

Влияние деятельности АО «ГНЦ НИИАР» на дозы облучения референтных видов биоты до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах

А.В. Панов¹, Р.А. Микаилова²

¹ ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

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

² НИЦ «Курчатовский институт»,

123182 Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Реферат. В исследовании предложена реализация эоцентрической концепции обеспечения радиационной защиты природной биоты при использовании источников ионизирующего излучения. Представлена оценка мощности доз облучения представительных организмов в районе размещения «Научно-исследовательского института атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР») до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах (ИЯУ МБИР). Дозовые нагрузки рассчитаны на шесть видов растений и 20 животных от техногенных радионуклидов (^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu) в воздухе, компонентах наземной и водной экосистем зоны наблюдения радиационно опасного объекта и локального радиоактивного загрязнения в пределах санитарно-защитной зоны предприятия. Оценка мощности доз облучения референтных видов биоты проведена с использованием программного кода ERICA Tool, рекомендованного МКРЗ и МАГАТЭ. Показано, что деятельность АО «ГНЦ НИИАР» при граничном уровне мощности дозы 10 мкГр/ч не оказывает негативного влияния на биоту наземной (диапазон доз облучения растений и животных 0,005–0,03 мкГр/ч) и водной (0,0002–0,13 мкГр/ч) экосистем в зоне наблюдения научного центра. Выделены наиболее облучаемые организмы обеих экосистем, которые следует использовать в качестве «референтных» при ведении экологического мониторинга в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР». Отмечено, что на участке локального радиоактивного загрязнения в санитарно-защитной зоне предприятия до модернизации проливневой канализации существовал потенциальный риск негативного влияния изотопов ^{239}Pu (вклад в мощность дозы 15–90%) и ^{137}Cs (вклад 10–85%) на два вида растений и шесть животных наземной экосистемы при пороге облучения 10 мкГр/ч. После ввода в эксплуатацию обновленной проливневой канализации дозовые нагрузки на живые организмы снизились в 12–14 раз, обеспечив условия полной радиационной безопасности биоты.

Ключевые слова: НИИАР, ИЯУ МБИР, техногенные радионуклиды, наземные и водные экосистемы, биота, референтные виды, ERICA, мощность дозы, ранжирование радионуклидов, радиационная безопасность.

Для цитирования: Панов А.В., Микаилова Р.А. Влияние деятельности АО «ГНЦ НИИАР» на дозы облучения референтных видов биоты до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:224–237. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.15>

Введение

В последние десятилетия авторитетными международными организациями в области атомной энергии (МКРЗ и МАГАТЭ) постулируется необходимость доказательства радиационной безопасности не только человека, но и объектов живой природы (экоцентрическая концепция) при проектировании и эксплуатации ядерных энергетических установок и использовании радиационных технологий в различных сферах [1, 2]. С развитием экоцентрического подхода к обеспечению радиационной защиты в нашей стране проведено большое количество исследований по оценке влияния радиационно опасных объектов на биоту наземных и водных экосистем [3]. Для этого проводятся расчеты доз облучения референтных (представительных) видов растений и животных на базе специализированных программных кодов, разработанных в рамках реализации международных проектов [4 – 7]. Так, например, оценены мощности доз облучения гидробионтов (рыба, моллюск) реки Енисей, а также животных наземной экосистемы (дождевой червь, улитка, мышь) зоны влияния Красноярского горно-химического комбината [8]. Дан сравнительный анализ мощностей доз облучения ихтиофауны Обь-Иртышской речной системы, подверженной многолетнему радиационному воздействию ПО «Маяк» и Сибирского химического комбината [9]. Оценено влияние Белоярской АЭС на дозоформирование рыб водоема-охладителя [10] и представительных организмов (тростник, ива козья, прудовик, лягушка, утка, бобр) Ольховской болотной системы в санитарно-защитной зоне атомной станции [11]. Аналогичные исследования проведены для референтных организмов водной (форель, лягушка, утка) и наземной (трава, сосна, пчела, дождевой червь, крыса) экосистем в зоне влияния Ленинградской АЭС [12]. В то же время остается еще много как эксплуатирующихся, так и строящихся реакторных установок, требующих обоснования радиационной безопасности живой природы с экоцентрических позиций.

В акционерном обществе «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), расположенном в г. Дмитровград Ульяновской области, в настоящее время работают шесть исследовательских реакторов (СМ-3, ВК-50, МИР.М1, БОР-60, РБТ-6 и РБТ-10/2), которые вводились в эксплуатацию в период 1961-1984 гг. С 2015 г. на площадке АО «ГНЦ НИИАР» идет строительство многоцелевого быстрого исследовательского реактора (ИЯУ МБИР). Он станет самой крупной в мире инновационной исследовательской реакторной установкой [13 – 15]. Ввод в эксплуатацию ИЯУ МБИР запланирован на 2028 год.

Для оценки радиационной безопасности как действующих реакторов АО «ГНЦ НИИАР», так и сформировавшегося техногенного фона для обоснования безопасной эксплуатации строящегося ИЯУ МБИР было проведено комплексное радиоэкологическое обследование наземных [16, 17] и водных [17, 18] экосистем, рассчитаны дозовые нагрузки на различные возрастные категории жителей городских и сельских населенных пунктов в районе размещения научного центра [19]. Настоящее исследо-

вание продолжает цикл работ по анализу радиационных последствий многолетней эксплуатации реакторов АО «ГНЦ НИИАР» для человека и живой природы, которые станут основой для демонстрации безопасности ИЯУ МБИР. Цель работы – оценка мощности доз облучения референтных видов биоты от техногенных радионуклидов в районе размещения АО «ГНЦ НИИАР» до начала эксплуатации ИЯУ МБИР.

Материалы и методы

Площадка АО «ГНЦ НИИАР» и ее зона наблюдения расположены в пределах двух экосистем: наземной (сосново-широколиственный лес Мелекесского лесхоза площадью около 3,7 тыс. га) и пресноводной (Черемшанский залив Куйбышевского водохранилища). Для анализа степени радиационного воздействия АО «ГНЦ НИИАР» на живую природу были отобраны по 13 видов наиболее радиочувствительных и распространенных растений и животных обеих экосистем (табл. 1), верифицированных с рекомендациями МКРЗ [1].

Таблица 1

Растения и животные наземной и пресноводной экосистем в районе размещения АО «ГНЦ НИИАР»

Таксономическая группа	Наземная экосистема	Пресноводная экосистема
Растения	Мхи (сфагнум) Травы (пырей) Кустарники (малина) Деревья (сосна)	Фитопланктон (хлорелла) Высшая водная растительность (роголистник)
Кольчатые черви	Дождевой червь	
Моллюски	Брюхоногие моллюски (улитка)	Брюхоногие моллюски (прудовик) Двустворчатые моллюски (беззубка)
Членистоногие	Летающие насекомые (пчела) Детритофаг (жук-навозник)	Зоопланктон (дафния) Личинки насекомых (стрекоза) Ракообразные (рак)
Ихтиофауна		Пелагические рыбы (окунь) Бентосные рыбы (карась)
Амфибии	Жаба	Лягушка
Рептилии	Змея	Черепаша болотная
Птицы	Утка	Чайка
Млекопитающие	Мелкие (мышь) Крупные (косуля)	Мелкие (выдра)

Исходными данными для оценки дозовых нагрузок на биоту стали удельные активности техногенных радионуклидов в воздухе, компонентах наземной и водной экосистем, полученные по результатам радиационно-экологического обследования [16 – 18] и мониторинга^{1,2} за 2010 – 2020 гг. В начальный период деятельности АО «ГНЦ

¹ Отчеты по экологической безопасности за 2010–2020 годы. Димитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2011–2021. [Environmental safety reports for 2010–2020. Dimitrovgrad. RIAR JSC, 2011–2021 (in Russian)].

² Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010–2020 годах. Ежегодники, 2010–2020. Обнинск: Росгидромет, ФГБУ «НПО Тайфун», 2011–2021. [The radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2010–2020. Yearbooks. Obninsk, Roshydromet, FSBI «NPO Typhoon», 2011–2021 (in Russian)].

Влияние деятельности АО «ГНЦ НИИАР» на дозы облучения референтных видов биоты до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах

НИИАР» в санитарно-защитной зоне предприятия с размерами от 2,5 до 5 км вблизи промышленно-ливневой канализации (ПЛК) сформировался участок локального радиоактивного загрязнения площадью 0,236 км² по состоянию на 01.01.2011 г. [16, 20]. В рамках реализации федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП «ЯРБ-1») промышленно-ливневая канализация была модернизирована, что позволило значительно снизить активность техногенных радионуклидов в грунтах данного участка (табл. 2).

Таблица 2

Содержание техногенных радионуклидов в компонентах окружающей среды района размещения АО «ГНЦ НИИАР» в 2010 – 2020 гг.

Объект окружающей среды, ед. изм.	Радионуклид								
	³ H	⁵⁴ Mn	⁶⁰ Co	⁶⁵ Zn	⁹⁰ Sr	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu
Зона наблюдения (5–12,5 км)									
Атмосферный воздух, Бк/м ³	–*	–	–	–	–	–	–	9,3·10 ⁻⁹	1,4·10 ⁻⁹
Почва, Бк/кг	–	–	2,7	–	6,0	–	23,7	–	–
Поверхностная вода, Бк/л	–	–	–	–	0,002	–	0,003	–	–
Донные отложения, Бк/кг	–	–	2,8	–	0,6	–	4,5	–	–
Участок локального радиоактивного загрязнения (0,236 км ²) в санитарно-защитной зоне									
Почва до модернизации ПЛК, Бк/кг	–	20,9	13,6	5,2	260	23,6	18000	–	8300
Почва после модернизации ПЛК, Бк/кг	–	2,0	2,5	–	22	2,0	1500	–	599
Поверхностная вода проливневой канализации, Бк/л	1·10 ⁻⁴	–	–	–	0,02	–	0,03	–	–
* – данные отсутствуют									

С учетом длительной работы АО «ГНЦ НИИАР» и современной радиозэкологической обстановки рассматривалось три сценария формирования дозовых нагрузок на биоту: «Базовый» – в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» на расстоянии 5 – 12,5 км; «Критичный до модернизации ПЛК» – локальное радиоактивное загрязнение в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) предприятия площадью 0,236 км² по состоянию на 01.01.2011 г.;

«Критичный после модернизации ПЛК» – тот же участок в СЗЗ на 01.01.2020 г.

Оценку мощности дозы представительных организмов биоты наземной и водной экосистем в зоне наблюдения и СЗЗ АО «ГНЦ НИИАР» проводили на основании отечественной нормативной базы Минприроды РФ³ и рекомендаций МКРЗ [1, 5] с помощью программного кода ERICA Assessment Tool (версия 2.0), созданного при реализации международного проекта ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and management) [6, 7]. Код ERICA Tool (<https://erica-tool.com/>) позволяет

³ Рекомендации Р 52.18.820–2015. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет / Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. и др. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. 50 с. [Recommendations R 52.18.820–2015. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, Roshydromet / Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. et al. Assessment of radiation and ecological impact on natural environment objects based on radiation situation monitoring data. Obninsk, 2015. 50 p. (in Russian)].

проводить комплексный анализ воздействия радиационно опасного объекта на биоту, используя интегрированную методологию, которая широко используется во всем мире, в т.ч. в России [3, 21]. Методология ERICA включает в себя три уровня оценки.

1. *Скрининг* на основе консервативного подхода и упрощенных моделей.

2. *Детальная детерминированная оценка* для конкретных экосистем и референтных видов биоты с использованием данных измерений активности радионуклидов в объектах окружающей среды.

3. *Вероятностная оценка* с учетом неопределенностей и статистических распределений параметров радиоактивного загрязнения.

В данном исследовании оценка мощности поглощенных доз биоты проведена на Уровне 2, который позволил

- использовать реальные результаты мониторинга содержания радионуклидов в воздухе, почве, поверхностной воде и донных отложениях;
- выбрать конкретные референтные организмы, релевантные для наземной и водной экосистем региона исследования;
- задать факторы пребывания (*occupancy factors*), отражающие поведение организмов в среде обитания;
- рассчитать суммарную (внутреннюю и внешнюю) мощность поглощенной дозы (мкГр/ч) для каждого референтного организма;
- сравнить полученные дозы с пороговым значением, ниже которого риск для популяций биоты считается пренебрежимо малым.

Для каждого референтного организма в ERICA Tool оценена мощность поглощенной дозы (\dot{D}_{tot}) по формуле

$$\dot{D}_{tot} = \dot{D}_{int} + \dot{D}_{ext}, \text{ мкГр/ч,}$$

где \dot{D}_{int} – мощность поглощенной дозы облучения от радионуклидов, накопленных в организме; \dot{D}_{ext} – мощность поглощенной дозы облучения от изотопов в воздухе, почве, воде, донных отложениях.

Расчет дозы внутреннего облучения основан на коэффициентах накопления (*Concentration Ratios, CR*), определяемых как отношение активности радионуклида в организме (Бк/кг свежего веса) к его концентрации в среде (Бк/кг сухого веса почвы или Бк/л воды). Значения *CR* для референтных организмов наземных и водных экосистем включены в базу данных ERICA на основании обобщения международными экспертами нескольких тысяч публикаций с результатами научных исследований.

Доза внешнего облучения организмов рассчитывается с учетом факторов пребывания (*occupancy factors*), задающих долю времени, которую организм проводит в различных компонентах среды (в толще почвы, на поверхности почвы, в воде, на поверхности воды, в донных отложениях и т.д.). В настоящей работе использованы стандартные значения *occupancy factors*, соответствующие максимальному облучению организмов (консервативный подход) согласно [7].

Для оценки дозовых нагрузок на биоту применяли коэффициенты пересчета дозы (*Dose Conversion Coefficients, DCC*), полученные методом Монте-Карло на основе трехмерных эллипсоидных моделей организмов с учетом их массы, геометрии и состава тканей. *DCC* учитывают тип излучения (альфа, бета, гамма), его энергию и путь

Влияние деятельности АО «ГНЦ НИИАР» на дозы облучения референтных видов биоты до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах

формирования дозы облучения (внутреннее/внешнее). При расчете доз облучения биоты от радионуклидов цезия и стронция учитывались и их дочерние продукты ($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$) с периодом полураспада менее 10 сут.

Используемый в качестве граничного значения облучения референтных организмов пороговый уровень 10 мкГр/ч рекомендован в рамках проекта ERICA для всех экосистем как наиболее консервативный («жесткий») [7, 22]. Этот уровень соответствует дозе сверх фона, ниже которой менее 5% видов могут испытывать негативные биологические эффекты (снижение продуктивности, увеличение заболеваемости и смертности). Он согласуется с принципами защиты окружающей среды от ионизирующего излучения, принятыми МКРЗ и МАГАТЭ [1, 2].

Результаты и обсуждение

Расчеты мощности доз облучения представительных видов растений и животных наземной и водной экосистем от техногенных радионуклидов (^3H , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{65}Zn , $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$, ^{134}Cs , $^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}$, ^{238}Pu , ^{239}Pu) проведены для трех сценариев формирования дозовых нагрузок: в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» и локального радиоактивного загрязнения в СЗЗ предприятия до и после модернизации ПЛК.

Дозовые нагрузки на биоту в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР»

При «базовом» сценарии мощности доз облучения референтных видов биоты наземной экосистемы в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» варьируют в пределах порядка величин 0,005–0,03 мкГр/ч. У ряда видов (жук-навозник, дождевой червь, пчела и улитка) мощности доз определяются на 80% и более внешним облучением, а у козули, наоборот, внутренним (рис. 1А).

Соотношение доз внешнего и внутреннего облучений референтных видов, как и их суммарная дозовая нагрузка, определяются не только содержанием техногенных радионуклидов в компонентах окружающей среды, но и поведенческими характеристиками животных, включая питание, а также особенностями обитания растений. Так максимальные мощности доз за счет внешнего облучения формируются у животных (детритофаги, дождевой червь), проводящих значительную часть времени в верхнем слое почвы (0–10 см), где аккумулируются радионуклиды многолетних атмосферных выпадений.

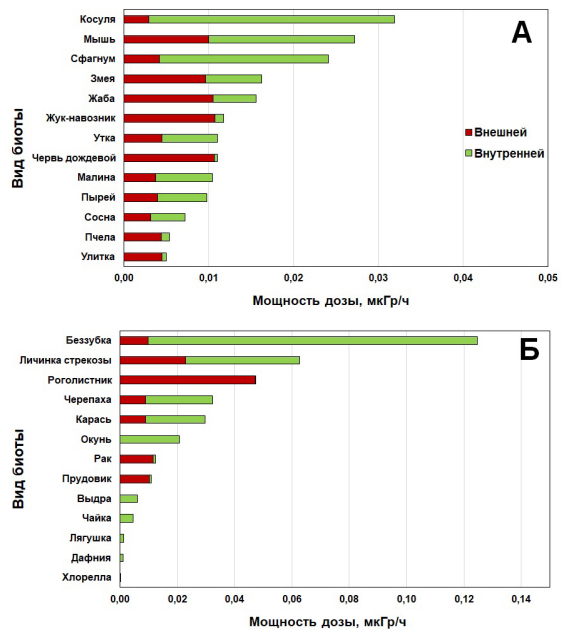


Рис. 1. Мощность дозы облучения референтных видов биоты: А – наземной и Б – пресноводной экосистем от техногенных радионуклидов в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР»

Наоборот, организмы, обитающие над ее поверхностью, имеют дозовые нагрузки, обусловленные в значительной степени внутренним облучением. Из рисунка 1А также видно, что древесные и кустарниковые растения получают меньшую дозу облучения, чем животные. Мощность дозы представительных видов наземной биоты в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» определяется преимущественно ^{137}Cs и его дочерним $^{137\text{m}}\text{Ba}$. Среди рассмотренных техногенных радионуклидов вклад этих изотопов в дозоформирование достигает 65%. Доля ^{90}Sr с дочерним ^{90}Y в мощности доз референтных организмов наземной экосистемы составляет около 20%, а ^{60}Co – 14%. Роль других техногенных радиоизотопов в формировании дозовой нагрузки на наземную биоту незначительна. Обобщенный рейтинг вклада техногенных радионуклидов в дозу облучения представительных организмов наземной экосистемы в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» выглядит следующим образом: $(^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}) > (^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}) > ^{60}\text{Co} > ^{238}\text{Pu} > ^{239}\text{Pu}$. Суммарная мощность дозы всех референтных видов наземной экосистемы в 300–2000 раз ниже установленного порога 10 мкГр/ч, что говорит об абсолютной безопасности растений и животных в зоне наблюдения радиационно опасного объекта.

В пресноводной экосистеме Черемшанского залива, находящейся под влиянием многолетней деятельности АО «ГНЦ НИИАР», максимальные дозовые нагрузки 0,06 – 0,12 мкГр/ч получают бентосные организмы (двустворчатые моллюски и личинки насекомых), обитающие в донных отложениях (рис. 1Б). При этом у двустворчатого моллюска беззубки до 90% дозы формируется за счет внутреннего облучения, так как питание гидробионта осуществляется путем фильтрации взвешенных органических частиц, адсорбирующих радионуклиды, и микроорганизмов из воды. У личинки стрекозы до 35 – 40% дозы складывается путем внешнего облучения, так как эта стадия развития насекомого проходит преимущественно в иле, который является аккумулятором радионуклидов в водной экосистеме [23]. Максимальный вклад внешнего облучения в суммарную дозу (93 – 99%) отмечается у рака, роголистника и прудовика, а минимальный (0,01 – 0,02%) – у референтных видов биоты (чайка, выдра), обитающих на поверхности воды, значительно экранирующей донные грунты с депонированными в них техногенными радиоизотопами. Роль радионуклидов донных отложений в дозоформировании биоты наглядно видна при сравнении видов, относящихся к единой таксономической группе, но ведущих разный образ жизни в одном водоеме. Например, у придонных видов рыб (карась) доза выше, чем у пелагических (окунь). У двустворчатых моллюсков, обитающих на дне и дышащих через жабры, доза также более высокая, чем у брюхоногих, живущих на поверхности водоемов и имеющих легочное дыхание. Вклад техногенных радионуклидов в дозовые нагрузки пресноводной биоты несколько отличается от наземной. Так ^{90}Sr и дочерний ^{90}Y среди всех референтных видов водной экосистемы определяют максимальную мощность дозы в широком диапазоне (в среднем 60%): от 10% у амфибий и фитопланктона до 95% у двустворчатых моллюсков и личинок насекомых. В ихтиофауне радиостронций определяет до 90% мощности дозы. В работе [9] также показано, что ^{90}Sr аккумулируется в рыбе и его роль в дозоформировании ихтиофауны является доминирующей. Данный радионуклид замещает в костях рыб кальций, становясь значимым источником внутреннего облучения, особенно у хищных видов (окунь), поступая из тканей поедаемых ими мирных видов рыб. ^{137}Cs и дочерний $^{137\text{m}}\text{Ba}$ формируют в среднем 25% дозы облучения водной биоты: от минимального 1% у двустворчатых моллюсков, до макси-

Влияние деятельности АО «ГНЦ НИИАР» на дозы облучения референтных видов биоты до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах

мума в 90% у амфибий. ^{60}Co отвечает в среднем за 15% дозы, от 10% у фитопланктона до 80% у высшей водной растительности. В целом, объединенный рейтинг вклада техногенных радионуклидов в формирование доз облучения пресноводной биоты будет выглядеть следующим образом: $(^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}) > (^{137}\text{Cs} + ^{137\text{m}}\text{Ba}) > ^{60}\text{Co}$, а суммарная мощность дозы всех референтных видов водной экосистемы от 80 раз до 45 тыс. раз ниже граничного порога 10 мкГр/ч, что подтверждает радиационную безопасность водных обитателей Черемшанского залива Куйбышевского водохранилища в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» с большими коэффициентами запаса.

Дозовые нагрузки на биоту участка локального радиоактивного загрязнения в санитарно-защитной зоне АО «ГНЦ НИИАР»

При оценке доз облучения биоты в пределах локального радиоактивного загрязнения СЗЗ АО «ГНЦ НИИАР» («критичные» сценарии) консервативно принято допущение о потенциальном нахождении на этом ограниченном участке территории тех же видов, что и при «базовом» сценарии. Однако вероятность обитания на нем, например, крупных млекопитающих наземной экосистемы или рыбы в проливневом канале минимальна.

Как видно из рис. 2А, в отличие от наземной экосистемы зоны наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» в пределах локального радиоактивного загрязнения в СЗЗ до модернизации ПЛК, дозовые нагрузки на референтные виды биоты были в 400 – 6500 раз выше, при этом они в большей степени определялись внутренним облучением. Так кроме сосен и змей внутреннее облучение давало вклад в суммарную мощность дозы от 50 до 95% у остальных видов растений и животных. Важно отметить, что у большей части рассмотренных референтных организмов (8 из 13) мощность дозы облучения на данном локальном участке превышала граничный уровень 10 мкГр/ч в 1,3 – 4,4 раза. Это определяло потенциальный риск возникновения различных негативных биологических эффек-

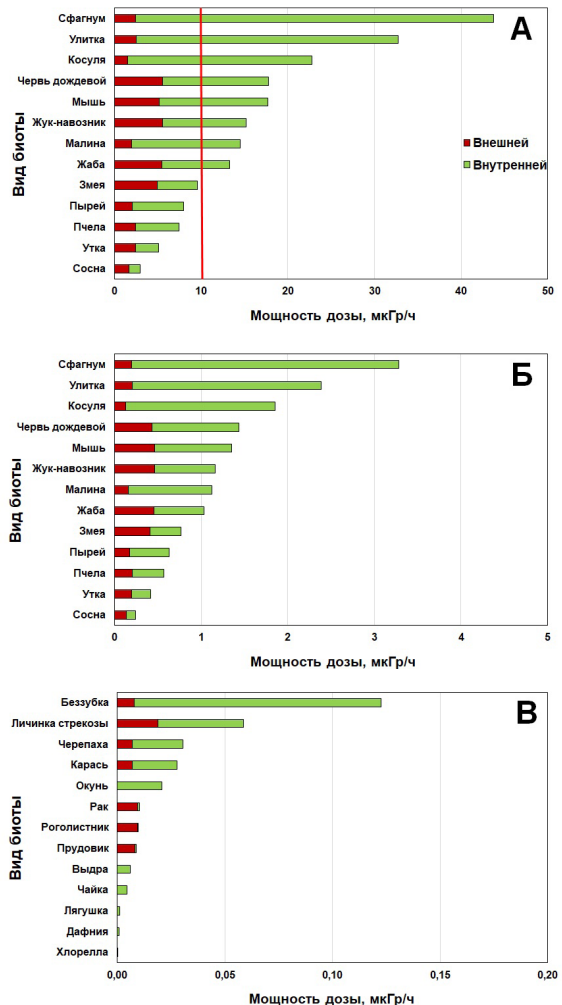


Рис. 2. Мощность дозы облучения референтных видов биоты: А – наземной экосистемы до модернизации ПЛК, Б – наземной экосистемы после модернизации ПЛК и В – пресноводной экосистемы от техногенных радионуклидов локального радиоактивного загрязнения в санитарно-защитной зоне АО «ГНЦ НИИАР» (красная линия – порог облучения 10 мкГр/ч)

тов у растений (сфагнум, малина) и животных (жук-навозник, дождевой червь, улитка, жаба, мышь, косуля). Такого рода эффекты могли проявляться в частичном снижении продуктивности, увеличении частоты заболеваемости и смертности организмов, что требовало отдельного наблюдения за выделенными «критичными» растениями и животными на данном локальном участке с учетом фактического обитания тех или иных видов.

После модернизации промливневой канализации в рамках реализации ФЦП «ЯРБ-1» радиационная обстановка на этом локальном участке в СЗЗ значительно улучшилась, а мощности доз облучения референтных видов биоты снизились в 12 – 14 раз (рис. 2Б). При этом даже максимальная мощность дозы у сфагнума (3,28 мкГр/ч) стала в три раза ниже установленного граничного уровня безопасности биоты в 10 мкГр/ч. Это говорит о высокой эффективности работ по модернизации ПЛК не только для обеспечения радиационной безопасности персонала в санитарно-защитной зоне АО «ГНЦ НИИАР», но и живых организмов наземной экосистемы, обитающих в пределах данного участка.

Мощности доз облучения референтных организмов пресноводной экосистемы локального радиоактивного загрязнения практически не отличаются от таковой зоны наблюдения АО «ГНЦ НИИАР», поскольку определяются преимущественно радионуклидами поверхностных вод промливневого канала (рис. 2В).

В зоне локального радиоактивного загрязнения СЗЗ АО «ГНЦ НИИАР» на восемь самых облучаемых референтных видов с превышением порога дозы 10 мкГр/ч до модернизации ПЛК (сценарий 2) наибольшее негативное влияние оказывали два радионуклида: ^{239}Pu и ^{137}Cs с дочерним $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (рис. 3). Так, вклад изотопа плутония в мощность дозы варьировал в диапазоне 15 – 90%, а радиоцезия в пределах 10 – 85%. Роль ^{90}Sr в формировании мощности дозы выделенных видов растений и животных наземной экосистемы не превышала 1,5%, а вклад других техногенных радионуклидов составлял доли процента.

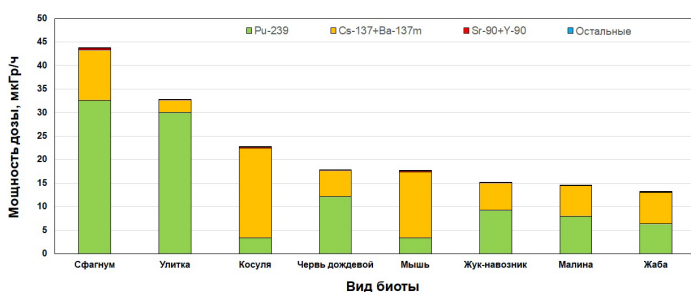


Рис. 3. Вклад техногенных радионуклидов локального радиоактивного загрязнения в санитарно-защитной зоне АО «ГНЦ НИИАР» до модернизации ПЛК в мощность дозы референтных видов биоты наземной экосистемы с превышением порога облучения 10 мкГр/ч

Заключение

Анализ результатов исследования показал, что в зоне наблюдения АО «ГНЦ НИИАР» все растения и животные наземной и пресноводной экосистем находятся в состоянии радиационной безопасности, так как мощности доз облучения референтных видов на несколько порядков ниже установленного граничного уровня 10 мкГр/ч.

Для дальнейшей оценки влияния деятельности научного центра на живую природу в качестве референтных видов биоты следует выбрать наиболее облучаемых представителей наземной экосистемы: дождевого червя, жука-навозника, жабу, змею и мышь, а также два вида водной экосистемы: беззубку и личинку стрекозы.

На участке локального радиоактивного загрязнения в СЗЗ АО «ГНЦ НИИАР» до модернизации ПЛК наиболее «критичными» являлись два вида растений и шесть животных наземной экосистемы, у которых мощность дозы облучения потенциально могла превысить граничный уровень 10 мкГр/ч до четырех раз. После модернизации ПЛК на данном участке мощности доз облучения референтных видов снизились до 12 – 14 раз и стали полностью соответствовать критерию безопасности живой природы, что подтверждает высокую эффективность работ в рамках реализации ФЦП «ЯРБ-1» на площадке АО «ГНЦ НИИАР».

Литература

1. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Annals of the ICRP. 38(4-6), 2008, 251 p. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108> (дата обращения 14.01.2026).
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No. GSR. Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards> (дата обращения 14.01.2026).
3. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиозоологических процессов в окружающей среде. М.: ООО «Маска», 2022. 638 с. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/ModelirovanieREP_2022.pdf (дата обращения 14.01.2026).
4. IAEA. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001, 216 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/6024/generic-models-for-use-in-assessing-the-impact-of-discharges-of-radioactive-substances-to-the-environment> (дата обращения 14.01.2026).
5. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. Annals of the ICRP. 46 (2), 2017, 136 p. URL: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20136> (дата обращения 14.01.2026).
6. Beresford N., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.M., Ough-ton D., Pröhl G., Zinger I. D-ERICA: An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation: Description of purpose, methodology and application. 2007, 82 p. URL: <https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/115017395/D-Erica.pdf> (дата обращения 14.01.2026).
7. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A. A new version of the ERICA Tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;153:141-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.011>
8. Бурякова А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Ведерникова М.В., Панченко С.В. Оценка дозы и экологического риска для объектов биоты в районе расположения горно-химического комбината. *Радиационная биология. Радиозоология*. 2020;60(6):661–670. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869803120060156>
9. Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dose Power Estimation for Fish in the Lower Reaches of the Ob River. *Inland Water Biology*. 2022;15(3):324–330. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995082922030051>

10. Городецкий В.Г., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Динамика дозовых нагрузок на ихтиофауну водоема-охладителя Белоярской АЭС. *Атомная энергия*. 2022;132(5):297–302. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5196> (дата обращения 14.01.2026).

11. Крышев А.И., Косых И.В., Крышев И.И. Анализ экологического риска радиоактивного загрязнения Ольховского болота. *Атомная энергия*. 2022;132(1):43–46. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/5075> (дата обращения 14.01.2026).

12. Karpenko E.I., Spiridonov S.I., Kurtmulaeva V.E., Sanzharova N.I., Panov A.V., Tsygvintsev P.N. Evaluation of the effect of radiation on the biota within the regions of the Leningradskaya and Beloyarskaya NPPs. *Atomic Energy*. 2016;119(3):213–217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0049-8>.

13. Тузов А.А., Гулевич А.В., Кочетков Л.А., Третьяков И.Т., Лукасевич И.Б., Звир А.И., Ижухов А.Л., Леонтьева-Смирнова М.В., Целищев А.В. Перспективные задачи МБИР в обоснование характеристик ЯЭУ нового поколения и его экспериментальные возможности. *Атомная энергия*. 2015;119(1):29–33. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/754> (дата обращения 14.01.2026).

14. Жемков И.Ю., Ижухов А.Л., Новоселов А.Е., Погляд Н.С., Святкин М.Н. Экспериментальные исследования в БОР-60 и анализ возможности их продолжения в МБИР. *Атомная энергия*. 2014;116(5):280–283. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1050> (дата обращения 14.01.2026).

15. Драгунов Ю.Г., Третьяков И.Т., Лопаткин А.В., Романова Н.В., Лукасевич И.Б. Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) – инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий. *Атомная энергия*. 2012;113(1):25–28. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1355> (дата обращения 14.01.2026).

16. Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Цыгвинцев П.Н., Гешель И.В. Оценка радиационной обстановки в районе расположения АО «ГНЦ НИИАР» до начала эксплуатации ИЯУ МБИР. Часть 1. Наземные экосистемы. *Радиация и Риск*. 2022;31(2):36–47. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-2-36-47>

17. Цветнова О.Б., Кортунков Э.А., Щеглов А.И. Радиоэкологическая обстановка в наземных и водных экосистемах в районе предприятия «Государственный научный центр – научно-исследовательский институт атомных реакторов». *Вестник московского университета. Серия 17. Почвоведение*. 2024;79(4):228–237. DOI: <https://doi.org/10.59599/MSU0137-0944-17-2024-79-4-228-237>

18. Панов А.В., Исамов Н.Н., Цыгвинцев П.Н., Кузнецов В.К., Гешель И.В. Оценка радиационной обстановки в районе расположения АО «ГНЦ НИИАР» до начала эксплуатации ИЯУ МБИР. Часть 2. Водные экосистемы. *Радиация и Риск*. 2022;31(4):82–93. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-4-82-93>

19. Панов А.В., Микаилова Р.А. Влияние научно-исследовательского института атомных реакторов на дозы облучения населения до начала эксплуатации многоцелевого реактора на быстрых нейтронах. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:71–85. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.07>

20. Серебряков И.С., Брыкин С.Н. Радиационная обстановка на предприятиях Государственной корпорации Росатом в 2010 г. М.: ФГУП РосРАО, 2011, 136 с.

21. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Аналитические методы дозиметрии ионизирующих излучений в окружающей среде. М.: ООО «ИПЦ Маска», 2024, 236 с. URL: <https://www.cnsrb.ru/content/2024/04365895.pdf> (дата обращения 14.01.2026).

22. Garnier-Laplace J., Gilbin R. Derivation of Predicted-No-Effect-Dose-Rate values for ecosystems (and their sub-organizational levels) exposed to radioactive substances. Report D5 to the ERICA project. Swedish Radiation Protection Authority, 2006, 88 p.

23. 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;54(8):3034-3042.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.03.004>

Поступила в редакцию 16.03.2026

После доработки 20.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Панов Алексей Валерьевич, исполняющий обязанности директора, профессор РАН, д.биол.н.,

E-mail: riar@mail.ru

Микаилова Рена Александровна, научный сотрудник,

E-mail: renchik_vhi@mail.ru

UDC 539.163:574.24:57.084.2:614.876:57.087

Impact of the RIAR JSC Activity on the Radiation Doses of Reference Biota Species Prior to the Commissioning of a Multi-Purpose Fast Neutron Reactor

Panov A.V.¹, Mikailova R.A.²

¹ OINPE MEFHI,

1 Studgorodok, 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

² NRC «Kurchatov Institute»,

1 Akad. Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

Abstract

The study presents an implementation of the eco-centric approach to radiological protection of natural biota in the context of using ionizing radiation sources. An assessment of dose rates to representative organisms was carried out in the area of the Research Institute of Atomic Reactors (RIAR JSC) prior to the commissioning of the Multipurpose Fast Neutron Reactor (MBIR Research Reactor Facility). Radiation doses were calculated for 6 plant and 20 animal species from anthropogenic radionuclides (³H, ⁵⁴Mn, ⁶⁰Co, ⁶⁵Zn, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu) in air, components of terrestrial and aquatic ecosystems within the monitoring zone of the radiation-hazardous facility, and in areas of local radioactive contamination within the enterprise's sanitary protection zone. Dose rate assessments for reference biota species were performed using the ERICA Tool software, recommended by ICRP and IAEA. It was shown that, under a conservative dose rate threshold of 10 μGy/h, the activities of RIAR JSC do not exert adverse effects on the biota of terrestrial (dose rate range for plants and animals: 0.005–0.03 μGy/h) and freshwater (0.0002 – 0.13 μGy/h) ecosystems within the monitoring zone of the research center. The most exposed organisms in both ecosystems were identified and are recommended for use as "reference species" in ecological monitoring within the observation zone of RIAR JSC prior to the modernization of the industrial stormwater drainage system, there was a potential risk of adverse effects from ²³⁹Pu (dose contribution: 15–90%) and ¹³⁷Cs (contribution: 10–85%) on 2 plant species and 6 terrestrial animal species, assuming the 10 μGy/h exposure threshold. Following the commissioning of the upgraded industrial stormwater drainage system, dose loads on living organisms decreased by a factor of 12–14, ensuring conditions of complete radiological safety for biota.

Keywords: RIAR JSC, MBIR, artificial radionuclides, terrestrial and freshwater ecosystems, biota, reference species, ERICA, dose rate, radionuclide ranking, radiation safety.

For citation: Panov A.V., Mikailova R.A. Impact of the RIAR JSC Activity on the Radiation Doses of Reference Biota Species Prior to the Commissioning of a Multi-Purpose Fast Neutron Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:224–237. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.15> (in Russian).

References

1. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. *Annals of the ICRP*. 38(4–6), 2008, 251 p. URL: <https://www.icrp.org/publication.asp?id=icrp%20publication%20108> (accessed Jan. 14, 2026).
2. IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No. GSR. Part 3. Vienna: IAEA, 2014, 436 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards> (accessed Jan. 14, 2026).
3. Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Modeling of radioecological processes in the environment. Moscow, 000 Maska, 2022, 638 p. URL: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/publications/ModelirovanieREP_2022.pdf (accessed Jan. 14, 2026) (in Russian).
4. IAEA. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety Reports Series No. 19. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001, 216 p. URL: <https://www.iaea.org/publications/6024/generic-models-for-use-in-assessing-the-impact-of-discharges-of-radioactive-substances-to-the-environment> (accessed Jan. 14, 2026).
5. ICRP. International Commission on Radiological Protection. Publication 136. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. *Annals of the ICRP*. 46(2), 2017, 136 p. URL: <https://icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20136> (accessed Jan. 14, 2026).
6. Beresford N., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.M., Oughton D., Pröhl G., Zinger I. D-ERICA: An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation: Description of purpose, methodology and application. 2007, 82 p. URL: <https://wiki.ceh.ac.uk/download/attachments/115017395/D-Erica.pdf> (accessed Jan. 14, 2026).
7. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A. A new version of the ERICA Tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016;153:141–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.011>
8. Buryakova A.A., Kryshev I.I., Sazykina T.G., Vedernikova M.V., Panchenko S.V. Assessment of dose and environmental risk to biota in the area of mining and chemical combine. *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija*. 2020;60(6):661–670. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869803120060156> (in Russian).
9. Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dose Power Estimation for Fish in the Lower Reaches of the Ob River. *Inland Water Biology*. 2022;15(3):324–330. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995082922030051>
10. Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dynamics of Fish Fauna Dose Loads in the Cooling-Water Reservoir of the Beloyarsk NPP. *Atomic Energy*. 2022;132(5):314–318. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-023-00948-x>
11. Kryshev A.I., Kosykh I.V., Kryshev I.I. Environmental risk analysis of radioactive contamination of the Ol'khovskoe marsh. *Atomic Energy*. 2022;132(1):45–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-022-00902-3>
12. Karpenko E.I., Spiridonov S.I., Kurtmulaeva V.E., Sanzharova N.I., Panov A.V., Tsygvintsev P.N. Evaluation of the effect of radiation on the biota within the regions of the Leningradskaya and Beloyarskaya NPPs. *Atomic Energy*. 2016;119(3):213–217. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0049-8>

13. Tuzov A.A., Gulevich A.V., Kochetkov L.A., Tret'yakov I.T., Lukasevich I.B., Zvir A.I., Izhutov A.L., Leont'eva-Smirnova M.V., Tselishchev A.V. Potential problems of MBIR in validating new-generation nuclear power facilities and its experimental possibilities. *Atomic Energy*. 2015;119(1):32–36. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-015-0025-3>
14. Zhemkov I.Y., Izhutov A.L., Novoselov A.E., Poglyad N.S., Svyatkin M.N. Experimental research in BOR-60 and analysis of its continuation in MBIR. *Atomic Energy*. 2014;116(5):338–342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-014-9862-8>
15. Dragunov Yu.G., Tretiyakov I.T., Lopatkin A.V., Romanova N.V., Lukasevich I.B. MBIR multi-purpose fast reactor–innovative tool for the development of nuclear power technologies. *Atomic Energy*. 2012;113(1):24–28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9590-x>
16. Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Geshel I.V. Radiation situation in the area of the State Scientific Centre “Research Institute of Atomic Reactors” before putting a multi-purpose fast neutron reactor into operation. Part 1. Terrestrial ecosystems. *Radiation and Risk*. 2022;31(2):36–47. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-2-36-47> (in Russian).
17. Tsvetnova O.B., Kortunkov E.A., Shcheglov A.I. Radioecological situation in terrestrial and aquatic ecosystems in the area of the location of the enterprise «State scientific center – research institute of nuclear reactors». *Lomonosov Soil Science Journal*. 2024;79(4):228–237. DOI: <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-4-228-237> (in Russian).
18. Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K., Tsygvintsev P.N., Geshel I.V. Radiation situation in the area of the State Scientific Centre “Research Institute of Atomic Reactors” before putting a multi-purpose fast neutron reactor into operation. Part 2. Freshwater ecosystems. *Radiation and Risk*. 2022;31(4):82–93. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2022-31-4-82-93> (in Russian).
19. Panov A.V., Mikailova R.A. Impact of the State Scientific Centre “Research Institute of Atomic Reactors” on the Public Radiation Doses Prior to the Commissioning of a Multi-Purpose Fast Neutron Reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:71–85. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.07> (in Russian).
20. Serebryakov I.S., Brykin S.N. Radiation situation at enterprises of the State Corporation Rosatom in 2010. Moscow, FSUE RosRAO, 2011, 136 p. (in Russian).
21. Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Analytical methods of dosimetry of ionizing radiation in the environment. Moscow, OOO IPC Maska, 2024. 236 p. URL: <https://www.cnsnb.ru/content/2024/04365895.pdf> (accessed Jan. 14, 2026) (in Russian).
22. Garnier-Laplace J., Gilbin R. Derivation of Predicted-No-Effect-Dose-Rate values for ecosystems (and their sub-organizational levels) exposed to radioactive substances. Report D5 to the ERICA project. Swedish Radiation Protection Authority, 2006, 88 p.
23. 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;54(8):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

Rena A. Mikailova, researcher,

E-mail: renchik_vhi@mail.ru