $^{137}\text{Cs}$ , который как в случае однократных залповых сбросов и выбросов, так и длительного поступления в низких количествах может аккумулироваться в объектах окружающей среды и создавать долгоживущие очаги радиоактивного загрязнения.

Водные объекты, располагающиеся вблизи РОО, играют ключевую роль в миграции радионуклидов, с одной стороны, способствуя переносу растворенных веществ и взвешенных примесей, поступающих в водоемы с атмосферными осадками, ливневыми и сбросными водами, а с другой стороны, создавая условия для накопления радионуклидов и загрязняющих веществ [1, 3, 6].

В рамках данной работы исследовалось содержание естественных радионуклидов и  $^{137}\text{Cs}$  в водных объектах, расположенных вблизи НИФХИ.

## Материалы и методы

С 2019 по 2023 гг. ежегодно проводили отбор проб воды и донных отложений из поверхностных водных объектов, расположенных вблизи НИФХИ. Карта-схема точек отбора представлена на рис. 1. Водоем 1 (точка 1, рис. 1) представляет собой небольшой пруд овальной формы (примерно  $25 \times 8 \text{ м}^2$ ) неизвестного происхождения (предположительно образованный в результате поступления сточных вод с площадки предприятия, так как соединен с промплощадкой предприятия трубой), расположенный вплотную к ограждению НИФХИ в санитарно-защитной зоне предприятия. По другую сторону от ограждения на территории НИФХИ находятся пруды-отстойники (рис. 2), в которых до 2017 г. происходила выдержка содержащих техногенные ра-

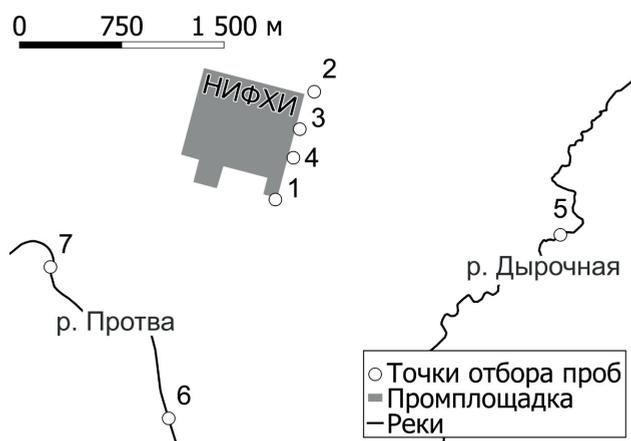


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды и донных отложений в зоне влияния НИФХИ

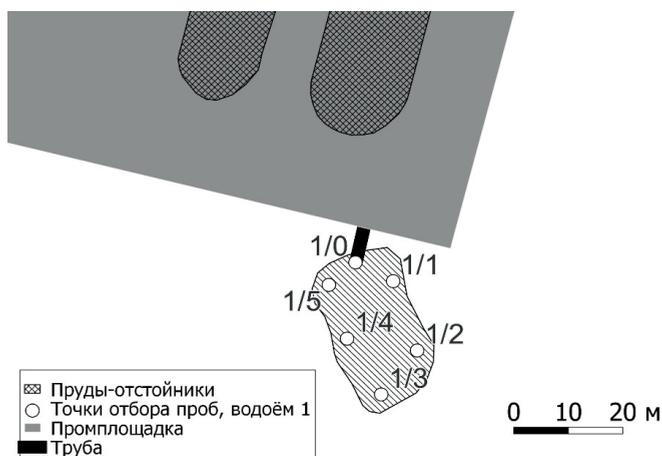


Рис. 2. Карта-схема отбора проб воды и донных отложений из водоема 1

дионуклиды технических вод. В связи с риском поступления радионуклидов в водоем 1 с площадки предприятия отбор проб для водоема 1 осуществлялся в шести точках (рис. 2); в настоящей работе приведены усредненные результаты. Водоем 2 (точка 2, рис. 1 – небольшой искусственный пруд овальной формы  $10 \times 10 \text{ м}^2$ ) и водоемы 3 и 4 (точки 3 и 4, рис. 1 – малые пруды вытянутой овальной формы примерно  $2 \times 10 \text{ м}^2$ ) находятся в санитарно-защитной зоне НИФХИ вдоль восточной стороны ограждения. Водоемы 3 и 4 к осеннему периоду пересыхают. Проточные водоемы представлены точкой 5 (река Дырочная), расположенной в пяти километрах к востоку от предприятия, и точками 6 и 7 (река Протва), расположенными соответственно ниже и выше по течению от сброса очистных сооружений, обслуживающих предприятие.

Отбор проб воды выполнялся весной, летом и осенью. Пробы воды отбирали в пластиковые канистры объемом по пять литров в соответствии с ГОСТ 31861-2012. После определения минерализации и pH воды пробы консервировали азотной кислотой до  $\text{pH} = 1 - 2$ .

Пробы донных отложений отбирали в пластиковые контейнеры в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80, масса одной пробы составляла примерно 2 кг. Затем пробы просушивали и просеивали через сито 2 мм.

Во время отбора проб проводили измерение мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы (МАЭД) на расстоянии 1 м от поверхности воды с использованием дозиметра-радиометра МКС-15Д «СНЕГИРЬ» (НПП «Доза», Россия).

Содержание радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в пробах воды и донных отложений определяли с помощью гамма-спектрометра «Прогресс гамма» со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) (2019 – 2022 гг.). Минимальная измеряемая активность в пробе в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л по  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{40}\text{K}$  – 3, 8, 8 и 40 Бк/кг соответственно. Для проб 2023 г. измерения проводили на гамма-спектрометре ГАММА-1П с полупроводниковым детектором HPGe; минимальная измеряемая активность  $^{137}\text{Cs}$  в образце при использовании защитного экрана за время измерения 1 час – 1,5 Бк.

На анализаторе АНИОН 4100 (ООО НПП «Инфраспек-Аналит», Россия) потенциометрическим методом определяли pH воды и кондуктометрическим методом измеряли минерализацию воды.

## Результаты и обсуждение

### Физико-химические характеристики водоемов

Поведение радионуклидов в водоеме, их распределение между твердой и жидкой фазами и вероятность распространения по гидрографической сети существенно зависят от физико-химических характеристик водоема [6–8]. Одной из наиболее важных характеристик является водородный показатель (pH). В частности, pH воды влияет на величину накопления техногенных радионуклидов донными отложениями [6]. В таблице 1 представлены результаты определения минерализации и pH воды в пробах, отобранных вблизи НИФХИ, за весь период исследований.

Как видно из табл. 1, наиболее низкие значения pH воды зарегистрированы в искусственных водоемах (точки 2, 3, 4); наблюдаемый диапазон значений водородного показателя 6,5 – 7,9 соответствует pH для нейтральных (6,5–7,5) и слабощелочных вод

**Результаты измерения минерализации и pH воды в водоемах  
вблизи НИФХИ, 2019 – 2023 гг.**

Тип водоема	Точка отбора	pH		Минерализация, мг/л	
		$\bar{x} \pm sd$	min – max	$\bar{x} \pm sd$	min – max
Водоем 1	1	8,45±0,22	8,03 – 8,83	398,4±141,4	241,1 – 802,3
Водоемы искусственного происхождения	2	6,76±0,68	6,52 – 8,82	57,45±13,96	36,8 – 77,2
	3	7,15±0,55	6,61 – 7,89	25,38±9,83	18,3 – 41,6
	4	7,19±0,18	7,02 – 7,38	42,3±13,78	28,1 – 61,2
Проточные водоемы – реки	5	8,19±0,42	7,81 – 9,04	444,3±85,1	329,8 – 552,8
	6	8,29±0,47	7,60 – 9,06	240,2±63,1	117,5 – 295,5
	7	8,19±0,64	7,03 – 9,00	234,5±71,9	111,4 – 297,5

(7,5 – 8,5) [9]. Воды в водоеме 1 и в реках Дырочная и Протва демонстрируют более высокие значения pH (8,0 – 8,8 и 7,0 – 9,0 соответственно) и относятся к слабощелочным и щелочным водам.

Установленное нормативными документами значение уровней pH в водах разного типа водопользования составляет 6,5 – 8,5. Превышение указанного значения наблюдается в водоеме 1 и реках, в основном, в 2021 – 2023 гг. Наибольшее значение водородного показателя встречается осенью 2022 г. в точке 1.3 в водоеме 1 (см. рис. 2), который имеет прямой контакт с промплощадкой через сливную трубу.

Значения минерализации проб воды, отобранных вблизи НИФХИ (см. табл. 1), лежат в пределах 18,3 – 802,3 мг/л, что не превышает установленного СанПиН 2.1.5.980-00 значения в 1000 мг/л. Вода во всех точках, исключая точки 2, 3, 4, является пресной, уровень минерализации изменяется в диапазоне 111,4 – 802,3 мг/л. Наиболее высокие значения минерализации зарегистрированы в водоеме 1; вероятно, это обуславливается мелководностью водоема 1, а также возможной подпиткой подземными и сточными водами.

В точках 2, 3, 4 вода ультрапресная, минерализация менее 200 мг/л [9]. Низкие уровни минерализации в точках 2 – 4 можно объяснить тем, что водоемы, из которых проводился отбор, имеют искусственное происхождение (образовались в углублениях, возникших при заборе грунта и песка). Они, по всей видимости, не подпитываются подземными водами, сбросов с площадки НИФХИ сюда не осуществляется. Наполняются они только в результате выпадения осадков (дожди, туманы, снег и пр.), что уменьшает степень минерализации.

**Мощность амбиентного эквивалента дозы**

В таблице 2 представлены результаты измерения МАЭД за весь исследуемый период. Полученные значения МАЭД для точек 2 – 7 не выходят за пределы колебаний естественного гамма-фона в стокилометровой зоне вокруг г. Обнинск (0,10 – 0,13 мкЗв/ч в 2023 г.) [10]. Несколько повышенный уровень МАЭД (0,19±0,01 мкЗв/ч) выявлен для водоема 1. Максимальные зафиксированные значения в этой точке отбора составляли 0,37 мкЗв/ч летом 2021 и 2022 гг.; эти измерения проводились не над поверхностью воды, а над дном водоема в связи с его полным высыханием из-за жаркого лета. Сле-

Таблица 2

**Результаты определения МАЭД в точках отбора проб**

Водоемы	1	2	3	4	5	6	7
МАЭД, мкЗв/ч							
$\bar{x} \pm sd$	0,19±0,01	0,11±0,01	0,11±0,01	0,11±0,01	0,09±0,01	0,12±0,01	0,10±0,01
Минимум	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,11	0,09
Максимум	0,37	0,12	0,12	0,12	0,09	0,12	0,11

дует отметить, что данное значение выше максимального среднесуточного значения МАЭД 0,20 мкЗв/ч по Калужской области, зафиксированного в 2023 г. [10].

**Содержание радионуклидов в воде**

Естественные радионуклиды  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  относятся к приоритетному перечню определяемых радионуклидов в воде [11]. В центральной части России содержание  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в поверхностных водах является низким и изменяется в диапазоне 0,007–0,04;  $8 \cdot 10^{-5}$ – $4 \cdot 10^5$  и 0,04–0,5 Бк/л соответственно [12].

В изученных пробах воды из района расположения НИФХИ также обнаружены низкие удельные активности естественных радионуклидов. Уровни  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$  были ниже пределов обнаружения во всех пробах за весь период исследования; для  $^{226}\text{Ra}$  измеряемые величины были получены только для водоема 1 локально в нескольких точках в 2021 и 2023 гг. (табл. 3). Выявленные уровни  $^{226}\text{Ra}$ , достигающие  $17,3 \pm 4,0$  Бк/л, являются довольно высокими. Они превышают не только значения 0,007–0,04 Бк/л, которые можно считать фоновыми [12], но и уровень вмешательства для  $^{226}\text{Ra}$  в питьевой воде (0,49 Бк/кг, НРБ-99/2009) до 35 раз. Причина этого в настоящее время неясна. Возможные технологические процессы на НИФХИ, которые могли бы вести к увеличению содержания естественного радионуклида в воде, нам неизвестны. Возможно, обогащенные естественной радиоактивностью воды поступают из глубоких подземных горизонтов и выявляются при определенном сочетании физико-химических свойств водоема 1. Отметим, что содержание радионуклидов в воде водоемов не нормируется НРБ-99/2009, т.е. полученные данные не означают нарушения требований радиационной безопасности.

Особое внимание при изучении радиоэкологической обстановки вблизи ЯРОО уделяется техногенным радионуклидам. В настоящей работе определяли содержание

Таблица 3

**Удельная активность  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде водоема 1**

Год	Удельная активность, Бк/кг	
	$^{226}\text{Ra}$	$^{137}\text{Cs}$
2019	–	$3,30 \pm 1,00$ ( $n=8$ )
2020	–	$5,21 \pm 0,64$ ( $n=12$ )
2021	$17,3 \pm 4,0$ ( $n=10$ )	–
2022	–	–
2023	$2,75 \pm 0,29$ ( $n=4$ )	$6,82 \pm 2,80$ ( $n=8$ )

$^{137}\text{Cs}$  – важного радионуклида искусственного происхождения, который может вносить значительный вклад в дозовые нагрузки на загрязненных территориях. Источниками  $^{137}\text{Cs}$  в окружающей среде могут быть глобальные выпадения после ядерных испытаний, радиационные аварии и инциденты, а также штатная работа ядерно- и радиационно опасных объектов. Согласно литературным данным, удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  в природных водах (реки, озера), не подвергшихся значимому загрязнению после Чернобыльской аварии, в центре европейской части России изменяются в диапазоне от 0,005 до 5 Бк/л [12].

В водоемах 2 – 7, расположенных в зоне влияния НИФХИ, не было получено измеряемых значений  $^{137}\text{Cs}$  в воде за весь период исследования (2019 – 2023 гг.). Только в водоеме 1 выявлено присутствие данного радионуклида в отдельные годы (см. табл. 3). Средние значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  соответствуют диапазону 0,005 – 5 Бк/л, характерному для европейской части России. Однако в двух пробах (весна и лето 2023 г.) были зарегистрированы значения  $22,7 \pm 1,1$  и  $18,6 \pm 0,1$  Бк/кг соответственно, которые превышают не только «фоновые» уровни, но и уровень вмешательства (11 Бк/л, НРБ-99/2009).

Поскольку водоем 1 связан с территорией НИФХИ посредством сливной трубы и находится вблизи прудов-отстойников, логично рассматривать предприятие в качестве источника  $^{137}\text{Cs}$ . Скорее всего, поступление техногенного радионуклида в водоем 1 произошло в предшествующий период деятельности. До 2017 г. предприятие осуществляло сброс воды для последующей ее очистки в пруды-отстойники (сооружения 301, 302). Во время обильных осадков, а также таяния снега данные пруды могут переполняться, и вода, а вместе с ней и содержащиеся в ней радионуклиды попадать на ландшафт. Далее уже с ландшафта с потоками воды радионуклиды в небольших количествах могли попадать в поверхностные водоемы. В слабопроточных водоемах, к которым относится водоем 1, высока эффективность сорбции загрязняющих веществ донными отложениями, где может происходить накопление радионуклидов на протяжении длительного периода.

Отметим, что май и июль 2023 г. были довольно жаркими и сухими, так что уровень воды упал (летом 2023 г. удалось отобрать только три пробы воды из водоема 1, который обычно был довольно полноводным) и, как следствие, водоем стал практически стоячим. По-видимому, это и привело к формированию высоких концентраций  $^{137}\text{Cs}$  в воде за счет продолжающегося поступления радионуклида из донных отложений и отсутствия его вымывания из водоема.

### Содержание радионуклидов в донных отложениях

Наиболее критичной компонентой поверхностных водоемов являются донные отложения, которые аккумулируют поступающие в водоем загрязняющие и радиоактивные вещества. В таблице 4 представлены результаты определения удельной активности радионуклидов в донных отложениях исследуемых водных объектов. Содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в точках 2 – 7 (минимум – максимум) за изученный период лежит в диапазонах 0,68 – 13,7, 8,8 – 22,5, 4,2 – 32,7 и 134 – 499 Бк/кг соответственно. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными об удельных активностях радионуклидов в донных отложениях малых поверхностных водоемов г. Москва, которые составляют  $\leq 5$ , 11, 10, 296 Бк/кг в среднем для  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  соответственно [10], и с данными НКДАР ООН о диапазонах удельных

Таблица 4

## Содержание радионуклидов в донных отложениях

Точка отбора	Удельная активность, Бк/кг			
	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{137}\text{Cs}$
2019 год				
1	255 ± 19	35,6 ± 5,8	13,4 ± 1,3	1020 ± 271
3	371 ± 77	11,3 ± 3,4	17,1 ± 4,1	–
4	371 ± 88	15,2 ± 4,9	17,2 ± 5,3	4,6 ± 2,5
2020 год				
1	160 ± 17	60,0 ± 7,5	9,9 ± 0,9	1188 ± 240
2	284 ± 13	8,8 ± 1,2	11,5 ± 1,7	–
3	403 ± 93	15,7 ± 4,2	23,2 ± 9,7	5,3 ± 1,8
4	331 ± 76	14,8 ± 3,5	16,2 ± 6,4	–
5	235 ± 52	–	–	–
6	406 ± 56	19,7 ± 1,2	26,6 ± 4,5	11,4 ± 3,5
7	410 ± 104	16,2 ± 6,8	32,7 ± 8,8	13,7 ± 4,5
2021 год				
1	134 ± 14	87,1 ± 11,2	8,7 ± 0,49	1939 ± 379
2	317 ± 10	10,1 ± 1,4	14,2 ± 4,2	5,1 ± 0,7
3	336 ± 35	10,1 ± 0,9	13,3 ± 2,7	4,0 ± 3,0
4	280 ± 60	–	9,0 ± 3,0	3,0 ± 1,0
5	231 ± 19	8,1 ± 0,1	–	–
6	393 ± 3	24,1 ± 2,7	25,9 ± 2,9	13,3 ± 6,3
7	337 ± 43	12,7 ± 0,7	–	4,0 ± 1,0
2022 год				
1	185 ± 31	62,0 ± 5,7	12,1 ± 1,1	1639 ± 241
2	279 ± 2	9,3 ± 2,5	–	3,2 ± 1,3
3	331 ± 67	12,9 ± 3,2	16,5 ± 3,6	4,6 ± 1,6
4	234 ± 49	–	–	–
5	225 ± 5	8,6 ± 2,5	9,7 ± 2,6	–
6	290 ± 22	15,4 ± 6,3	22,6 ± 4,7	7,0 ± 2,1
7	302 ± 29	13,3 ± 3,7	27,1 ± 5,4	6,7 ± 3,6
2023 год				
1	380 ± 17	32,4 ± 4,8	10,5 ± 1,3	2083 ± 403
2	418 ± 14	9,4 ± 0,9	6,8 ± 0,6	3,2 ± 0,4
3	364 ± 15	9,3 ± 0,7	7,3 ± 1,2	–
4	325 ± 13	8,9 ± 0,5	7,0 ± 0,5	–
5	252 ± 22	14,3 ± 7,1	4,2 ± 0,3	0,68 ± 0,27
6	451 ± 31	14,3 ± 1,6	7,7 ± 0,2	2,7 ± 0,5
7	499 ± 20	22,5 ± 0,5	20,7 ± 1,2	12,8 ± 7,6

активностей естественных радионуклидов в почвах Российской Федерации – 1 – 76, 2 – 79 и 100 – 1400 Бк/кг для  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  соответственно [13]. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почвах Центральной России как результат глобальных выпадений составляет в среднем 10,0 Бк/кг [14], что также соответствует уровням, обнаруженным в водоемах 2 – 7. Несколько более высокие концентрации радионуклидов по сравнению с точками 2 – 5 характерны для реки Протва (точки 6 и 7).

Наблюдается незначительное обогащение донных отложений водоема 1 по  $^{226}\text{Ra}$ , диапазон полученных удельных активностей составляет  $< 8 \div 200 \pm 30$  Бк/кг.

Полученные результаты определения уровней  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях водоема 1 значительно отличаются от остальных водоемов. Средние значения по шести точкам отбора изменяются от  $1020 \pm 271$  до  $2083 \pm 403$  Бк/кг (см. табл. 4) и существенно превышают уровни загрязнения почвы либо донных отложений [10, 13, 14], сформировавшиеся в результате глобальных выпадений. Максимальное значение, зафиксированное в летний период 2021 г. в точке отбора 1/3 (рис. 2), составляет  $6700 \pm 700$  Бк/кг (МЗУА для  $^{137}\text{Cs}$  10 000 Бк/кг). Предположительно, высокие концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях водоема 1 связаны с его поступлением из прудов-отстойников до 2017 г. или из других систем обращения со сбросными водами, использовавшимися на предприятии в ранний период деятельности. Продолжительный сброс радиоактивных веществ со сточными водами даже в невысоких количествах может привести к их накоплению и иммобилизации на донных отложениях.

Выявленное загрязнение донных отложений водоема 1 носит локальный характер. Вынос с водой, по нашим оценкам, очень незначительный. Согласно нашим наблюдениям, при высоком уровне воды в водоеме 1 (в результате осадков либо при таянии снега) вода распространяется путем фильтрации под дорожным полотном вниз по склону в направлении реки Протва, расстояние до которой составляет около 2 км. При этом следует ожидать низкую миграцию  $^{137}\text{Cs}$  от водоема 1 вследствие его эффективной сорбции в экосистемах почвами и донными отложениями [1, 3]. На прилегающих территориях, в том числе в направлении стока поверхностных вод, в ходе настоящих исследований повышенных уровней  $^{137}\text{Cs}$  в почве не обнаружено.

Интенсивность радиационного воздействия на население в обсуждаемой локации является низкой, так как водоем находится в санитарно-защитной зоне предприятия, вдали от жилой застройки; площадь загрязненной территории маленькая; хозяйственное или рекреационное использования водоема отсутствует. С другой стороны, водоем находится в зоне свободного доступа населения; не исключено, что в будущем он может быть затронут строительными или рекультивационными работами. Согласно требованиям НРБ-99/2009, в случае обнаружения локальных радиоактивных загрязнений уровень вмешательства, при превышении которого требуется проведение защитных мероприятий с целью защиты населения, составляет 0,3 мЗв/год. Для корректного определения годовой эффективной дозы в районе расположения водоема 1 требуются дополнительные исследования.

## Заключение

Неэнергетические применения ядерных и радиационных технологий в таких сферах, как ядерная медицина, производство промышленных источников излучения,

микроэлектроника и т.д., активно развиваются во всем мире, а их преимущества по сравнению с традиционными технологиями широко обсуждаются. Экологическая и радиационная безопасность соответствующих производств и видов деятельности является одним из ключевых требований, определяющих их востребованность и приемлемость.

В ходе пятилетних исследований, часть которых представлена в настоящей публикации, изучалась радиоэкологическая ситуация в районе расположения НИФХИ в г. Обнинске – ядерно и радиационно опасного объекта с длительной историей эксплуатации, который по составу установок и видов деятельности может по праву рассматриваться в качестве референтного ядерного центра неэнергетического профиля.

Обследование ряда водоемов различного происхождения, расположенных на прилегающих к предприятию территориях, позволяет оценить последствия долговременного воздействия НИФХИ на гидросферу. Показано, что содержание техногенного  $^{137}\text{Cs}$  и естественных радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  в воде малых водоемов искусственного происхождения, расположенных в санитарно-защитной зоне предприятия, а также в реках находится ниже предела обнаружения. Результаты определения удельной активности донных отложений тех же водоемов согласуются с литературными сведениями о содержании естественных радионуклидов и уровнями  $^{137}\text{Cs}$ , сформировавшимся в результате глобальных выпадений, в почвах и донных отложениях в водоемах России.

Исключение из общей картины представляет небольшой водоем 1, питаемый поступающими с территории НИФХИ водами. В течение всего периода исследования над поверхностью водоема 1 наблюдали немного повышенные уровни МАЭД ( $0,19 \pm 0,01$  мкЗв/ч), которые достигали  $0,37$  мкЗв/ч над обнажившимся дном водоема в засушливые периоды. Отдельные пробы воды содержали аномально высокие удельные активности  $^{226}\text{Ra}$ . Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в пробах воды, в основном, соответствовало значениям, характерным для европейской части России, однако отдельные измерения, проведенные весной и летом 2023 г., показали превышение уровней вмешательства для питьевой воды. Наиболее серьезные отклонения от уровня глобальных выпадений выявлены в донных отложениях водоема 1, где средние значения удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  менялись от  $1020 \pm 271$  до  $2083 \pm 403$  Бк/кг, с максимальным зафиксированным значением  $6700 \pm 700$  Бк/кг. Отметим, что выявленные уровни содержания радионуклидов в воде и донных отложениях водоема 1 не нарушают требований радиационной безопасности, установленных НРБ-99/2009. Наблюдаемая картина позволяет предположить, что  $^{137}\text{Cs}$  поступил в водоем 1 в ходе предшествующей деятельности предприятия и был аккумулирован донными отложениями. В настоящий период времени в зависимости от наполняемости и физико-химических свойств водоема происходит медленное вымывание радионуклида из донных отложений.

Выявленное радиоактивное загрязнение носит локальный характер, ограничиваясь дном водоема 1. На прилегающих территориях повышенных уровней  $^{137}\text{Cs}$  не обнаружено. Однако для корректного вывода о состоянии радиационной безопасности на данной локации и принятия решения о необходимости вмешательства желательно провести дополнительные целевые исследования.

#### **Финансирование**

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

## Литература

1. Каблова К.В., Дерягин В.В., Левина С.Г., Сутягин А.А. Накопление и распределение радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в системе «вода–донные отложения–макрофиты» озера Куяш. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2018;58(5):517–523. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869803118040069>
2. Панов А.В., Коржавин А.В., Коржавина Т.Н. Итоги многолетнего радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;2:138–154. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.12>
3. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Динамика радиоэкологического состояния пресноводных экосистем, подверженных многолетнему воздействию атомной электростанции в границах наблюдаемой зоны. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2015;55:3:302–313. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803115020150>
4. Tachi Y., Sato T., Akagi Y. et al. Key factors controlling radiocesium sorption and fixation in river sediments around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Part 1: Insights from sediment properties and radiocesium distributions. *Sci. Total Environ*. 2020;724:138098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138098>
5. Wallberg P., Moberg L. Evaluation of 20 years of environmental monitoring data around Swedish nuclear installations. *J. Environ. Radioact.* 2002;63(2):117–133. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00021-8)
6. Трапезников А.В.  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$  в пресноводных экосистемах. Екатеринбург: АкадемНаука, 2010, 510 с.
7. Носов А.В., Крылов А.Л., Киселев В.П., Казаков С.В. Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах (под ред. Р.В. Арутюняна). М.: Наука, 2010, 253 с.
8. Селезнев А.А., Торопов А.С., Окунева Т.Г. и др. Миграция естественных радионуклидов в системе «гидрокриогенные компоненты – вода – поровые воды донных осадков» в городских водоемах. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(5):189–204. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/3969>
9. Игнатьева Л.П., Потапова М.О. Гигиена питьевого водоснабжения: учебное пособие. Иркутск: ИГМУ, 2015, 99 с.
10. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2023 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2024, 335 с.
11. СанПин 2.6.1.2800-10 Требования радиационной безопасности при облучении населения природными источниками ионизирующего излучения.
12. Бахур А.Е. Научно-методические основы радиоэкологической оценки геологической среды. Автореферат дисс. д-ра геол.-минерал. наук. М., 2008, 48 с.
13. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Sources. New York, 2000, 657 p.
14. Лашенцова 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).

Поступила в редакцию 20.11.2024

Поступила после доработки 29.11.2024

Принята к опубликованию 06.12.2024

**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

Минаков Даниил Александрович, студент 1 курса магистратуры отделения ядерной физики и технологий,

E-mail: daminakov17@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

Шпилько Мария Александровна, инженер-исследователь,

E-mail: shpilkoma@oiate.ru

UDC 539.1; 504.05; 621.039

## Levels of Natural Radionuclides and $^{137}\text{Cs}$ in Waterbodies nearby the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry

Udalova A.A.<sup>1,2</sup>, Melnikova T.V.<sup>1,2</sup>, Minakov D.A.<sup>1</sup>, Nepogodina Y.V.<sup>1</sup>, Kiseleva L.A.<sup>1</sup>, Shpilko M.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IATE MPhI,

1 Studgorodok ter., 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

<sup>2</sup> MPhI,

31 Kashirskoye Sh., 115409 Moscow, Russia

<sup>3</sup> IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

**Abstract**

In the course of 6-year studies (2019–2023), the radioecological situation was studied in a vicinity of the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry (Karpov Institute) in Obninsk, a nuclear and radiation hazardous facility with a long history of operation that implements non-energy applications of nuclear and radiation technologies. In this paper, the findings are presented from a study of the content of natural radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  in water bodies located within the facility impact zone. Six water bodies of different types located in the sanitary protection zone and the observation zone of the Karpov Institute were studied, including artificial reservoirs (ponds) filled only as a result of precipitation, flowing water bodies - rivers, as well as a weak-flowing reservoir 1 fed by water coming from the territory of the Karpov Institute. Water samples (in spring, summer and autumn) and bottom sediments were taken annually. The values of the hydrogen index (pH 6.52–9.06) and mineralization (18.3–802.3 mg/l) of water, the ambient equivalent dose rate (ADER) above the water surface (from  $0.09 \pm 0.01$  to  $0.12 \pm 0.01$   $\mu\text{Sv/h}$ ) and the content of  $^{137}\text{Cs}$  and natural radionuclides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  in water and bottom sediments were determined. It was shown that the physicochemical parameters, ADER levels and the content of  $^{137}\text{Cs}$  and natural radionuclides in the water of small reservoirs of artificial origin in the facility sanitary protection zone, as well as in the rivers in the Karpov Institute observation zone correspond to the typical values of water bodies in central Russia. The exception is reservoir 1, which shows

signs of increased technogenic impact: the ADER levels reached  $0.37 \mu\text{Sv/h}$  with an average value of  $0.19 \pm 0.01 \mu\text{Sv/h}$ ; the specific activity of  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in some water samples exceeded the intervention level by up to 35 and 2 times, respectively. The most serious deviations from the global fallout level were detected in the bottom sediments of reservoir 1, where the average values of the  $^{137}\text{Cs}$  specific activity varied from  $1020 \pm 271$  to  $2083 \pm 403 \text{ Bq/kg}$ , with the maximum recorded value of  $6700 \pm 700 \text{ Bq/kg}$ . The detected radioactive contamination affects a local spot; no elevated levels of  $^{137}\text{Cs}$  were detected in the adjacent territories. However, in order to draw a correct conclusion about the state of radiation safety at the location of reservoir 1 and to make a decision on the need for intervention, it is advisable to conduct additional targeted studies.

**Keywords:**  $^{137}\text{Cs}$ , natural radionuclides, waterbodies, bottom sediment, environment radioactive contamination, research reactor, radioisotopes production.

**For citation:** Udalova A.A., Melnikova T.V., Minakov D.A., Nepogodina Y.V., Kiseleva L.A., Shpilko M.A. Levels of Natural Radionuclides and  $^{137}\text{Cs}$  in Waterbodies nearby the Karpov Research and Development Institute of Physical Chemistry. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:86–99. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.08> (in Russian).

## References

1. Kablova K.V., Derjagin V.V., Levina S.G., Sutjagin A.A. Accumulation and distribution of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  radionuclides in the system “water–dense sediments–macrophytes” of Lake Kuyash. *Radiation biology. Radioecology*. 2018;58(5):517–523. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869803118040069> (in Russian).
2. Panov A.V., Korzhavin A.V., Korzhavina T.N. Results of long-term radioecological monitoring of the Beloyarsk NPP cooling pond. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024;2:138–154. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.12> (in Russian).
3. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dynamics of the radioecological state of freshwater ecosystems exposed to long-term impact of a nuclear power plant within the boundaries of the observed zone. *Radiation biology. Radioecology*. 2015;55(3):302–313. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803115020150> (in Russian).
4. Tachi Y., Sato T., Akagi Y., Kawamura M., Nakane H., Terashima M., Fujiwara K., Iijima K. Key factors controlling radiocesium sorption and fixation in river sediments around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Part 1: Insights from sediment properties and radiocesium distributions. *Sci. Total Environ*. 2020;724:138098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138098>
5. Wallberg P., Moberg L. Evaluation of 20 years of environmental monitoring data around Swedish nuclear installations. *J. Environ. Radioact.* 2002;63(2):117–133. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(02\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(02)00021-8)
6. Trapeznikov A.V.  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  in Freshwater Ecosystems. Ekaterinburg, AkademNauka, 2010, 510 p. (in Russian).
7. Nosov A.V., Krylov A.L., Kiselev V.P., Kazakov S.V. Modeling of Radionuclide Migration in Surface Waters. Ed. R.V. Arutyunyan. Moscow, Nauka, 2010, 253 p. (in Russian).
8. Seleznev A.A., Toropov A.S., Okuneva T.G., Kiseleva D.V., Jarmoshenko I.V., Rjanskaja A.D. Migration of natural radionuclides in the system “hydrocryogenic components - water - pore water of bottom sediments” in urban water bodies. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2023;334(5):189–204. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/5/3969> (in Russian).
9. Ignat'eva L. P., Potapova M.O. Hygiene of Drinking Water Supply: Textbook. Irkutsk, IGMU, 2015, 99 p. (in Russian).

10. Radiation Situation on the Territory of Russia and Neighbouring Countries in 2023. Year-book. Obninsk, Scientific and Production Association Typhoon Publ., 2024, 347 p. (in Russian).
11. SanPiN 2.6.1.2800-10. Radiation Safety Requirements for Population Exposure to Natural Sources of Ionizing Radiation (in Russian).
12. Bahur A.E. Scientific and Methodological Foundations of Radioecological Assessment of the Geological Environment. Abstract Diss. Dr. Sci. (Geol.-Mineral.). Moscow, 2008, 48 p. (in Russian).
13. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Sources. New York, 2000, 657 p.
14. 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>

### Authors

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

Tatiana V. Melnikova, Associate Professor, Department of Nuclear Physics and Technology,  
Cand. Sci. (Chemistry),  
E-mail: [tritell2010@gmail.com](mailto:tritell2010@gmail.com)

Daniil A. Minakov, Master's student, the Department of Nuclear Physics and Technologies,  
E-mail: [daminakov17@gmail.com](mailto:daminakov17@gmail.com)

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

Lyudmila A. Kiseleva, Head of the Laboratory, Department of Nuclear Physics and  
Technology,  
E-mail: [kiseleva-lusya@mail.ru](mailto:kiseleva-lusya@mail.ru)

Maria A. Shpilko, engineer-researcher,  
E-mail: [shpilkoma@oiate.ru](mailto:shpilkoma@oiate.ru)