

ISSN 0204-3327

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ  
ЗАВЕДЕНИЙ

# ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Izvestiya vuzov.

Yadernaya Energetika



N2 2024

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР	<b>Ю.А.Казанский</b> , д.ф.-м.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
ЗАМ.ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА	<b>В.Л. Шаблов</b> , д.ф.-м.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
	<b>И.А. Чусов</b> , д.т.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА ПО РЕДАКЦИОННОЙ РАБОТЕ	<b>Н.М. Троянова</b> , к.ф.-м.н., Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ф. Д'Ауриа, профессор, Пизанский университет, Пиза, Италия  
Т.А. Бурцева, д.экон.н., доцент, МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва  
С.М. Дмитриев, д.т.н., профессор, Нижегородский государственный технический университет  
А.В. Зродников, д.ф.-м.н., профессор, АО ГНЦ «РФ – ФЭИ», г. Обнинск  
Ю.А. Коровин, д.ф.-м.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
И.И. Крышев, д.ф.-м.н., профессор, Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск  
К.А. Кутербеков, д.ф.-м.н., профессор, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,  
Астана, Республика Казахстан  
И.И. Лощаков, д.ф.-м.н., профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический  
университет  
Е.С. Матусевич, д.ф.-м.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
В.М. Мурогов, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Б.И. Нигматулин, д.т.н., профессор, Институт проблем естественных монополий, г. Москва  
В.А. Острейковский, д.т.н., профессор, Сургутский государственный университет, г. Сургут  
А.В. Панов, д.б.н., профессор РАН, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
И.Л. Пиоро, профессор, университет Онтарио, Онтарио, Канада  
В.И. Рачков, чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, АО «Прорыв», г. Москва  
М. Саито, профессор, Токийский технологический институт, Токио, Япония  
В.П. Смирнов, д.т.н., профессор, Научно-производственная фирма «Сосны», г. Димитровград  
В.А. Степанов, д.ф.-м.н., профессор, Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
М.Н. Стриханов, д.ф.-м.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
В.М. Троянов, д.т.н., научный руководитель АО ГНЦ «РФ – ФЭИ», г. Обнинск  
В.В. Харченко, чл.-корр НАН Украины, профессор, Институт проблем прочности, Киев, Украина  
А.Н. Шмелев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
С.Е. Щеклеин, д.т.н., профессор, Уральский федеральный университет – Уральский энергетический  
институт

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, национальную библиографическую базу данных РИНЦ и международную реферативную базу данных Ulrich's Periodical Directory. Журнал включен в международную наукометрическую базу данных Scopus.

Адрес учредителя и издателя: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31  
Адрес редакции: 249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, 1. ИАТЭ НИЯУ МИФИ, РИО  
Тел. +7 (484) 397-94-90 доб.132. E-mail: rio@iate.obninsk.ru <https://nuclear-power-engineering.ru/>

Подписной индекс в Объединенном каталоге «Пресса России» 27919  
ISSN 0204-3327, СМИ зарегистрировано Роскомнадзором.  
Свидетельство о регистрации ПИ No ФС77-66986 от 15.09.2016

Редактор З.И. Сныкова Верстка С.К. Девятилова

Отпечатано в типографии ООО «Рекорд Принт» (111020, г. Москва, ул. Боровая, д. 7, стр. 2, офис 25, 26)

Подписан к печати 30.05.2024	Формат 70x108/16	Печать офсетная
Бумага офсетная	Печ.л. 13,25	
Заказ	Тираж 400 экз.	Цена свободная

Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ»

ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ  
**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
Издается с 1993 г.

№ 2 2024 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*Троянов В.М., Гулевич А.В., Гурская О.С., Декусар В.М., Елисеев В.А., Мосеев А.Л.*  
О плутонии-241 и америции в двухкомпонентной системе  
ядерной энергетики ..... 8

**АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Лебезов А.А., Морозов А.В., Сахипгареев А.Р., Сошкина А.С., Шлепкин А.С.*  
Экспериментальное исследование свойств концентрированных растворов  
борной кислоты применительно к охлаждению реакторных установок ВВЭР ..... 19

**ФИЗИКА И ТЕХНИКА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

*Тузов А.А., Ижutow А.Л., Малков А.П., Петелин А.Л., Сазонтов С.А.*  
Реализация проекта по модернизации активной зоны реактора СМ-3 ..... 30

**ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕПЛОГИДРАВЛИКА**

*Кузина Ю.А., Сорокин А.П.*  
Актуальные вопросы моделирования теплогидравлических процессов  
в реакторах на быстрых нейтронах ..... 41

**ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ**

*Гаязов А.З., Лещенко А.Ю., Смирнов В.П., Звир Е.А., Ильин П.А., Теплов В.Г.*  
Исследование образования горючих газов и выхода радионуклидов  
при обращении с разрушенным ОЯТ ВВЭР во время и после осушки ..... 59

**БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ**

*Тузов А.А., Ижutow А.Л., Петелин А.Л., Гурьева М.Н., Сазонтов С.А., Винокуров В.С.*  
Разработка конструкции модернизированной центральной зоны реакторной  
установки СМ-3, принятые решения и обоснование ресурса эксплуатации ..... 74



*Пайдулов А.В., Малков А.П., Пименов В.В., Воробей А.О., Узиков В.А., Полякова Т.А.*  
 Обоснование безопасности модернизированного реактора СМ  
 и основные результаты выполнения программы экспериментальных  
 исследований при пуске ..... 83

*Перевозников С.В., Михин С.А., Камаев А.А., Пазин Г.Н., Мирзеабасов О.А.,  
 Мяздрикова О.И., Борисов В.В., Пахомов И.А.*  
 Расчетный анализ инцидента с большой течью воды в натрий  
 в парогенераторе РУ БН-600 ..... 93

## **МАТЕРИАЛЫ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

*Захарова М.И., Тарасиков В.П.*  
 Взаимодействие атомов замещения и внедрения между собой  
 и с радиационными дефектами в сплавах V-Fe при облучении  
 быстрыми нейтронами ..... 104

## **ХИМИЯ, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ**

*Алексеев В.В., Борисов В.В., Камаев А.А., Ганичев Н.С.*  
 Расчетное обоснование компонентного состава примесей  
 при взаимодействии воды с натрием ..... 112

*Ульянов В.В., Кошелев М.М., Кремлева В.С., Брагин Д.С., Приказчикова А.А.*  
 Особенности очистки и контроля натрий-калиевого эвтектического сплава ..... 127

## **ЭКОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*Панов А.В., Коржавин А.В., Коржавина Т.Н.*  
 Итоги многолетнего радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя  
 Белоярской АЭС ..... 138

## **ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ**

*Аверченкова Е.П., Дьяченко Я.В., Забродская С.В., Мантуров Г.Н., Мишин В.А.,  
 Панова Д.В., Перегудов А.А., Семенов М.Ю., Тормышев И.В., Ляпин Е.П.*  
 Формирование системы групповых констант для нейтронно-физических  
 расчетов реакторов на быстрых нейтронах на основе файлов библиотеки  
 РОСФОНД-2020.2 ..... 155

*Егоров Г.О., Левченко Ю.В., Мантуров Г.Н., Матвеев Ю.В.*  
 Расчетные исследования выгорания и накопления актиноидов  
 в топливе инновационного реактора с регулируемым спектром нейтронов ..... 170

*Исанов К.А., Колесов В.В., Коробейников В.В., Усанов В.И., Хныкина Е.С.*  
 Расчетные исследования замкнутого топливного цикла реактора типа ВВЭР-1200  
 на плутонии из отработавшего ядерного топлива ..... 185

*Фоломеев В.И., Ганина С.М., Астахова Н.Э.*  
 Моделирование перестройки структуры оксидного топлива  
 в первые часы после выхода реактора на мощность ..... 202



## ИТОГИ МНОГОЛЕТНЕГО РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

Панов А.В.<sup>1</sup>, Коржавин А.В.<sup>2</sup>, Коржавина Т.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1

<sup>2</sup> Институт экологии растений и животных УрО РАН,

620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202



Представлены результаты многолетнего (1976–2019 гг.) радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС. Изучено влияние сбросных технологических вод тепловых (АМБ-100 и АМБ-200) и быстрых (БН-600 и БН-800) реакторов АЭС на содержание техногенных радионуклидов в поверхностных водах, донных отложениях, макрофитах и ихтиофауне Белоярского водохранилища. Показано, что технология производства электроэнергии на Белоярской АЭС, основанная на быстрых реакторах, оказывает гораздо меньшее влияние на поступление техногенных радионуклидов в водную экосистему водохранилища. Представлена долговременная динамика удельной активности  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^3\text{H}$  в основных компонентах водной экосистемы на разном расстоянии от источника сброса радионуклидов. В течение всего периода мониторинговых исследований снижение удельной активности радионуклидов стационарного происхождения в поверхностных водах составило 4,3–74,5 раза, в донных отложениях – 10–505 раз, в макрофитах – 13–25800 раз, в ихтиофауне – 1,3–44,6 раза. Улучшение радиоэкологического состояния водоема-охладителя произошло в результате остановки эксплуатации тепловых реакторов первой очереди атомной станции (АМБ-100 и АМБ-200), а также за счет распада и перераспределения радиоизотопов из водной фазы в донные отложения и миграции с водным стоком из водохранилища в речную систему. Максимальный сброс техногенных радионуклидов в водохранилище отмечен в период проведения восстановительных и дезактивационных работ, направленных на устранение аварий на тепловых реакторах АМБ-100 и АМБ-200 первой очереди Белоярской АЭС.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, водоем-охладитель, радиоэкологический мониторинг, искусственные радионуклиды, многолетняя динамика.

**Для цитирования:** Панов А.В., Коржавин А.В., Коржавина Т.Н. Итоги многолетнего радиозэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 2. – С. 138–154. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.12>

## ВВЕДЕНИЕ

Белоярская атомная электростанция им. И.В. Курчатова является одной из старейших АЭС в России. Ее первая очередь включает в себя два энергоблока с реакторами на тепловых нейтронах АМБ-100 и АМБ-200, запущенные в 1964 и 1967 гг. Оба реактора остановлены более 30-ти лет назад и сейчас находятся на стадии вывода из эксплуатации. На реакторах АМБ впервые отработывались технологии и режимы работы по ядерному перегреву пара, новые конструктивные решения, оборудование и материалы, поэтому их эксплуатация сопровождалась значительным количеством отклонений и нарушений в работе, включая аварийные ситуации. Вторая очередь АЭС состоит из двух энергоблоков с реакторами, работающими на быстрых нейтронах: № 3 БН-600 работает с 1980 г. и № 4 БН-800 введен в действие в 2016 г., оба эксплуатируются в настоящее время. Энергоблок БН-800 с жидким натрием в качестве теплоносителя является на сегодняшний день крупнейшим в мире реактором на быстрых нейтронах. Серия реакторов на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) позволила значительно увеличить коэффициент использования ядерного топлива, что приближает атомную энергетику к замыканию ядерного топливного цикла [1, 2]. Кроме того в реакторах серии БН реализован принцип глубоководной защиты, основанный на комплексной системе барьеров и технических мер по минимизации воздействия выбросов и сбросов АЭС на человека и окружающую среду [1, 3]. В настоящее время на Белоярской АЭС идет подготовка к строительству пятого энергоблока с реактором БН-1200.

Для создания системы охлаждения реакторов и технического водоснабжения в 1959–1963 гг. на Белоярской АЭС путем зарегулирования русла р. Пышмы было создано Белоярское водохранилище [4]. Длина водоема-охладителя составляет 20 км, максимальная ширина 3 км напротив Белоярской АЭС. Глубина водоема достигает 24 м при средней – 7 м, площадь акватории – 38,6 км<sup>2</sup>. Полный объем водохранилища составляет 2,65·10<sup>8</sup> м<sup>3</sup>, норма естественного стока из него 2,8 м<sup>3</sup>/с [5]. Белоярское водохранилище является самой крупной водной экосистемой в районе размещения АЭС.

В течение почти полувека сотрудники лаборатории общей радиозэкологии ИЭРиЖ УрО РАН проводят систематические радиозэкологические исследования на Белоярском водохранилище – водоеме-охладителе БАЭС. Получен уникальный материал по миграции, накоплению и распределению основных дозообразующих радионуклидов (<sup>3</sup>H, <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs) в компонентах водоема. Результаты радиозэкологических исследований регулярно публикуются в научных статьях и монографиях. Данные о содержании радионуклидов в воде, растениях, рыбах, планктоне, грунтах Белоярского водохранилища в период с 1976 по 1988 гг. опубликованы в [6]. Приведены результаты многолетних исследований радиозэкологического состояния водоема-охладителя Белоярской АЭС за период с 1976 по 2007 гг. [6]. Показано, что после остановки 1 и 2 блоков БАЭС содержание <sup>60</sup>Co и <sup>137</sup>Cs в воде, донных отложениях, ихтиофауне и макрофитах Белоярского водохранилища снизилось в десятки и сотни раз [7]. Результаты радиозэкологических исследований водоема-охладителя Белоярской АЭС перед вводом в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 представлены в [8]. Первые результа-



ты радиоэкологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС после ввода в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 показаны в [9].

Представленный в монографиях и научных статьях материал, как правило, отражает определенный временной отрезок или связан с важными изменениями в технологии производства электроэнергии на Белоярской АЭС. В данной работе объединены и проанализированы материалы, полученные из разных источников, и впервые представлена общая многолетняя динамика изменения радиоэкологического состояния водоема-охладителя за весь период наблюдения (1976–2019 гг.). Объектами исследования стали основные компоненты водной экосистемы: поверхностная вода, донные отложения, макрофиты и ихтиофауна. Донные отложения в водохранилище представлены илистым сапропелем (преимущественно в глубоководной части), затопленной почвой, песчано-илистыми, илисто-песчаными и песчаными грунтами (преимущественно в прибрежной части).

В водоеме-охладителе обитают четыре вида зеленых водорослей и 25 видов высших водных растений, относящихся к 18-ти родам и 16-ти семействам. Сброс подогретых вод Белоярской АЭС в Теплый залив водохранилища способствует увеличению биомассы и продлению периода вегетации обитающих здесь растений. Подогретые сбросные воды АЭС также используются для разведения садкового карпа на данном участке водоема-охладителя [10, 11].

Ихтиофауна Белоярского водохранилища характеризуется восемью видами рыб: плотва (*Rutilus rutilus*), лещ (*Abramis brama*), линь (*Tinca tinca*), карась золотистый (*Carassius carassius*), карп (*Cyprinus carpio*), щука (*Esox lucius*), окунь (*Perca fluviatilis*), судак (*Sander lucioperca*) [12].

Целью настоящей работы является оценка накопления техногенных радионуклидов в компонентах экосистемы водоема-охладителя Белоярской атомной станции на основании анализа результатов многолетнего (1976–2019 гг.) радиоэкологического мониторинга.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При создании сети радиоэкологического мониторинга на водоеме-охладителе было выбрано шесть постоянных пунктов наблюдения (рис. 1), позволяющих дать комплексную характеристику содержания радионуклидов в компонентах водной экосистемы и учесть влияние Белоярской АЭС (табл. 1). Отбор проб компонентов водной экосистемы, пробоподготовку и измерения содержания в них радионуклидов проводили в соответствии с действующими в России нормативно-методическими документами [12, 13]. Пробы отбирали в двух-трех повторностях в летне-осенний период года [4].

Поверхностную воду отбирали в объеме 200 л на повторность. Пробы воды подкисляли для предотвращения сорбции радионуклидов на стенках сосудов, фильтровали, затем выпаривали. Сухой остаток озоляли при  $t = 450^\circ\text{C}$  в муфельной печи в течение восьми часов. После остывания остаток растирали пестиком до мелкодисперсного порошка.

Донные отложения отбирали с помощью специального пробоотборника с площадью сечения  $38,5 \text{ см}^2$  до глубины 20–30 см. Образцы 2–3 кг сырой массы высушивали до воздушно-сухого состояния, растирали, просеивали через сито диаметром 1 мм, а затем озоляли при  $t = 400–500^\circ\text{C}$  в муфельной печи в течение шести часов для удаления органической составляющей.

Макрофиты отбирали по 3–5 кг сырой массы на повторность. Растения отмывали от загрязнений, взвешивали и высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего озоляли при  $t = 450^\circ\text{C}$  в муфельной печи.

Рыбу примерно одного возраста (два-три года) обоих полов отлавливали сетями. Вес одной пробы составлял 3 кг сырой массы. Для разных видов рыб одна проба включала в себя в среднем: плотвы – 30, щуки – 3, леща – 4, линя – 22, карася – 20, карпа – 5 особей. Тушки рыб (без внутренних органов) подсушивали и озоляли при  $t = 450^{\circ}\text{C}$ .

В компонентах водной экосистемы  $\gamma$ -излучающие радионуклиды определяли инструментальными методами. В зависимости от энергетической линии радионуклида в 70-80-х годах измерения проводили на многоканальном амплитудном анализаторе АИ-256-6 со сцинтилляционным NaI(Tl) детектором типа «Лимон» с ошибкой счета 5–10%; в дальней-

шем – на низкофономом полупроводниковом гамма-спектрометре фирмы «Ortec» (США) с коаксиальной детекторной системой на базе высокоочищенного германия (HPGe) или гамма-спектрометре фирмы «Canberra Packard» (США) с германиевым полупроводниковым детектором при ошибке измерения не более 15% и нижним пределом обнаружения 1 Бк/кг.

Методика определения  $^{90}\text{Sr}$  основана на выщелачивании радионуклида бн соляной кислотой, выделении  $^{90}\text{Sr}$  в форме оксалатов, отделении  $^{90}\text{Y}$  от  $^{90}\text{Sr}$  и радиометрического измерения полученных препаратов. Химически чистый осадок оксалата стронция высушивали, прокаливали, взвешивали и измеряли  $\beta$ -активность в 70–80-х годах на счетной установке типа ПСТ-100 и УМФ-1500 с торцевым счетчиком СБТ-13 при ошибке счета 5–10%;



Рис. 1. Карта-схема сети радиозоологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС: 1 – Верховье водохранилища; 2 – Щучий залив; 3 – район Биофизической станции; 4 – Промливневый канал АЭС; 5 – Теплый залив; 6 – приплотинная часть водохранилища. Реакторы Белоярской АЭС: I – АМБ-100, II – АМБ-200, III – БН-600, IV – БН-800

**Характеристика сети радиозоологического мониторинга водоема-охладителя Белоярской АЭС**

Пункт наблюдения	Место отбора	Источник поступления радионуклидов
1	Верховье водохранилища (15 км от АЭС)	Мониторинг фонового содержания радионуклидов в водоеме-охладителе
2	Щучий залив (8 км от АЭС)	Промежуточный пункт наблюдения между фоновой и ближней зоной АЭС
3	Район Биофизической станции	Обводной канал Белоярской АЭС
4	Промливневый канал АЭС	Промплощадки Белоярской АЭС и АО «Института реакторных материалов»
5	Теплый залив	Реакторы АМБ-100, АМБ-200, БН-600
6	Приплотинная часть водохранилища	Интегральный сброс радионуклидов с Белоярской АЭС в речную систему

в дальнейшем – на малофоновой установке УМФ-2000 (Россия) с нижним пределом обнаружения 0,4 Бк/кг и статистической ошибкой измерения не более 10%.

При количественном определении  $^3\text{H}$  пробы воды предварительно обогащали методом одноступенчатого электролиза с одним или двумя доливами. Метод основан на значительной разнице в скорости выделения легкого (протия) и тяжелых (дейтерия и трития) изотопов водорода при разрядке ионов на катоде в ходе электролитического разложения воды. Выделяющийся при этом молекулярный водород обогащается протием, а электролит, соответственно, тритием и дейтерием. Дейтерия в пробах мало, поэтому при количественном определении трития им можно пренебречь. Обсчет проб осуществляли на установке «Дельта-300» (США). Концентрацию трития определяли относительным методом, путем сравнения со стандартным раствором.

Расчет количественного содержания радионуклидов в донных отложениях и водных растениях производили на сухую массу, а для рыб – на сырую массу, как это принято в литературе.

Радиозоологический мониторинг Белоярского водохранилища наиболее детально проводился в 1976–1988 гг. и в 2002–2019 гг. В работе проанализировано в общей сложности 1109 статистически обработанных результатов измерений содержания радионуклидов в компонентах водной экосистемы, включая

- поверхностные воды – 573 измерения ( $^{60}\text{Co}$ –14%,  $^{90}\text{Sr}$ –24%,  $^{137}\text{Cs}$ –28% и  $^3\text{H}$ –34%);
- донные отложения – 261 измерение ( $^{60}\text{Co}$ –33%,  $^{90}\text{Sr}$ –22%,  $^{137}\text{Cs}$ –45%);
- макрофиты – 119 измерений ( $^{60}\text{Co}$ –29%,  $^{90}\text{Sr}$ –26%,  $^{137}\text{Cs}$ –45%);
- ихтиофауна – 156 измерений ( $^{60}\text{Co}$ –8%,  $^{90}\text{Sr}$ –30%,  $^{137}\text{Cs}$ –62%).

Достоверность результатов достигалась параллельным отбором и исследованием всех образцов в двух-трех повторностях. Статистическая обработка полученных данных заключалась в определении среднеарифметического значения и стандартного отклонения среднего арифметического. Результаты измерений обрабатывали с помощью  $t$ -критерия и другими общепринятыми способами ( $U$ -критерий Манна-Уитни) и считали достоверными при  $p < 0,05$ . Полученные результаты верифицировали с официальными данными радиационного мониторинга Росгидромета, проводимого в районе размещения Белоярской АЭС [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

## Динамика удельной активности радионуклидов в поверхностных водах

В таблице 2 представлена многолетняя динамика (1976–2019 гг.) содержания техногенных радионуклидов в компонентах экосистемы Белоярского водохранилища по усредненным данным с шести мониторинговых участков водоема-охладителя (см. рис. 1).

Таблица 2

## Среднее содержание техногенных радионуклидов в компонентах экосистемы Белоярского водохранилища в период эксплуатации реакторов на тепловых (АМБ) и быстрых (БН) нейтронах, Бк/кг (л)

Радионуклиды	Периоды работы Белоярской АЭС (годы, реакторы в эксплуатации)				
	1967–1979, АМБ-100, АМБ-200	1980–1981, АМБ-100, АМБ-200, БН-600	1982–1989, АМБ-200, БН-600	1990–2015, БН-600	2016–наст. вр., БН-600, БН-800
Поверхностные воды					
$^{60}\text{Co}$	$0,99 \pm 0,5$ ( $n = 20$ )	$0,18 \pm 0,01$ ( $n = 10$ )	$0,16 \pm 0,06$ ( $n = 37$ )	$0,03 \pm 0,025$ ( $n = 16$ )	Ниже МДА (0,01)
$^{90}\text{Sr}$	$0,12 \pm 0,05$ ( $n = 17$ )	$0,03 \pm 0,004$ ( $n = 8$ )	$0,05 \pm 0,01$ ( $n = 28$ )	$0,02 \pm 0,01$ ( $n = 72$ )	$0,02 \pm 0,005$ ( $n = 12$ )
$^{137}\text{Cs}$	$0,8 \pm 0,7$ ( $n = 18$ )	$0,2 \pm 0,18$ ( $n = 8$ )	$0,13 \pm 0,11$ ( $n = 31$ )	$0,03 \pm 0,02$ ( $n = 85$ )	$0,01 \pm 0,007$ ( $n = 18$ )
$^3\text{H}$	Нет данных	$81 \pm 0,1$ ( $n = 12$ )	$93 \pm 69$ ( $n = 40$ )	$25 \pm 17$ ( $n = 124$ )	$19 \pm 2$ ( $n = 17$ )
Донные отложения (илистый сапропель)					
$^{60}\text{Co}$	$3390 \pm 2870$ ( $n = 8$ )	Нет данных	$465 \pm 295$ ( $n = 5$ )	$23 \pm 21$ ( $n = 50$ )	$6,7 \pm 0,4$ ( $n = 24$ )
$^{90}\text{Sr}$	$29 \pm 14$ ( $n = 3$ )	Нет данных	$31 \pm 15$ ( $n = 18$ )	$14 \pm 11$ ( $n = 33$ )	$1,3 \pm 0,4$ ( $n = 3$ )
$^{137}\text{Cs}$	$1595 \pm 1570$ ( $n = 5$ )	Нет данных	$595 \pm 190$ ( $n = 13$ )	$310 \pm 260$ ( $n = 75$ )	$160 \pm 5,2$ ( $n = 24$ )
Макрофиты (среднее значение для элодеи и роголистника)					
$^{60}\text{Co}$	$3870 \pm 3860$ ( $n = 14$ )	Нет данных	$164 \pm 12$ ( $n = 14$ )	$19 \pm 14$ ( $n = 3$ )	$0,15 \pm 0,05$ ( $n = 3$ )
$^{90}\text{Sr}$	$105 \pm 35$ ( $n = 8$ )	Нет данных	$52 \pm 11$ ( $n = 4$ )	$18 \pm 17$ ( $n = 13$ )	$7,9 \pm 7,0$ ( $n = 6$ )
$^{137}\text{Cs}$	$920 \pm 902$ ( $n = 7$ )	$218 \pm 111$ ( $n = 3$ )	$90 \pm 19$ ( $n = 14$ )	$21 \pm 15$ ( $n = 21$ )	$11,7 \pm 9,8$ ( $n = 9$ )
Рыба (в среднем по девяти видам)					
$^{60}\text{Co}$	$8,8 \pm 5,5$ ( $n = 4$ )	$3,8 \pm 0,2$ ( $n = 2$ )	$1,7 \pm 0,01$ ( $n = 6$ )	Нет данных	Нет данных
$^{90}\text{Sr}$	$3,4 \pm 1,1$ ( $n = 4$ )	Нет данных	Нет данных	$2,1 \pm 2,05$ ( $n = 33$ )	$2,7 \pm 0,4$ ( $n = 10$ )
$^{137}\text{Cs}$	$80 \pm 43$ ( $n = 12$ )	$43 \pm 5$ ( $n = 9$ )	$38 \pm 19$ ( $n = 17$ )	$9,9 \pm 7,1$ ( $n = 43$ )	$1,8 \pm 0,7$ ( $n = 16$ )

Из данных табл. 2 видно, что за 52-летний период работы Белоярской АЭС (1967–2019 гг.) в воде водоема-охладителя средние значения объемной активности  $^{60}\text{Co}$  снизились с 0,99 Бк/л до значений ниже МДА, содержание  $^{137}\text{Cs}$  уменьшилось с 0,8 до 0,01 Бк/л, т.е. в 74,5 раза, объемная активность  $^{90}\text{Sr}$  снизилась в 66,7 раза, с 0,12 до 0,02 Бк/л. Среднее содержание  $^3\text{H}$  в воде водоема-охладителя уменьшилось с 80–95 до 20–25 Бк/л и имеет тенденцию к дальнейшему снижению. Подобные изменения произошли и в отношении других природных компонентов водоема. Так общее содержание техногенных радионуклидов ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в донных отложениях (илистый сапропель) снизилось в 10–505 раз, в макрофитах (элодея, роголистник) – в 13–25800 раз, в ихтиофауне (девять видов) в 1,3–44,6 раза.

Относительно отдельных участков мониторинга содержание техногенных радионуклидов в воде водоема-охладителя распределялось неравномерно. Так максимальный уровень объемной активности  $^{60}\text{Co}$  (5,6 Бк/л) зафиксирован в 1976 г. в воде Промливневого канала (см. рис. 1) и оставался на этом уровне последующие два года. В этот период времени на реакторе АМБ-200 произошли аварийные ситуации, которые привели к необходимости проведения длительных ремонтных работ. Технические воды, содержащие повышенную активность радионуклидов после дезактивации оборудования, через Промливневый канал поступали в водоем-охладитель. С 1979 г. концентрация  $^{60}\text{Co}$  в воде данного участка водохранилища стала плавно снижаться, при этом оставаясь выше, чем на других участках сети мониторинга вплоть до 1985 г., когда произошла стабилизация показателя на уровне 0,2–0,3 Бк/л. В водах Теплого залива, поступающих из системы охлаждения первой очереди АЭС, содержание  $^{60}\text{Co}$  было значительно ниже, чем в Промливневом канале. Так в 1976–1977 гг. разница по содержанию  $^{60}\text{Co}$  в водах Теплого залива и Промливневого канала составляла 3–5 раз, а в период 1978–1983 гг. возросла до 10–30 раз. Это говорит о том, что загрязнение  $^{60}\text{Co}$  водной экосистемы в начальный период работы атомной станции было в большей степени связано с многочисленными ремонтными работами на площадке АЭС и в меньшей степени – со сбросами радионуклида из системы охлаждения реакторов. В последние годы содержание  $^{60}\text{Co}$  в водах Белоярского водохранилища снизилось до минимальных уровней и находилось в диапазоне 0,01–0,02 Бк/л, а также значений ниже МДА.

Наиболее высокие концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностных водах Белоярского водохранилища были зафиксированы в районе Биофизической станции в 1976–1978 гг. и составляли 0,3–0,5 Бк/л, что значительно ниже по сравнению с  $^{60}\text{Co}$ , но в 10 раз выше, чем в Верховье водохранилища. Источником поступления радионуклида в районе Биофизической станции стали воды обводного канала, дренирующего площадку Белоярской АЭС с севера. Как и в случае с  $^{60}\text{Co}$ , поступление  $^{90}\text{Sr}$  в дренажную систему площадки АЭС было обусловлено дезактивацией конструкций и оборудования первой очереди атомной станции после нештатных ситуаций. В целом, за период мониторинговых наблюдений (1976–2019 гг.), содержание  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностной воде водоема-охладителя снизилось от 1,5 раз в Верховье водоема до 10 раз в районе Биофизической станции. В настоящее время удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в воде Белоярского водохранилища находится на стабильно низком уровне в пределах 0,01–0,05 Бк/л.

Максимальная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  была зафиксирована в сбросных водах Промливневого канала в 1976 г. и составляла 6,3 Бк/л, что сопоставимо с аналогичным показателем для  $^{60}\text{Co}$  в данном месте пробоотбора. В этот же год наибольшее содержание  $^{137}\text{Cs}$  в диапазоне 1,2–1,4 Бк/л было также отмечено в воде Теплого залива и районе Биофизической

станции. В последние годы содержание  $^{137}\text{Cs}$  в поверхностной воде Белоярского водохранилища находится на уровне 0,005–0,035 Бк/л. За весь период наблюдений (1976–2019 гг.) содержание  $^{137}\text{Cs}$  снизилось в поверхностных водах водоема-охладителя в районе Биофизической станции в 280 раз, Промливневого канала – в 180, Теплого залива – в 110, Верховья водоема и Приплотинной части водохранилища – до шести раз.

На Белоярском водохранилище  $^3\text{H}$  стали контролировать с 1980 г. [14, 15]. В начальный период наблюдений максимальные уровни содержания радионуклида в поверхностной воде так же, как в случае с  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$  были отмечены в районе Промливневого канала, составляя 95–240 Бк/л. При этом они превышали значения на мониторинговом участке в 2,5–10 раз. Максимальные значения  $^3\text{H}$  в воде Промливневого канала были отмечены в 1988 г. – 500 Бк/л. Залповое повышение объемной активности  $^3\text{H}$  (до 650 Бк/л) в этот год было отмечено и в воде Обводного канала в районе Биофизической станции, что вероятно связано с аварией на реакторе БН-600 в 1987 г. [1] и поступлением радионуклида в водохранилище в результате сброса дезактивационных вод после проведения длительных ремонтных работ. В дальнейшем содержание  $^3\text{H}$  в поверхностной воде на всех мониторинговых участках водохранилища стало снижаться до уровня 10–80 Бк/л. В последние годы объемная активность радионуклида в воде водоема-охладителя составляет 5–25 Бк/л, приближаясь минимальными значениями к техногенному фону водных экосистем Уральского региона.

#### **Динамика удельной активности радионуклидов в донных отложениях**

На рисунке 2 представлены результаты анализа содержания  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в илистом сапропеле участков сети мониторинга Белоярского водохранилища. Илистый сапропель выбран как максимальный аккумулятор радионуклидов.

Максимальные концентрации  $^{60}\text{Co}$  в первые годы наблюдений были зафиксированы в донных грунтах Теплого залива и варьировали в пределах 3–6 тыс. Бк/кг. На сорбцию радионуклида донными отложениями помимо его содержания в воде большое влияние оказывает температурный фактор. Так в лабораторных экспериментах по оценке коэффициентов накопления радионуклидов (КН) в донных отложениях было показано, что повышение температурного режима в воде на  $28^\circ\text{C}$  приводит к увеличению КН  $^{60}\text{Co}$  до восьми раз [4]. В условиях Белоярского водохранилища повышенная температура сбросных вод Теплого залива (в среднем на  $6–7^\circ\text{C}$ ) также послужила фактором, влияющим на увеличение сорбции  $^{60}\text{Co}$  илистым сапропелем. После вывода из эксплуатации реакторов серии АМБ поступление  $^{60}\text{Co}$  в водоем-охладитель резко сократилось, а его относительно быстрый по сравнению с другими изучаемыми радионуклидами распад ( $T_{1/2}=5,27$  года) привел к еще большему снижению удельной активности радионуклида в донных отложениях. К настоящему времени содержание  $^{60}\text{Co}$  в илистом сапропеле водоема-охладителя Белоярской АЭС стало минимальным с начала наблюдений и составляет 4–15 Бк/кг. Максимальные уровни удельной активности радионуклида в донных отложениях фиксируются в районе Промливневого канала АЭС. Таким образом, за период наблюдений накопление  $^{60}\text{Co}$  в илистом сапропеле Белоярского водохранилища снизилось от 40 до 670 раз.

Более высокие уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  в илистом сапропеле отмечались в районе Обводного канала и Теплом заливе в диапазоне 35–45 Бк/кг, а минимальные – в Верховье водоема), в пределах 10–18 Бк/кг. За весь период наблюдений содержание радионуклида в илистом сапропеле Белоярского водохранилища снизилось от 1,2 до 8,0 раз. Стоит отметить, что накопление  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях является минимальным среди других

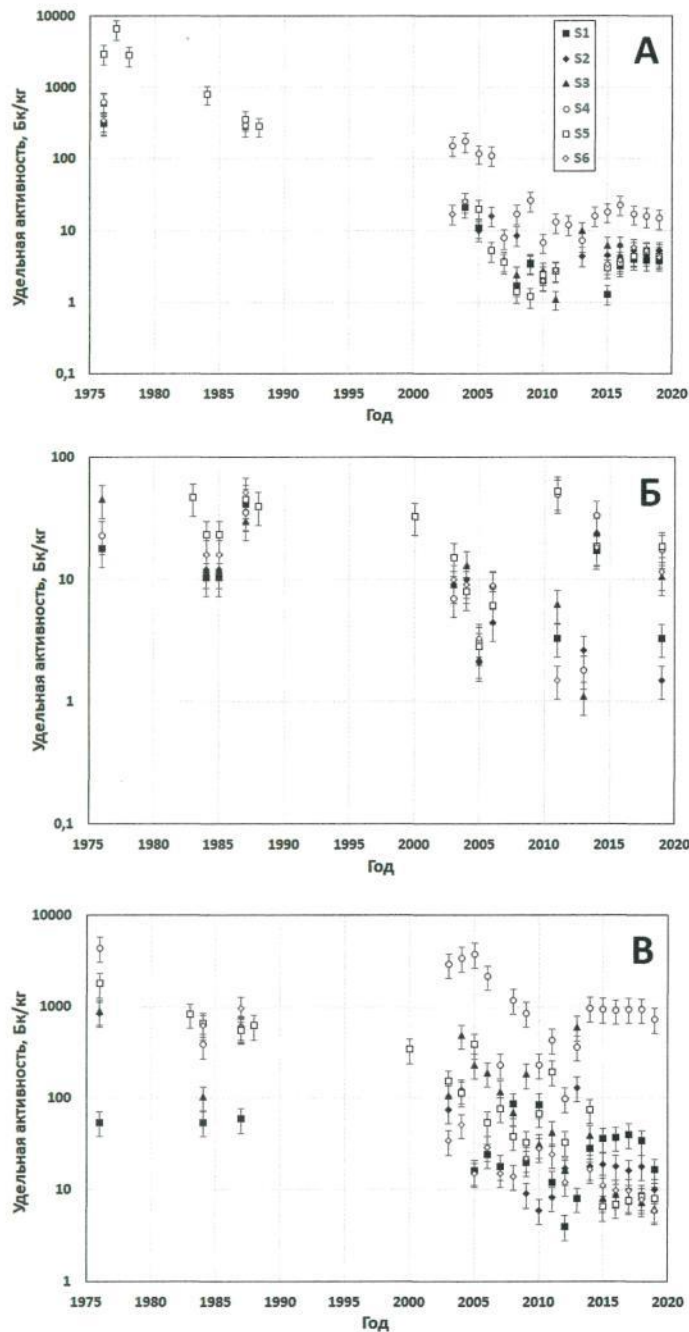


Рис. 2. Динамика удельной активности радионуклидов: А –  $^{60}\text{Co}$ ; Б –  $^{90}\text{Sr}$ ; В –  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях (илистый сапропель) мониторинговых участков водоема-охладителя Белоярской АЭС

на Белоярском водохранилище содержание  $^{137}\text{Cs}$  в илистом сапропеле (за исключением Промливневого канала) находится в пределах 5–15 Бк/кг, а на других типах донных отложений (затопленной почве и песчаных грунтах) оно еще ниже.

изучаемых радионуклидов из-за его низкой концентрации в поверхностной воде водоема-охладителя.

Максимальные уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях Белоярского водохранилища были зафиксированы в илистом сапропеле Промливневого канала (4,37 тыс. Бк/кг), что в 80 раз выше, чем на фоновом участке Верховья водоема. Также высокие уровни накопления  $^{137}\text{Cs}$  в илистом сапропеле отмечены в Теплом заливе (1790 Бк/кг) и в районе Биофизической станции (900 Бк/кг). В илистом сапропеле Промливневого канала высокие уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  оставались в течение всего периода наблюдений вплоть до настоящего времени, составляя около 900 Бк/кг. Такие показатели накопления радионуклида в донных отложениях были обусловлены нештатными и аварийными ситуациями на реакторах АМБ-100, АМБ-200, многолетними стоками в Промливневый канал технологических вод с промплощадки АЭС, содержащими радионуклиды, высокой емкостью поглощения и прочным связыванием радиоизотопов  $^{137}\text{Cs}$  илистым сапропелем.

В настоящее время

### Динамика удельной активности радионуклидов в макрофитах

Из обитающих в водоеме-охладителе Белоярской АЭС 25 видов высших водных растений для целей радиозоологического мониторинга в настоящей работе были отобраны два наиболее распространенных вида макрофитов: элодея канадская (*Elodea canadensis*) и роголистник темно-зеленый (*Ceratophyllum demersum*). Результаты многолетних исследований по содержанию  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в тестовых видах макрофитов представлены на рис. 3, 4.

Максимальное содержание  $^{60}\text{Co}$  наблюдалось в растениях, обитающих в Теплом заливе. Здесь удельная активность радионуклида составляла 20 тыс. и 10 тыс. Бк/кг сухой массы растений для роголистника и элодеи соответственно. На высокие уровни накопления радиокобальта в макрофитах данного участка водоема, как и в случае с донными отложениями, значительно повлияла аварийная ситуация на реакторе АМБ-200 в 1976 г., а также температурный фактор [16].

В подогретых водах Теплового залива физиологические процессы развития водных растений идут более интенсивно, что определяет высокое адсорбирование радионуклида в их биомассу. На остальных участках водохранилища содержание  $^{60}\text{Co}$  в макрофитах находилось в диапазоне 60–190 Бк/кг сухой массы, причем было минимальным в Верховье и Приплотинной частях водоема. В элодее накопление ра-

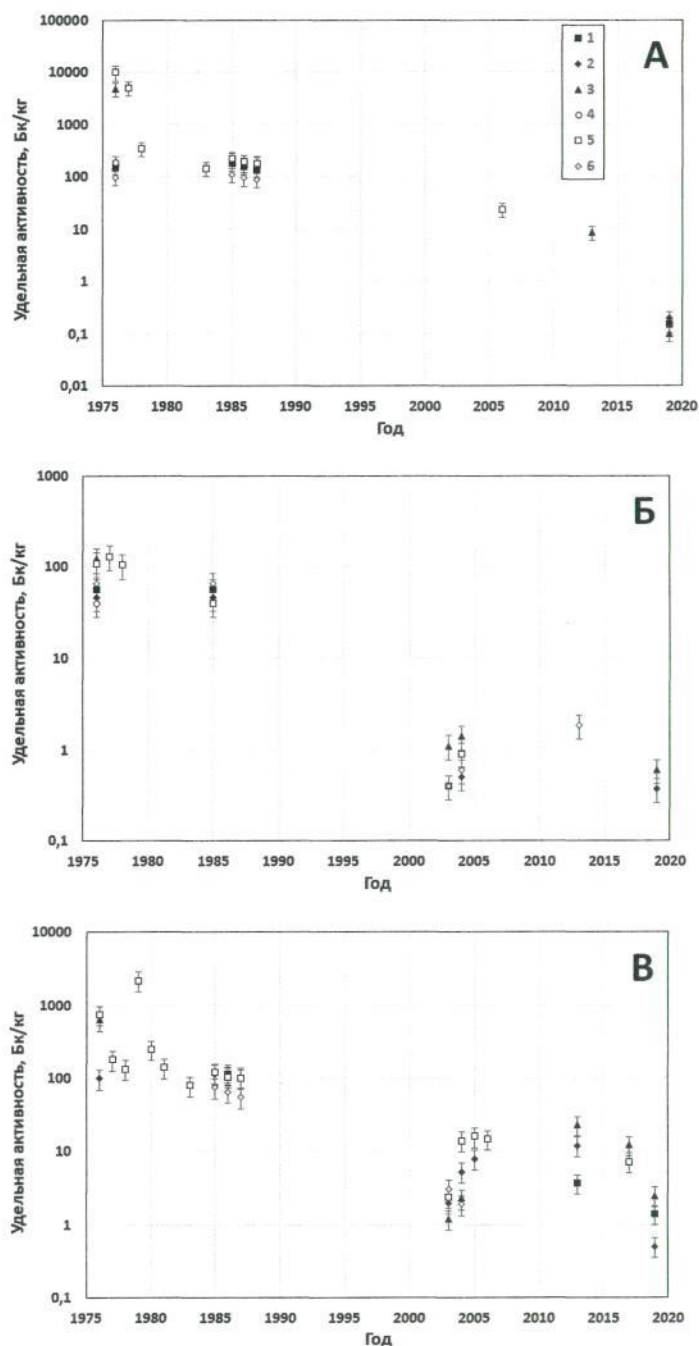


Рис. 3. Динамика удельной активности радионуклидов в элодее водоема-охладителя Белоярской АЭС: А –  $^{60}\text{Co}$ ; Б –  $^{90}\text{Sr}$ ; В –  $^{137}\text{Cs}$



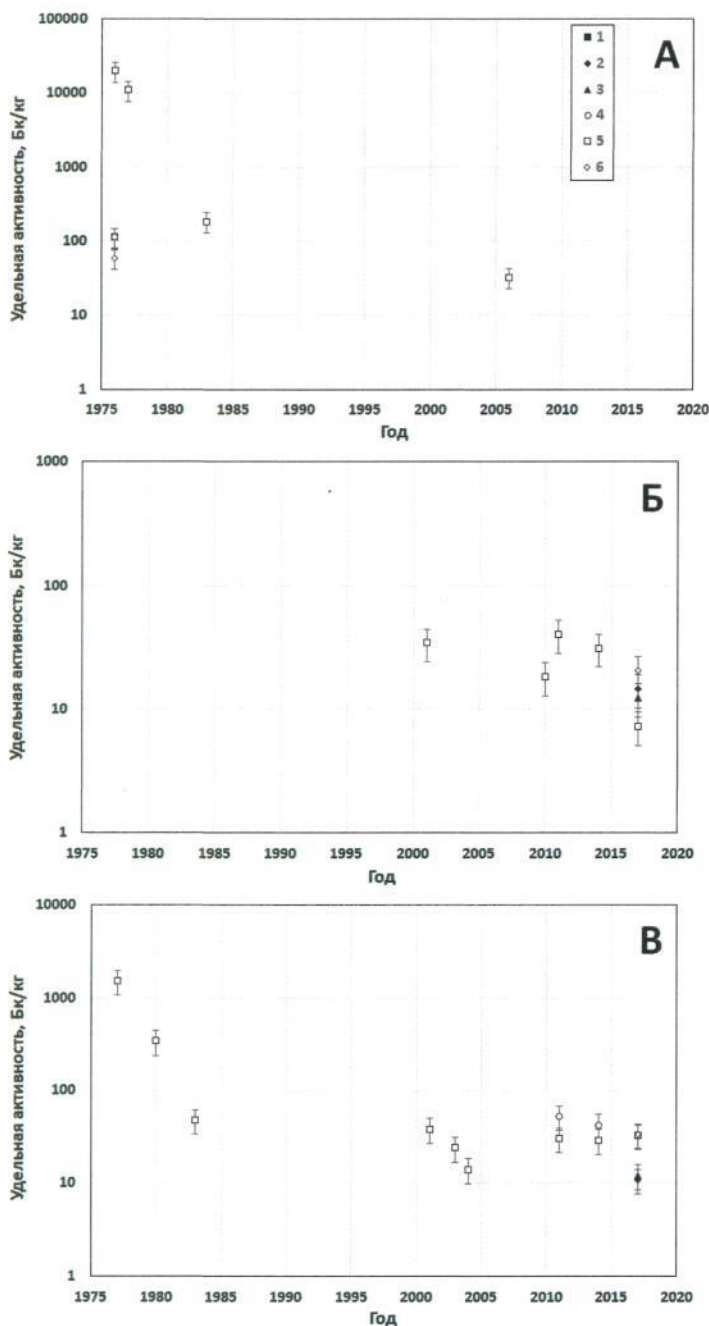


Рис. 4. Динамика удельной активности радионуклидов в роголистнике водоема-охладителя Белоярской АЭС: А –  $^{60}\text{Co}$ ; Б –  $^{90}\text{Sr}$ ; В –  $^{137}\text{Cs}$

и 1520 Бк/кг соответственно. Такие высокие показатели отмечались в период восстановительных работ после аварийных ситуаций на реакторах первой очереди Белоярской АЭС в 1977–1979 гг.

По сравнению с мониторинговым участком Верховья водоема они были выше в 15–20 раз. К 1980 г. ситуация стабилизировалась, и в последние годы удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  варьирует в элодее от 0,5 до 12,5 Бк/кг сухой массы, а в роголистнике – в диапазоне 11–34 Бк/кг, что определяется видовыми особенностями и местом отбора растений.

дионуклида было в среднем на 30–40% выше, чем в роголистнике на идентичных участках отбора проб, что определяется видовыми особенностями растений. К настоящему времени удельная активность  $^{60}\text{Co}$  в макрофитах Белоярского водохранилища крайне низкая и составляет 0,1–0,2 Бк/кг сухой массы растений.

Максимальные уровни накопления  $^{90}\text{Sr}$  зафиксированы в элодее Обводного канала в районе Биофизической станции – 122 Бк/кг и в Теплом заливе – 110 Бк/кг. На обоих участках водоема-охладителя содержание  $^{90}\text{Sr}$  в макрофитах было до двух раз выше, чем в Верховье водоема (56 Бк/кг) и Приплотинной части (65 Бк/кг). К настоящему времени содержание радионуклида в водной растительности Белоярского водохранилища снизилось более чем в 10 раз. Выше оно в роголистнике, в меньшей степени  $^{90}\text{Sr}$  накапливается в элодее.

Максимальные уровни удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в элодее и роголистнике были отмечены в подогретых водах Теплого залива, составляя 2200

**Динамика удельной активности радионуклидов в ихтиофауне**

Мониторинг содержания радионуклидов в рыбе водоема-охладителя Белоярской АЭС был в большей степени ориентирован на оценку содержания  $^{137}\text{Cs}$ .  $^{60}\text{Co}$  достоверно определяли в первые годы наблюдений (1977–1985 гг.),  $^{90}\text{Sr}$  измеряли преимущественно в последние годы (рис. 5).

В 1977 г. максимальные уровни содержания  $^{60}\text{Co}$  в рыбе были отмечены у леща (14 Бк/кг сырой массы) и карася (12 Бк/кг), а минимальные – у линя (2,1 Бк/кг). Однако, в целом, разброс данных по содержанию радионуклида в ихтиофауне был небольшой (см. рис. 5А). За период наблюдений (1977–1985 гг.) содержание  $^{60}\text{Co}$  снизилось в плотве в 8,4 раза, в леще – в 8,0 раз. В дальнейшем измерения содержания  $^{60}\text{Co}$  в ихтиофауне не проводились вследствие низкой концентрации радионуклида в поверхностной воде и рыбе.

Уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  в ихтиофауне характеризовались низкой вариабельностью в течение всего периода наблюдений. В 1977 г. они колебались в диапазоне 2,1–4,5 Бк/кг, в 1994 г. несколько возросли до 4,6–8,3 Бк/кг (см. рис. 5Б). К 2003 г. они составляли 0,3–6,2 Бк/кг и в настоящее время находятся в пределах 0,1–4,4 Бк/кг. Среди рассмотренных видов рыб максимальное накопление  $^{90}\text{Sr}$  было у щуки, леща и плотвы, а минимальное –

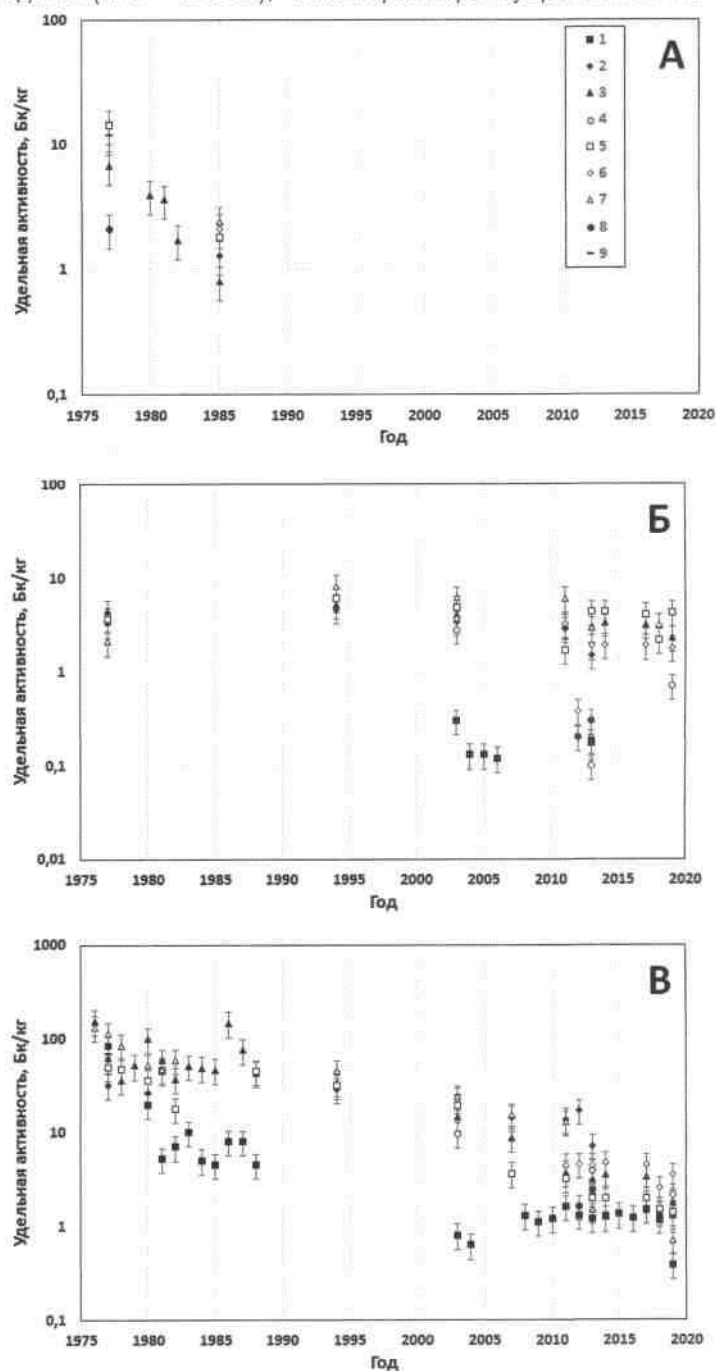


Рис. 5. Динамика удельной активности радионуклидов: А –  $^{60}\text{Co}$ ; Б –  $^{90}\text{Sr}$ ; В –  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе водоема-охладителя Белоярской АЭС (1 – садковый карп; 2 – сазан; 3 – плотва; 4 – судак; 5 – лещ; 6 – окунь; 7 – щука; 8 – линь; 9 – карась)

усадкового карпа. Разница между содержанием радионуклида в садковом и свободноживущем карпе составляла от восьми до десяти раз, что определялось выращиванием рыбы на искусственных кормах, не содержащих техногенных радионуклидов. В целом за период мониторинговых исследований снижение содержания  $^{90}\text{Sr}$  в ихтиофауне водохранилища составило 1,4–2,9 раза в зависимости от вида рыб, что меньше, чем у  $^{60}\text{Co}$ . Это говорит о том, что закономерности накопления  $^{90}\text{Sr}$  в рыбе определялись в Белоярском водохранилище в большей степени глобальными выпадениями и в меньшей – сбросами атомной станции.

Среди изучаемых радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  в наибольшей степени накапливается в ихтиофауне водоема-охладителя Белоярской АЭС. Из рассмотренных видов ихтиофауны щука, относящаяся к хищным видам, накапливает больше  $^{137}\text{Cs}$ , чем другие виды рыб смешанного типа питания или фитофаги. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в садковом карпе, который выращивают в теплых водах Белоярского водохранилища с использованием искусственного корма, оказалась ниже всех изученных видов ихтиофауны. Таким образом, основным путем поступления  $^{137}\text{Cs}$  в организм рыб является пищевой канал. Основываясь на усредненных за весь период наблюдений данных о накоплении  $^{137}\text{Cs}$  обитающими в водоеме-охладителе Белоярской АЭС видами рыб, их можно расположить в следующий ряд: щука (среднее содержание 49,2 Бк/кг) > плотва (45,1) > линь (29,3) > карась (24,4) > лещ (20,6) > карп свободноживущий (19,8) > окунь (6,4) > карп садковый (3,8 Бк/кг).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из представленных в работе данных видно, что за 52-летний период работы Белоярской АЭС (1967-2019 гг.) произошло существенное улучшение радиоэкологического состояния водоема-охладителя атомной станции. Содержание техногенных радионуклидов в основных компонентах пресноводной экосистемы снизилось в десятки и сотни раз: в поверхностных водах – в 4,3–74,5 раза, в донных отложениях (илистый сапропель) – в 10,1–505 раз, в макрофитах (элодея, роголистник) – в 13,1–25 800 раз, в ихтиофауне (девять видов рыб) – в 1,3–44,6 раза. Улучшение радиоэкологического состояния водоема-охладителя произошло под влиянием ряда факторов. Во-первых, это остановка эксплуатации в 80-х годах тепловых реакторов первой очереди атомной станции (АМБ-100 и АМБ-200). Во-вторых, это результат процессов самоочищения водной экосистемы за счет распада радиоизотопов, их перераспределения из водной фазы в другие компоненты экосистемы, прежде всего в донные отложения, а также миграция с водным стоком из водохранилища в речную систему. Повышенные уровни объемной активности техногенных радионуклидов ( $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) в поверхностных водах Белоярского водохранилища были отмечены в местах сброса технологических вод с первой очереди АЭС (Промливневый и Обводной каналы), а их пиковые значения совпадали с временем аварийных ситуаций на энергоблоках и последующими восстановительными работами. Из представленных данных также видно, что ввод в эксплуатацию в 2016 г. энергоблока БН-800 на быстрых нейтронах не привел к повышению радиоактивности в Белоярском водохранилище. Это свидетельствует об отсутствии значимого дополнительного поступления радиоизотопов в водоем-охладитель после изменения технологий производства электроэнергии за счет перехода Белоярской АЭС от тепловых к быстрым реакторам и ввода в эксплуатацию новых более высоких мощностей.

### Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экологии растений и животных УрО РАН, направление № 122021000077-6.

### Литература

1. Колтик И.И. Атомные электростанции и радиационная безопасность. Екатеринбург, 2001. – 366 с.
2. Ошканов Н.Н., Говоров П.П. Жидкометаллический реактор БН-600 – основные характеристики и опыт эксплуатации // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 2. – С. 7–20.
3. Ошканов Н.Н., Шейнкман А.Г., Говоров П.П. Анализ эксплуатационной надежности энергоблока с реактором БН-600 за период 1980–1993 гг. // Атомная энергия. – 1994. – Т. 76. Вып. 3. – С. 165–168.
4. Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Куликов Н.В. Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища. Свердловск: УрО АН СССР, 1992. – 76 с.
5. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1991–2019 гг. / Ежегодники Росгидромета. Обнинск: НПО «Тайфун».
6. Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н., Гусева В.П., Николин О.А. Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: АкадемНаука, 2008. DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-2-82-88>
7. 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. – Т. 55. – № 2. – С. 302–313. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803115020150>
8. Трапезников А.В., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н., Платаев А.П. Радиоэкологическое исследование водоема-охладителя Белоярской АЭС перед вводом в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2016. – № 2. – С. 82–88. DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-2-82-88>
9. Коржавин А.В., Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Николкин В.Н., Платаев А.П. Первые результаты радиоэкологического исследования водоема-охладителя Белоярской АЭС после ввода в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2018. – № 2. – С. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2018-0-2-70-82>
10. Любимова С.А., Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Влияние теплой воды на высшие растения Белоярского водохранилища // Экология. – 1989. – № 1. – С. 173–175.
11. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Куликов Н.В. Накопление  $^{137}\text{Cs}$  промысловой рыбой в водоеме-охладителе Белоярской атомной электростанции // Экология. – 1984. – № 6. – С. 36–40.
12. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Екатеринбург: АкадемНаука, 2019. – Т. 4. – 447 с.
13. Руководство для гидрометеорологических станций и постов. Выпуск 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды: руководящий документ РД 52.18.826-2015. Обнинск: Росгидромет. ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015.
14. Чеботина М.Я., Николин О.А. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург: Уральское отделение Российской академии наук, 2005. – 92 с.
15. Чеботина М.Я. Тритий в воде Белоярского водохранилища в период эксплуатации трех блоков атомной электростанции // Водное хозяйство России. – 2010. – № 4. – С. 458-473. DOI: <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2010-4-5>

16. 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. – Iss 8. – PP. 3034-3042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.004>

Поступила в редакцию 31.01.2024

#### Авторы

Панов Алексей Валерьевич, и.о. директора, доктор биологических наук, профессор РАН,  
E-mail: [riar@mail.ru](mailto:riar@mail.ru)

Коржавин Александр Васильевич, исполняющий обязанности заведующего лабораторией  
общей радиозологии, кандидат ветеринарных наук,  
E-mail: [bfs\\_zar@mail.ru](mailto:bfs_zar@mail.ru)

Коржавина Татьяна Николаевна, старший инженер, кандидат педагогических наук,  
E-mail: [t.n.korzhavina@mail.ru](mailto:t.n.korzhavina@mail.ru)

UDC 502.175:621.039.7(285.2:470.54)

#### Results of the Long-Term Radioecological Monitoring of the Beloyarsk NPP Cooling-Pond

Panov A.V.<sup>1</sup>, Korzhavin A.V.<sup>2</sup>, Korzhavina T.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IATE MEFPh,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

<sup>2</sup> Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

8 March Str., 202, 620144 Ekaterinburg, Russia

#### Abstract

The results of long-term (1967–2019) radioecological monitoring of the Beloyarsk NPP cooling-pond are presented. The influence of the waste process waters from thermal (AMB-100 and AMB-200) and fast (BN-600 and BN-800) nuclear power plant reactors on the content of artificial radionuclides in surface waters, bottom sediments, macrophytes and ichthyofauna of the Beloyarsk cooling-pond was studied. Critical radionuclides, routes of their entry into the ecosystem and periods of maximum discharge of radioisotopes into the cooling-pond have been determined. It was shown that during the period of monitoring studies, the content of artificial radionuclides in the freshwater ecosystem main components decreased by tens and hundreds of times: in surface waters – by 4.3–74.5 times, in bottom sediments (silty sapropel) – by 10.1–505 times, in macrophytes (elodea, hornwort) – 13.1–25,800 times, in ichthyofauna (9 species of fish) – 1.3–44.6 times. The improvement in the radioecological state of the cooling pool occurred due to the shutdown of the first stage thermal reactors of the nuclear power plant (AMB-100 and AMB-200), as well as due to the decay and redistribution of the radioisotopes from the aqueous phase into bottom sediments and migration with water runoff from the pond to the river system. The maximum discharge of artificial radionuclides into the reservoir was noted during the period of restoration and decontamination work aimed at eliminating emergencies at the AMB thermal reactors of the first stage of the Beloyarsk NPP. The commissioning of the BN-800 fast breeder power unit in 2016 did not lead to an increase in radioactivity in the Beloyarsk cooling-pond. This indicates the absence of a significant additional supply of the radioisotopes to the cooling pool after a change in the technology of electricity production at the Beloyarsk NPP from thermal to fast reactors.

**Keywords:** nuclear power plant, cooling pool, radioecological monitoring, artificial radionuclides, long-term dynamics.

**For citation:** Panov A.V., Korzhavin A.V., Korzhavina T.N. Results of the Long-Term Radioecological Monitoring of the Beloyarsk NPP Cooling-Pond. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 2, pp. 138–154; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.2.12> (in Russian).

### References

1. Koltik I.I. *Nuclear Power Plants and Radiation Safety*. Ekaterinburg, 2001, 366 p. (in Russian).
2. Oshkanov N.N., Govorov P.P. Liquid Metal Reactor BN-600: Main Characteristics and Operating Experience. *News of universities. Nuclear energy*. 2009, no. 2, pp. 7–20 (in Russian).
3. Oshkanov N.N., Sheinkman A.G., Govorov P.P. Analysis of the operational reliability of a power-generating unit with a BN-600 reactor during the period 1980–1993. *Atomic Energy*. 1994, no. 76 (3), pp. 165–169 (in Russian).
4. Chebotina M.Ya., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Kulikov N.V. *Radioecological Studies of the Beloyarskoye pond*. Sverdlovsk, Ural Branch of the USSR Academy of Sciences. 1992. 76 p. (in Russian).
5. *Radiation Situation in Russia and the Neighboring States in 1991–2019. The yearbooks of Roshydromet*. Obninsk. NPO «Typhoon» (in Russian).
6. Trapeznikov A.V., Chebotina M.Ya., Trapeznikova V.N., Guseva V.P., Nikolin O.A. *The Influence of Nuclear Power Plants on the Radioecological State of the Cooling Pool*. Ekaterinburg, AkademNauka. 2008; DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-2-82-88> (in Russian).
7. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dynamics of the Radioecological State of the Freshwater Ecosystems Exposed to Long-Term Effects of a Nuclear Power Plant within the Boundaries of the Observed Zone. *Radiation biology. Radioecology*. 2015, no. 55 (2), pp. 302–313; DOI: <https://doi.org/10.7868/S0869803115020150> (in Russian).
8. Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Plataev A.P. Radioecological Study of the Beloyarskaya NPP Cooling Pool before Commissioning of the 4<sup>th</sup> Power Unit BN-800. *Medical-biological and socio-psychological problems of safety in emergency situations*. 2016, no. 2, pp. 82–88; DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2016-0-2-82-88> (in Russian).
9. Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Plataev A.P. The First Results of a Radioecological Study of the Beloyarskaya NPP Cooling Pool 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. 70–82; DOI: <https://doi.org/10.25016/2541-7487-2018-0-2-70-82> (in Russian).
10. Lyubimova S.A., Chebotina M.Ya., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N. The Influence of Warm Water on Higher Plants of the Beloyarskoye pond. *Ecology*. 1989, no. 1, pp. 173–175 (in Russian).
11. Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Kulikov N.V. Accumulation of <sup>137</sup>Cs by Commercial Fish in the Cooling Pool of the Beloyarskaya Nuclear Power Plant. *Ecology*. 1984, no. 6, pp. 36–40 (in Russian).
12. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. *Radioecological Monitoring of the Freshwater Ecosystems*. Ekaterinburg, AkademNauka. 2019, no. 4. 447 p. (in Russian).
13. *Guidelines for Hydrometeorological Stations and Posts. Issue 12. Observations of Radioactive Contamination of Natural Environment Components: Guidance Document RD 52.18.826-2015*. Roshydromet. Obninsk, Federal State Budgetary Institution «NPO Typhoon». 2015 (in Russian).
14. Chebotina M.Ya., Nikolin O.A. *Radioecological Studies of Tritium in the Ural Region*. Ekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2005. 92 p. (in Russian).
15. Chebotina M.Ya. Tritium in the Water of the Beloyarskoye Pond During the operation of Three Units of a Nuclear Power Plant. *Water management of Russia*. 2010, no. 4. pp. 458–473; DOI: <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2010-4-5> (in Russian).

16. Panov A., Trapeznikov A., Trapeznikova V., Korzhavin A. Influence of Operation of Thermal and Fast Reactors of the Beloyarskaya NPP on the Radioecological Situation in the Cooling Pool. Part 1: Surface Water and Bottom Sediments. *Nuclear Engineering and Technology*. 2022, no. 54 (8), pp. 3034–3042; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.004>

**Authors**

Aleksei V. Panov, Acting Director, Dr. Sci. (Biology), professor RAS,

E-mail: [riar@mail.ru](mailto:riar@mail.ru)

Alexandr V. Korzhavin, Acting Head of the General Radioecology Laboratory, PhD Vet. Sci.,

E-mail: [bfs\\_zar@mail.ru](mailto:bfs_zar@mail.ru)

Tatyana N. Korzhavina, Senior Engineer, PhD Ped. Sci.,

E-mail: [t.n.korzhavina@mail.ru](mailto:t.n.korzhavina@mail.ru)