

УДК 502.175:621.039.7(285.2:470.54)
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4756
Шифр специальности ВАК: 1.5.1
Научная статья

Первые результаты радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС после перевода БН-800 на МОКС-топливо

А.В. Панов^{1✉}, А.В. Коржавин², Т.Н. Коржавина²

¹ Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, г. Обнинск

² Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

✉ riar@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью получения новых фактических данных о влиянии на человека и окружающую среду ядерных реакторов с новым типом топлива. Белоярская АЭС – единственная в мире электростанция, перешедшая на новую технологическую платформу замыкания ядерного топливного цикла. Получены первые результаты радиоэкологического мониторинга Белоярского водохранилища после полного перевода блока БН-800 на МОКС-топливо. *Цель:* радиоэкологическая оценка состояния водоема-охладителя Белоярской АЭС при переводе энергоблока БН-800 на МОКС-топливо. *Объекты:* поверхностная вода и макрофиты, наиболее быстро и информативно реагирующие на изменение радиационной обстановки. *Методы.* Пробы воды отбирались в реперных точках водоема-охладителя, а выбор вида водных растений зависел от места их естественного произрастания. Радиохимические, радиометрические и гамма-спектрометрические исследования выполнялись по аттестованным методикам. *Результаты.* Перевод 4-го энергоблока Белоярской АЭС на МОКС-топливо не сопровождался увеличением радиационной нагрузки на экосистему водоема-охладителя. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде сбросного канала БН-800 от начала его эксплуатации и до полного перевода на МОКС-топливо значимо не изменилось и составило по ^{137}Cs 6,4 и 5,6 мБк/л, по ^{90}Sr 17,0 и 18,0 мБк/л, соответственно. Также в этот период не отмечено повышения накопления техногенных радионуклидов в водных растениях сбросного канала 4-го энергоблока: рдесте гребенчатом и роголистнике темно-зеленом. Представленные данные показывают высокую степень экологической безопасности новой технологии по выработке электроэнергии на Белоярской АЭС.

Ключевые слова: Белоярская АЭС, БН-800, МОКС-топливо, водоем-охладитель, радиоэкологический мониторинг

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, тема № АААА-А19-119032090023-0.

Для цитирования: Панов А.В., Коржавин А.В., Коржавина Т.Н. Первые результаты радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС после перевода БН-800 на МОКС-топливо // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 19–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4756

UDC 502.175:621.039.7(285.2:470.54)
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4756
Scientific paper

First results of the radioecological monitoring of the Beloyarskaya NPP cooling pond after the BN-800 unit conversion to MOX-fuel

A.V. Panov^{1✉}, A.V. Korzhavin², T.N. Korzhavina²

¹ Obninsk Institute of Nuclear Energy – a branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University "MEPhI" (IATE NRNU MEPhI), Obninsk, Russian Federation

² Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural Branch, Ekaterinburg, Russian Federation

✉ riar@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to obtain new factual data on the impact of the nuclear reactors with a new type of fuel on humans and the environment. Beloyarskaya NPP is the only power plant in the world that has switched to a new technological platform for closing the nuclear fuel loop. The first results of the radioecological monitoring of the Beloyarsk reservoir were obtained after the complete conversion of the BN-800 unit to MOX-fuel. **Aim.** Radioecological assessment of the cooling pond of the Beloyarskaya NPP state during the BN-800 power unit conversion to MOX-fuel. **Objects.** Surface water and macrophytes, which respond most quickly and informatively to changes in the radiation situation. **Methods.** Water samples were taken at reference points of the cooling pond, and the choice of the aquatic plant species depended on the place of their natural growth. Radiochemical, radiometric, and gamma spectrometric studies were carried out according to certified methods. **Results.** The transfer of the 4th power unit of the Beloyarskaya NPP to MOX-fuel was not accompanied by an increase in the radiation load on the cooling pond ecosystem. The content of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the BN-800 discharge channel water from the start of its operation until its complete conversion to MOX-fuel did not change significantly and amounted to 6.4 and 5.6 mBq/L for ¹³⁷Cs, 17.0 and 18.0 for ⁹⁰Sr mBq/L, respectively. During this period, there was no increase in the accumulation of technogenic radionuclides in the aquatic plants of the discharge channel of the 4th power unit: fennel-leaved pondweed and dark green hornwort. The presented data show a high degree of environmental safety of the new technology for generating electricity at the Beloyarskaya NPP.

Keywords: Beloyarskaya NPP, BN-800, MOX-fuel, cooling pond, radioecological monitoring

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural Branch, topic no. AAAA-A19-119032090023-0.

For citation: Panov A.V., Korzhavin A.V., Korzhavina T.N. First results of the radioecological monitoring of the Beloyarskaya NPP cooling pond after the BN-800 unit conversion to MOX-fuel. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 19–28. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/4756

Введение

Решение экологических проблем является важным звеном в дальнейшем развитии ядерной энергетики. В настоящее время атомная промышленность принадлежит к числу безопасных и перспективных источников получения энергии [1]. Основным требованием Международных стандартов безопасности МАГАТЭ является прямое подтверждение отсутствия негативного воздействия ядерных установок на человека и окружающую среду [2]. Наиболее надежным средством, позволяющим дать адекватное обоснование безопасности атомных электростанций, является внедрение радиоэкологического мониторинга в регионах их расположения [3, 4].

Белоярская атомная станция (БАЭС) является единственной в стране АЭС с разными типами ре-

акторов. Первая очередь станции состоит из энергоблоков № 1 и 2 с реакторами на тепловых нейтронах типа АМБ, которые в 1981 и 1989 гг. были остановлены и находятся на стадии снятия с эксплуатации. В настоящее время на БАЭС действуют два реактора на быстрых нейтронах: энергоблок № 3 с реактором типа БН-600 с жидкотеплоносителем, и в октябре 2016 г. сдан в промышленную эксплуатацию энергоблок № 4 с реактором БН-800.

Водоемом-охладителем для БАЭС является Белоярское водохранилище, созданное в период 1959–1963 гг. путем перекрытия русла реки Пышмы. Протяженность водоема составляет около 20 км при ширине до 3 км, общая площадь водного зеркала равна 47 км². В водоем-охладитель с дей-

ствующей АЭС открывается ряд технических каналов. Так, сброс воды, используемой в системе охлаждения АЭС, с первых двух энергоблоков (АМБ-100, АМБ-200) и с БН-600 обратно в водоем-охладитель осуществляется через водосбросный канал в Теплый залив. Кроме водосбросного канала радиоактивные вещества в водоем-охладитель могли поступать с жидкими сбросами через промливневый и обводной каналы [5]. В начальный период работы БАЭС было отмечено повышенное поступление радионуклидов станционного происхождения в водохранилище [6].

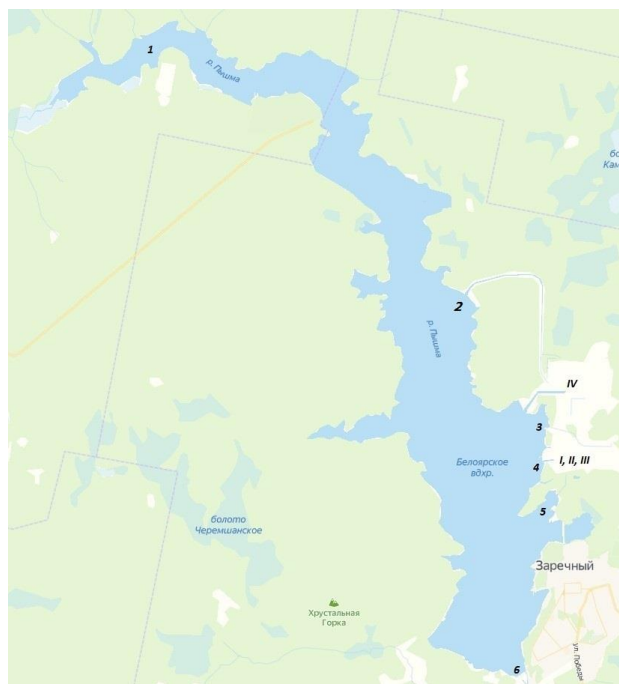
Энергоблок БН-800, в отличие от первой очереди (АМБ-100, АМБ-200) и БН-600, сооружен на другой промплощадке и соединен с Белоярским водохранилищем отдельными заборным и сбросным каналами, что дает возможность объективно оценить уровень воздействия его на водоем-охладитель. Первые результаты о влиянии блока БН-800 на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя были получены в 2017 г., то есть сразу после ввода энергоблока в промышленную эксплуатацию [7]. В настоящей работе эти данные использованы как исходные для последующей оценки влияния энергоблока на радиоэкологическое состояние водоема.

В 2020 г. в БН-800 были загружены первые 18 тепловыделяющих сборок с МОКС-топливом (от английского МОХ – mixed-oxide fuel – смесь оксидов урана и плутония). К январю 2022 г. активная зона БН-800 на две трети была заполнена уран-плутониевым топливом, а 22 сентября 2022 г. реактор полностью перешел на МОКС-топливо [8]. Экспериментальные энергоблоки на быстрых нейтронах возводятся также в Индии (PFBR) [9], Китае (CFR-600) [10, 11], есть наработки в Японии [12]. В Китае в 2011 г. состоялся энергопуск экспериментального быстрого реактора CEFR, сейчас строится демонстрационный блок с CFR-600. Однако БАЭС в настоящее время является самым мощным в мире действующим промышленным бридером, который работает на МОКС-топливе [13]. Перевод блока БН-800 на новый вид топлива призван значительно пополнить топливную базу атомной энергетики за счет внедрения замкнутого ядерного топливного цикла, при этом сведя к минимуму образование радиоактивных отходов [14]. Поскольку БАЭС – единственная электростанция, перешедшая на новую технологическую платформу, получено еще мало фактических данных о влиянии на человека и окружающую среду реакторов с новым типом топлива. Представленная работа является логическим продолжением мониторинговых исследований, начатых в 2017 г. по оценке безопасности энергоблока БН-800 на разных этапах его эксплуатации.

Цель настоящей работы – дать радиоэкологическую оценку состояния водоема-охладителя Белоярской АЭС при переводе БН-800 на МОКС-топливо.

Материалы и методы

Проанализированы результаты радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя БАЭС в период 2017–2023 гг. Объектами исследования являлись компоненты водной экосистемы, наиболее быстро и информативно реагирующие на изменение радиационной обстановки – поверхностная вода и макрофиты (водные растения). Пункты наблюдения сети мониторинга (рис. 1) установлены на всем протяжении водохранилища от верховья (№ 1) до плотины (№ 6), в местах вероятного поступления радионуклидов БН-800 в водоем-охладитель (№ 2 и 3) и зоны контроля БАЭС (№ 4 и 5).



дой. Для предотвращения сорбции радионуклидов на стенках емкостей пробы консервировали методом подкисления. Пробоподготовка в лабораторных условиях включала фильтрование и выпаривание до сухого остатка. Полученный остаток озоляли в муфельной печи при $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$ на протяжении 8 часов. Золу после остывания растирали пестиком до мелкодисперсного порошка [15].

Выбор вида макрофитов зависел от места их естественного произрастания и погодных условий, сложившихся в период отбора проб. Были отобраны три вида водных растений: ряска малая, роголистник темно-зеленый, рдест гребенчатый. Макрофиты отбирали по 3–5 кг сырой массы на повторность. Растения отмывали от загрязнений, взвешивали и высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего озоляли в муфельной печи при $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Гамма-спектрометрические, радиохимические и радиометрические анализы выполнялись по аттестованным методикам.

Измерение удельной активности ^{137}Cs выполнялось на полупроводниковом гамма-спектрометре «DSPEC-jr» фирмы «Ortec» с коаксиальной детекторной системой на базе высокоочищенного германия (HPGe) с эффективностью 40 % при ошибке измерения не более 10 % и нижнем пределе обнаружения с учетом концентрирования воды 1,0 мБк/л.

Определение удельной активности ^{90}Sr в образцах с низкой активностью проводили после радиохимической подготовки в соответствии с аттесто-

ванной методикой, основанной на приготовлении счетного образца, содержащего дочерний продукт распада (^{90}Y), последовательным химическим концентрированием его из пробы и хроматографическим отделением с последующим измерением активности иттрия в счетном образце на низкофоновом бета-радиометре УМФ-2000. Нижний предел обнаружения ^{90}Sr с учетом концентрирования воды составляет 5,0 мБк/л при статистической ошибке измерения не более 10 %.

Количественное определение ^3H в пробах воды проводили на жидкостинтиляционном спектрометрическом комплексе СКС-07П-Б11 в соответствии с методикой выполнения измерений активности альфа-, бета-излучающих радионуклидов.

Достоверность результатов достигалась параллельным отбором и исследованием образцов воды и макрофитов в 2–3 параллельных пробах. Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и среднего квадратичного отклонения. Оценку достоверности различий данных, полученных в период мониторинга, проводили с использованием t -критерия Стьюдента для независимых выборок с уровнем статистической значимости 0,05.

Результаты исследования и их обсуждение

В 2021–2023 гг. концентрация ^{137}Cs в воде водохранилища колебалась в пределах 1,0–7,0 мБк/л (рис. 2).

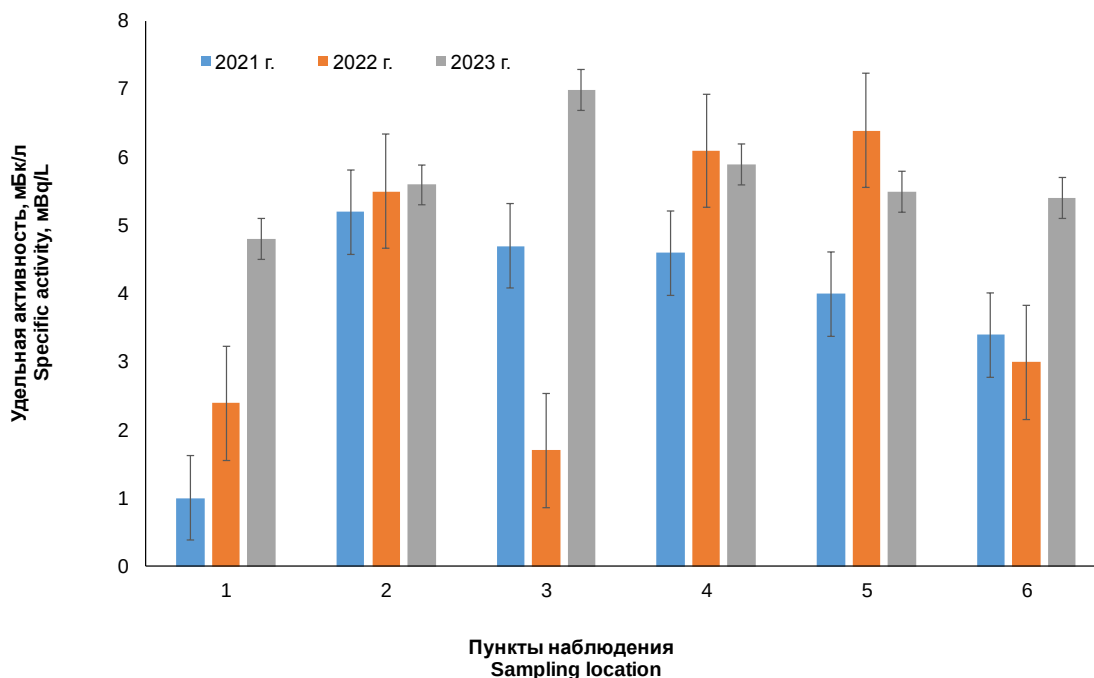


Рис. 2. Содержание ^{137}Cs в воде Белоярского водохранилища в период 2021–2023 гг.: 1 – верховье водоема; 2 – сбросной канал БН-800; 3 – заборный канал БН-800; 4 – Биофизическая станция; 5 – Теплый залив; 6 – район плотины

Fig. 2. ^{137}Cs content in the water of the Beloyarsk cooling pond for 2021–2023: 1 – upper part of the reservoir; 2 – BN-800 discharge channel; 3 – BN-800 intake channel; 4 – Biophysical station; 5 – Teply Bay; 6 – area of the dam

Если учесть, что уровень вмешательства (УВ) согласно НРБ 99/2009 [16] для ^{137}Cs в воде составляет 11,0 Бк/кг, то полученные значения на три порядка ниже лимита для данного радионуклида. Согласно данным Уральского УГМС [17] среднегодовые удельные активности ^{137}Cs в Белоярском водохранилище составили: в 2021 г. – 11 мБк/л, в 2022 г. – 4 мБк/л. По результатам наших исследований усредненные по шести точкам значения удельной активности ^{137}Cs в 2021 г. равны $3,2 \pm 1,6$ мБк/л, в 2022 г. – $4,2 \pm 2,1$ мБк/л. Таким образом, наши результаты за 2022 г. полностью совпали с данными, представленными в ежегоднике НПО «Тайфун», а по 2021 г. есть некоторые расхождения данных. При этом следует учесть, что, во-первых, в ежегоднике представлены только среднегодовые значения содержания ^{137}Cs без указания времени и мест отбора, а во-вторых, по их данным имеется значительная разница в 2,8 раза по содержанию ^{137}Cs в воде водоема в 2021 и 2022 гг. Пробы в настоящем исследовании отобраны только в летний период, примерно в одно и то же время, поэтому были получены результаты более близкие по значению, разница не превышает величины статистической погрешности.

В верховье водоема (пункт наблюдения № 1) содержание ^{137}Cs в воде находилось в диапазоне 1,0–4,8 мБк/л, что можно считать фоновым уровнем, поскольку в расположенной выше части реки Пышмы отсутствуют источники сброса техногенных радионуклидов. В пункте наблюдения № 6 у плотины водохранилища, характеризующей интегральный сброс радиоактивности из водоема-охладителя, содержание ^{137}Cs отмечено на уровне 3,0–5,4 мБк/л. В остальных пунктах наблюдения, расположенных на всем протяжении водоема, удельная активность ^{137}Cs в воде находилась в пределах 1,7–7,0 мБк/л. В течение трехлетнего периода наблюдений содержание ^{137}Cs в воде водоема-охладителя изменялось в узкой области тысячных долей Бк/л. Такие уровни можно считать не существенными и не оказывающими негативного влияния на радиэкологическое состояние водоема-охладителя БАЭС. Для оценки количества радиоактивности в составе стоков с БН-800 более информа-

тивными являются пункты наблюдения, установленные в районе сбросного канала (№ 2) и заборного канала (№ 3). В районе сбросного канала содержание ^{137}Cs в течение трехлетнего периода наблюдения было достаточно стабильным, изменялось в пределах 5,2–5,6 мБк/л (в среднем $5,4 \pm 0,21$ мБк/л). В районе заборного канала содержание радиоцезия колебалось в более широких пределах – 1,7–7,0 мБк/л, что свойственно для открытой части водоема. Среднее значение за три года в этой точке составило $4,5 \pm 2,7$ мБк/л. Таким образом, результаты мониторинга подтверждают, что по содержанию ^{137}Cs в воде указанные точки отбора проб не имеют достоверных различий, что свидетельствует об отсутствии значимого поступления радионуклида с 4-го блока атомной станции в водоем-охладитель.

Содержание ^{90}Sr в воде водоема-охладителя находилось в пределах 7,0–24,0 мБк/л. Согласно официальным данным Уральского УГМС [20], среднегодовая удельная активность ^{90}Sr в 2021 г. была равна 10 мБк/л, в 2022 г. – 11 мБк/л, что согласуется с нашими результатами. В летний период 2021 г. среднее содержание ^{90}Sr в водоем-охладителе было равно $15,7 \pm 6,4$ мБк/л, в 2022 г. – $11,3 \pm 3,4$ мБк/л. Кроме того, в ежегоднике НПО «Тайфун» содержание ^{90}Sr в водоеме, в отличие от ^{137}Cs , представлено более подробно, есть данные отдела радиационной безопасности Белоярской АЭС (ОРБ БАЭС) по отдельным точкам, а также средние значения за 5 лет. Наибольший интерес представляют точки, совпадающие с нашей схемой исследования. Сравнительная оценка этих данных представлена в табл. 1.

Из материалов табл. 1 следует, что между результатами ОРБ БАЭС и нашими данными нет существенных различий, а если учесть, что неопределенность измерений у ОРБ БАЭС составляет ± 20 –45 % [17], то полученные значения можно считать близкими друг другу.

Результаты исследований за 2021–2023 гг. (рис. 3) демонстрируют стабильно низкие значения содержания ^{90}Sr (7,0–10 мБк/л) в воде верховья водохранилища (№ 1) на протяжении всего периода наблюдений.

Таблица 1. Сравнительная оценка данных по содержанию ^{90}Sr в воде Белоярского водохранилища, мБк/л

Table 1. Comparative assessment of data on the content of ^{90}Sr in the water of the Beloyarsk cooling pond, mBq/L

Место отбора проб Sampling location	ОРБ БАЭС/RSD BNPP [20]			ИЭРиЖ УрО РАН/IPAE UB RAS		
	2021	2022	Средние за 5 лет Average for 5 years	2021	2022	Средние за 3 года Average for 3 years (2021–2023)
Верховье Белоярского водохранилища Upper part of the Beloyarsk cooling pond	13	19	13	9	7	8,6
Заборный канал блока № 4 Intake channel of block no. 4	14	15	10	12	11	13,7
Сбросной канал блока № 4 Discharge channel of block no. 4	9	18	12	15	17	16,7

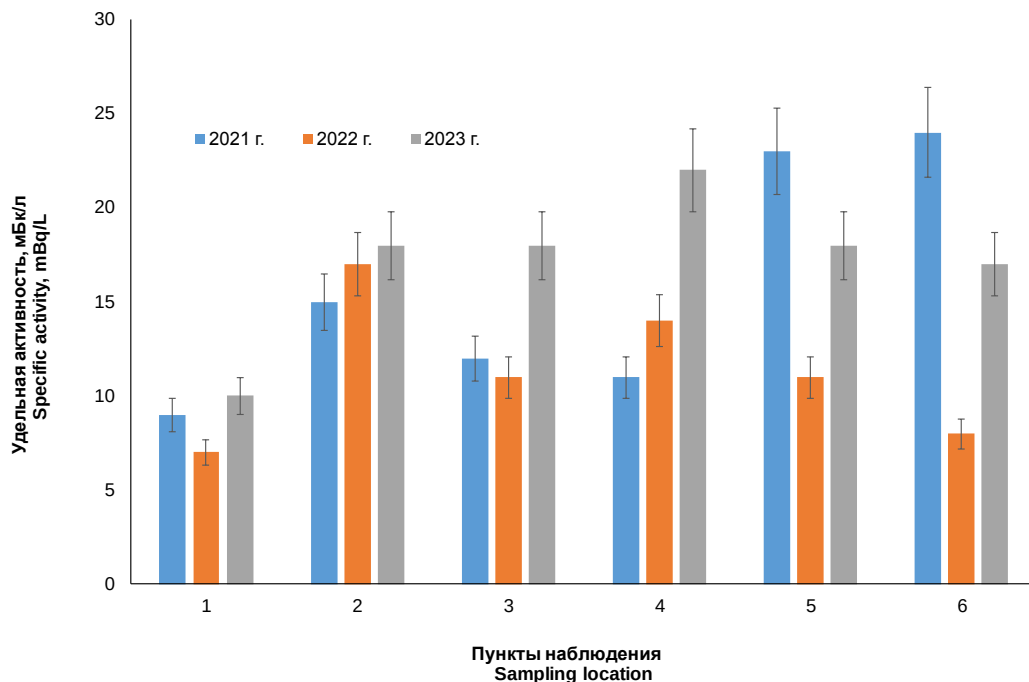


Рис. 3. Содержание ^{90}Sr в воде Белоярского водохранилища в период 2021–2023 гг.: 1 – верховье водоема; 2 – сбросной канал БН-800; 3 – заборный канал БН-800; 4 – Биофизическая станция; 5 – Теплый залив; 6 – район плотины
Fig. 3. ^{90}Sr content in the water of the Beloyarsk cooling pond for 2021–2023: 1 – upper part of the reservoir; 2 – BN-800 discharge channel; 3 – BN-800 intake channel; 4 – Biophysical station; 5 – Teply Bay; 6 – area of the dam

В точке интегрального сброса вод из водоема-охладителя (№ 6) содержание радионуклида в воде изменялось от 8,0 до 24,0 мБк/л. На остальной части водоема-охладителя концентрация ^{90}Sr в воде отмечена в пределах 11,0–23,0 мБк/л, то есть в 1,6–2,3 раза выше, чем в верховье. УВ для питьевой воды по ^{90}Sr в соответствии с НРБ-99/2009 составляет 4,9 Бк/кг. Таким образом, содержание радиоизотопа стронция в воде водоема-охладителя на два-три порядка ниже установленного лимита. Вблизи БАЭС минимальные значения концентрации радионуклида в воде (11,0 мБк/л) зафиксированы в 2021 г. в районе Биофизической станции (№ 4), в 2022 г. такие же значения отмечены в районе заборного канала 4-го энергоблока (№ 3) и в Теплом заливе водохранилища (№ 5). Максимальные уровни отмечены в 2021 г. (23,0 мБк/л) в воде Теплого залива (№ 5) и в 2023 г. (22,0 мБк/л) в районе Биофизической станции (№ 4).

В целом незначительные колебания содержания ^{90}Sr в воде год от года не связаны с определенными участками отбора проб на водоеме и не вызваны внешним воздействием атомной станции. Характерно, что в 2023 г., после полного перевода энергоблока БН-800 на МОКС-топливо содержание радиостронция в воде заборного и сбросного каналов 4-го энергоблока было одинаковым и составляло 18,0 мБк/л, что свидетельствует об отсутствии значимого поступления радионуклида со сбросными водами БН-800.

На рис. 4 показано достаточно равномерное (в диапазоне 21–32 Бк/л) распределение ^3H в воде водоема-охладителя в 2023 г. Представленные данные хорошо согласуются с результатами ОРБ БАЭС [17]. Так, согласно последним опубликованным данным ОРБ БАЭС за 2022 г., содержание ^3H в разных точках водоема-охладителя колебалось в пределах от 10,5 Бк/л (верховье водоема) до 31,5 Бк/л (промливневый канал).

Наши результаты показывают, что в 2023 г. максимальное содержание радионуклида отмечено в районе Биофизической станции (№ 4) – 32 Бк/л. В верховье водоема (№ 1) и у плотины (№ 6) содержание ^3H в воде минимальное – 21 Бк/л. В районе сбросного и заборного каналов 4-го энергоблока уровни содержания трития были очень близки (23 и 25 Бк/л, соответственно), что исключает значимое поступление радионуклида в водоем-охладитель со сбросными водами БН-800. Стоит отметить, что для разных регионов России уровень содержания трития в водных средах варьирует в пределах 4–7 Бк/л, в среднем ~ 5 Бк/л [18]. При этом УВ для ^3H в питьевой воде достаточно высокий и составляет 7600 Бк/кг [16].

На рис. 5 в сравнительном аспекте представлены результаты мониторинга водоема-охладителя в ближней зоне влияния БН-800 (№ 2–6) в 2017 г. сразу после ввода энергоблока в эксплуатацию [8] и в 2023 г. после его полного перевода на МОКС-топливо.

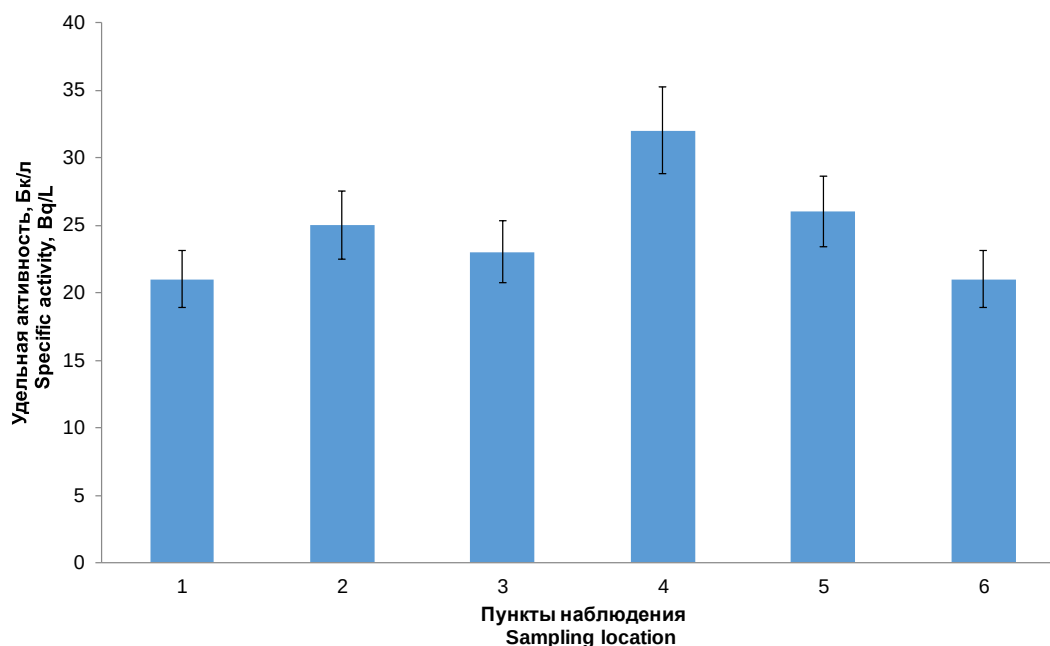


Рис. 4. Содержание ^3H в воде Белоярского водохранилища в 2023 г.: 1 – верховье водоема; 2 – сбросной канал БН-800; 3 – заборный канал БН-800; 4 – Биофизическая станция; 5 – Теплый залив; 6 – район плотины

Fig. 4. ^3H content in the water of the Beloyarsk cooling pond in 2023: 1 – upper part of the reservoir; 2 – BN-800 discharge channel; 3 – BN-800 intake channel; 4 – Biophysical station; 5 – Teply Bay; 6 – area of the dam

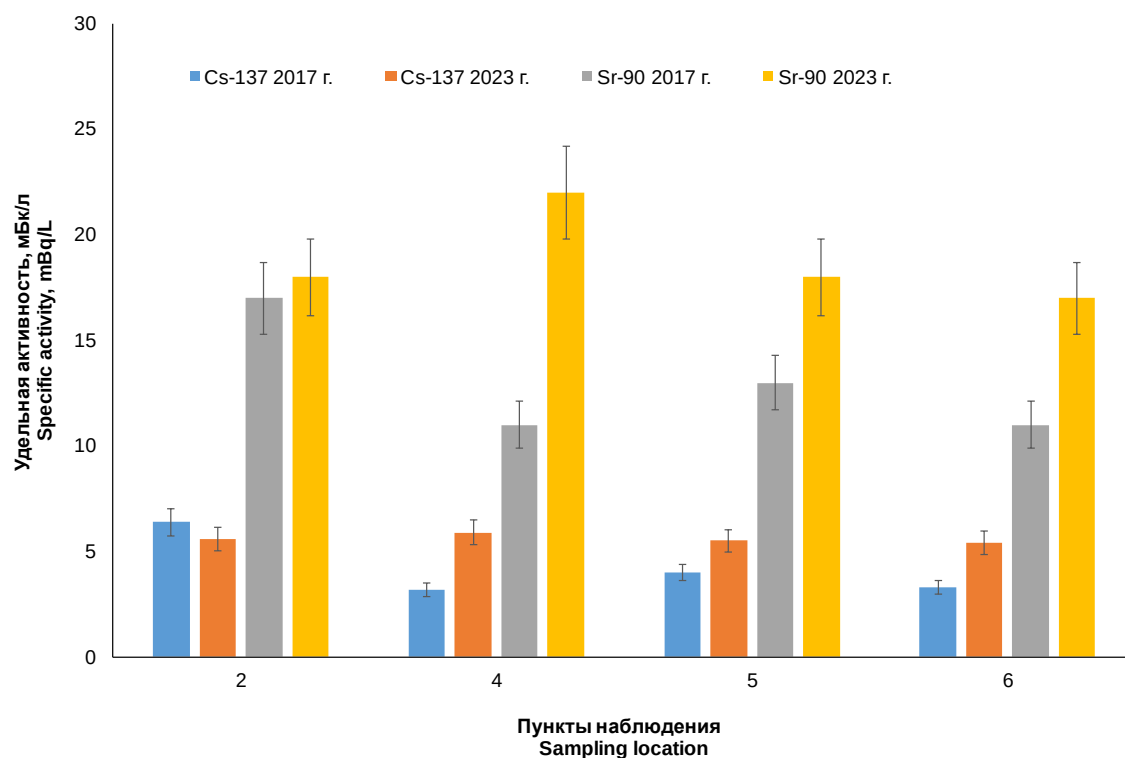


Рис. 5. Сравнительная оценка содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде Белоярского водохранилища на этапе ввода в эксплуатацию БН-800 (2017 г.) и после его перевода на МОКС-топливо (2023 г.): 2 – сбросной канал БН-800; 4 – Биофизическая станция; 5 – Теплый залив; 6 – район плотины

Fig. 5. Comparative assessment of ^{90}Sr and ^{137}Cs content in the water of the Beloyarsk cooling pond at the stage of commissioning of BN-800 (2017) and after its conversion to MOX fuel (2023): 2 – BN-800 discharge channel; 4 – Biophysical station; 5 – Teply Bay; 6 – area of the dam

Таблица 2. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в водных растениях Белоярского водохранилища, Бк/кг

Table 2. ^{137}Cs and ^{90}Sr content in aquatic plants of the Beloyarsk cooling pond, Bq/kg

Место отбора Sampling location	Вид растения Type of plant	2017		2021		2022		2023	
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
1	Роголистник темно-зеленый Hornwort dark green	–	–	3,5	119,7	–	–	–	–
	Ряска малая Duckweed small	–	–	–	–	48,2	2,2	–	–
2	Роголистник темно-зеленый Hornwort dark green	–	–	–	–	7,6	2,9	17,6	7,0
	Рдест гребенчатый Crest ridge	10,8	14,6	10,2	23,8	–	–	–	–
4	Роголистник темно-зеленый Hornwort dark green	12,1	12,2	16,4	146,7	65,6	9,8	60,7	10,4
6	Рдест гребенчатый Crest ridge	33,5	20,3	53,4	141,9	53,4	2,26	–	–

Показано, что на протяжении шестилетнего периода наблюдения в пробах воды из сбросного канала 4-го энергоблока БАЭС (№ 2) содержание основных долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr практически не изменилось: по ^{137}Cs на уровне 6,4 и 5,6 мБк/л, по ^{90}Sr в пределах 17 и 18 мБк/л, соответственно. На других реперных точках (в районе Биофизической станции, Теплого залива и у плотины) отмечено некоторое увеличение содержания указанных радиоизотопов, однако оно незначительное и находится в диапазоне сформировавшегося за многие годы техногенного фона в водных экосистемах Уральского региона и водоема-охладителя БАЭС [6, 7].

Водные растения (макрофиты) способны накапливать в тканях техногенные радионуклиды, поступающие из водной среды, в количествах, во много раз превышающих их содержание в воде [19, 20]. Динамика накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr в водных растениях водоема-охладителя после пуска блока БН-800 (2017 г.) и последующего его перевода на МОКС-топливо (2021–2023 гг.) представлена в табл. 2.

В районе сбросного канала 4-го энергоблока (№ 2) в достаточном количестве были отобраны два вида водных растений: рдест гребенчатый и роголистник темно-зеленый. Преобладание того или иного вида в разные годы может зависеть от многих факторов, в том числе и от погодных условий. Так, в 2017 и 2021 гг. в этом пункте наблюдения отобраны пробы рдеста гребенчатого, а в 2022 и 2023 гг. – роголистника темно-зеленого. Результаты мониторинга подтверждают, что, несмотря на разные виды растений, уровни содержания в них техногенных радионуклидов близки, а главное существенно не изменились с момента запуска БН-800 и до перевода его на МОКС-топливо.

В количественном отношении содержание техногенных радионуклидов в макрофитах из района сбросного канала 4-го энергоблока БАЭС сопоставимо с содержанием в других пунктах наблюдения,

а по сравнению с некоторыми годами даже ниже. Так, в 2021 г. содержание ^{90}Sr в роголистнике темно-зеленом в верховье водохранилища составило 120 Бк/кг, в районе Биофизической станции – 147 Бк/кг, в рдесте гребенчатом в районе плотины – 142 Бк/кг, при этом в сбросном канале 4-го энергоблока – 24 Бк/кг. Таким образом, результаты наблюдений не фиксируют повышенного накопления техногенных радионуклидов в водных растениях сбросного канала БН-800 после перевода его на МОКС-топливо и, следовательно, негативного влияния новой технологии выработки электроэнергии на экосистему водохранилища.

Заключение

Первые результаты радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС после перевода реактора БН-800 на МОКС-топливо позволяют положительно оценить внедрение в атомную энергетику технологии замыкания топливного цикла. Так, содержание основных долгоживущих радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде сбросного канала БН-800 после его перевода на МОКС-топливо, по сравнению с начальным периодом эксплуатации энергоблока, практически не изменилось и составило по ^{137}Cs 6,4 и 5,6 мБк/л, по ^{90}Sr 17 и 18 мБк/л, соответственно. Это свидетельствует об отсутствии значимого поступления указанных радиоизотопов в водоем-охладитель после внедрения новой технологической платформы на 4-м энергоблоке БАЭС.

Результаты исследования проб водных растений сбросного канала 4-го энергоблока рдеста гребенчатого и роголистника темно-зеленого также подтверждают отсутствие радиоактивных сбросов с БН-800 в водоем-охладитель. Несмотря на разные виды растений, уровни содержания в них техногенных радионуклидов за период с 2017 по 2023 гг. были количественно близки и не существенно изменились за время работы энергоблока БН-800 на

МОКС-топливе. Все эти данные говорят о высокой степени экологичности новой технологии выработки электроэнергии на БАЭС. В то же время необходимо продолжение работ по радиозэкологическо-

му мониторингу как водных, так и наземных экосистем с целью оценки динамики радиационной обстановки в зоне влияния Белоярской АЭС в условиях ее работы на новом типе топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленая книга ядерной энергетики / под ред. Е.О. Адамова. – М.: АО «НИКИЭТ», 2024. – 232 с.
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. – Vienna: IAEA, 2014. – No. GSR. – Part 3. – 436 p.
3. Радиозэкологический мониторинг и его роль в обеспечении безопасности атомных электростанций / С.В. Фесенко, Н.И. Санжарова, Е.И. Карпенко, Н.Н. Исамов, В.К. Кузнецов, А.В. Панов, П.Н. Цыгвинцев // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 4. – С. 19–30.
4. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / U. Lee, C. Lee, M. Kim, H.R. Kim // Nuclear Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 51. – P. 1626–1632.
5. Радиозэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. – Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука», 2019. – Т. IV. – 448 с.
6. Influence of operation of thermal and fast reactors of the Beloyarsk NPP on the radioecological situation in the cooling pond. Part 1: Surface water and bottom sediments / A. Panov, A. Trapeznikov, V. Trapeznikova, A. Korzhavin // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – Vol. 54. – № 8. – P. 3034–3042.
7. Первые результаты радиозэкологического исследования водоема–охладителя Белоярской АЭС после ввода в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 / А.В. Коржавин, В.Н. Трапезникова, А.В. Трапезников, В.Н. Николкин, А.П. Платаев // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2018. – № 2. – С. 70–83.
8. Расчетно-экспериментальный анализ нейтронно-физических характеристик БН-800 в период перехода на загрузку смешанным оксидным уран-плутониевым топливом / Д.А. Клинов, М.Ю. Семенов, Г.М. Михайлов, А.А. Перегудов, В.А. Мишин, Н.В. Соломонова, А.Н. Крюков, М.Р. Фаракин, С.Б. Белов, А.Е. Кузнецов, В.Н. Игнатьев, Г.Ю. Дубовой // Атомная энергия. – 2023. – Т. 135. – № 1–2. – С. 3–10.
9. Ramana M.V. India and fast breeder reactors // Science and Global Security. – 2009. – Vol. 17. – № 1. – P. 54–67.
10. Back-end of nuclear fuel cycle in China / J. Chen, W. Meng, L. Xuegang, W. Jianchen // Progress in Nuclear Energy. – 2012. – Vol. 54. – № 1. – P. 46–48.
11. Wang L., Ju H. Fuel Management Strategy Analysis of SMR ACP100 // Nuclear Engineering. – 2018. – № 39. – P. 157–159.
12. Hishida M., Murakami T., Konomura M. Progress on the plant design concept of sodium-cooled fast reactor // Toda M. Proc. of Intern. Conf. Nuclear Energy Systems for Future Generation and Global Sustainability (GLOBAL-2005). – Tsucuba, Japan, October 9–13 2005. – CD. – 2005. – № 068. – P. 1–6.
13. Реактор БН-800 полностью перешел на МОКС-топливо // Страна Росатом. Электронное периодическое издание. 09.09.2022. URL: <https://strana-rosatom.ru/2022/09/09/reaktor-bn-800-polnostju-pereshel-na-moks> (дата доступа 22.11.2023).
14. Обоснование проекта и состояние сооружения БН-800 / О.М. Сараев, Ю.В. Носков, Д.Л. Зверев, Б.А. Васильев, В.Ю. Судаков, В.М. Поплавский, А.М. Цибуля, В.Н. Ершов, С.Г. Знаменский // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – № 4. – С. 197–200.
15. ГОСТ Р 59024-2020. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Стандартинформ, 2020. – 39 с.
16. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523-09). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
17. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2022 г. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2023. – 346 с.
18. Чеботина М.Я. Мониторинг трития в водных средах Уральского региона. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2022. – 120 с.
19. Harvey R.S. Temperature affects on the sorption of radionuclides by freshwater algae // Health Phys. – 1970. – Vol. 19. – № 2. – P. 293–297.
20. Harvey R.S. Temperature effects on the sorption of ^{137}Cs , ^{85}Sr and ^{65}Zn by freshwater shrimp, radionuclides in ecosystems // Proc. 3th Nat. Symp. Radioecol. – Oak Ridge, TN, 10–12 May 1971. – Vol. 1. – P. 599–602.

Информация об авторах

Алексей Валерьевич Панов, доктор биологических наук, профессор РАН, и.о. директора Обнинского института атомной энергетики – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 249039, г. Обнинск, тер. Студгородок, 1, riar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9845-7572>

Александр Васильевич Коржавин, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник лаборатории общей радиозэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. BFS_zar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Татьяна Николаевна Коржавина, кандидат педагогических наук, старший инженер лаборатории общей радиозэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. t.n.korzhavina@mail.ru

Поступила в редакцию: 25.06.2024

Поступила после рецензирования: 05.07.2024

Принята к публикации: 08.04.2025

REFERENCES

1. *Green book of nuclear energy*. Ed. by E.O. Adamov. Moscow, JSC «NIKIET» Publ., 2024. 232 p. (In Russ.)
2. *The IAEA. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety Standards*. Vienna, IAEA, 2014. No. GSR, part 3, 436 p.
3. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko E.I., Isamov N.N., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Tsigvintsev P.N. Radioecological monitoring and its role in ensuring Nuclear Power Plants Safety. *News of universities. Nuclear energy*, 2021, no. 4, pp. 19–30. (In Russ.)
4. Lee U., Lee C., Kim M., Kim H.R. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019. vol. 51, pp. 1626–1632.
5. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. *Radioecological monitoring of freshwater ecosystems*. Ekaterinburg, AkademNauka Publ., 2019. Vol. IV, 448 p. (in Russ.)
6. Panov A., Trapeznikov A., Trapeznikova V., Korzhavin A. Influence of operation of thermal and fast reactors of the Beloyarsk NPP on the radioecological situation in the cooling pond. Part 1. Surface water and bottom sediments. *Nuclear Engineering and Technology*, 2022, vol. 54, no. 8, pp. 3034–3042.
7. Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Plataev A.P. First results of a radioecological study of the Beloyarskaya NPP cooling pond after the commissioning of the 4th power unit BN-800. *Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*, 2018, no. 2, pp. 70–83. (In Russ.)
8. Klinov D.A., Semenov M.Yu., Mikhaylov G.M., Peregudov A.A., Mishin V.A., Solomonova N.V., Kryukov A.N., Farakshin M.R., Belov S.B., Kuznetsov A.E., Ignatev V.N., Dubovoy G.Yu. Calculation and experimental analysis of the neutron-physical characteristics of BN-800 during the transition to loading with mixed uranium-plutonium oxide fuel. *Nuclear Energy*, 2023, vol. 135, no. 1–2, pp. 3–10. (In Russ.)
9. Ramana M. V. India and fast breeder reactors. *Science and Global Security*, 2009. vol. 17, no. 1, pp. 54–67.
10. Chen J., Meng W., Xuegang L., Jianchen W. Back-end of nuclear fuel cycle in China. *Progress in Nuclear Energy*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 46–48.
11. Wang L., Ju H. Fuel management strategy analysis of SMR ACP100. *Nuclear Engineering*, 2018. no. 39, pp. 157–159.
12. Hishida M., Murakami T., Konomura M., Toda M. Progress on the plant design concept of sodium-cooled fast reactor. *Proc. of Intern. Conf. Nuclear Energy Systems for Future Generation and Global Sustainability (GLOBAL-2005)*. Tsucuba, Japan, October 9–13 2005. CD, no. 068, pp. 1–6.
13. BN-800 reactor has completely switched to MOX-fuel. *Rosatom country. Electronic periodical*. 09.09.2022. (In Russ.) Available at: <https://strana-rosatom.ru/2022/09/09/reaktor-bn-800-polnostju-pereshel-na-moks> (accessed 22 November 2023).
14. Saraev O.M., Noskov Yu.V., Zverev D.L., Vasilev B.A., Sudakov V.Yu., Poplavskiy V.M., Tsibulya A.M., Ershov V.N., Znamenskiy S.G. Justification of the project and BN-800 construction state. *Nuclear Energy*, 2010, vol. 108, no. 4, pp. 197–200. (In Russ.)
15. SS R 59024-2020. *Water. General sampling requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 39 p. (In Russ.)
16. *Radiation safety standards (NRB-99/2009). Sanitary and epidemiological rules and regulations (SanPiN 2.6.1.2523-09)*. Moscow, Rospotrebnadzor Federal Center for Hygiene and Epidemiology Publ., 2009. 100 p. (In Russ.)
17. *Roshydromet, SPA "Typhoon". Radiation situation in Russia and neighboring countries in 2022*. Obninsk, FSBI "VNIIGMI-MCD" Publ., 2023. 346 p. (In Russ.)
18. Chebotina M.Ya. *Monitoring of tritium in aquatic environments of the Ural region*. Ekaterinburg, Ural University Pub., 2022. 120 p. (In Russ.)
19. Harvey R.S. Temperature affects on the sorption of radionuclides by freshwater algae. *Health Phys*, 1970, vol. 19, no. 2, pp. 293–297.
20. Harvey R.S. Temperature effects on the sorption of ¹³⁷Cs, ⁸⁵Sr and ⁶⁵Zn by freshwater shrimp, Radionuclides in ecosystems. *Proc. 3th Nat. Symp. Radioecol.* Oak Ridge, TN, 10–12 May 1971. Vol. 1, pp. 599–602.

Information about the authors

Alexey V. Panov, Dr. Sc., Professor RAS, Acting Director of the Obninsk Institute of Nuclear Energy – a branch of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Nuclear University "MEPhI", 1, Studgorodok territory, Obninsk, 249039, Russian Federation, riar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9845-7572>

Alexander V. Korzhavin, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural Branch, 202, 8 March street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation, BFS_zar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Tatyana N. Korzhavina, Cand. Sc., Senior Engineer, Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural Branch, 202, 8 March street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation, t.n.korzhavina@mail.ru

Received: 25.06.2024

Revised: 05.07.2024

Accepted: 08.04.2025