

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫМИ РАДИОНУКЛИДАМИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ ХРАНЕНИЯ РАО

И. И. Крышев¹, Н. Н. Павлова¹, И. В. Косых¹, А. А. Бурякова¹, Н. А. Аникина¹,
И. Я. Газиев¹, С. В. Панченко², М. В. Ведерникова²

¹ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Калужская область

²Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2025 г.

Выполнена оценка радиационно-экологической обстановки по данным многолетнего мониторинга в районах расположения хранилищ радиоактивных отходов ряда АЭС (Смоленской, Билибинской и Белоярской) и радиохимических комбинатов (ФГУП «ГХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК»). Источником информации являлись данные мониторинга, представленные в Ежегодниках Росгидромета «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств», экологических отчетах предприятий, а также в открытой научной печати. Для оценки радиационной безопасности окружающей среды в районах расположения хранилищ радиоактивных отходов были рассчитаны интегральные показатели загрязнения, представляющие собой сумму отношений наблюдаемых концентраций радионуклидов в объекте природной среды к соответствующим значениям контрольных уровней. В целях сохранения благоприятной окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в качестве контрольного уровня содержания радионуклидов в компоненте природной среды выбирается минимальное значение из рассчитанных по радиационному (в соответствии с НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010, Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 №1069) и природоохранному/экологическому (Р 52.18.853–2016, Р 52.18.913–2021) критериям. По данным многолетнего мониторинга для рассмотренных районов расположения хранилищ РАО значение интегрального показателя загрязнения значительно ниже единицы для всех компонент окружающей среды санитарно-защитной зоны (атмосферный воздух, водные объекты, почва), что свидетельствует о непревышении экологически безопасных уровней облучения объектов живой природы.

Ключевые слова: интегральный показатель загрязнения, радионуклиды, радиоактивные отходы, окружающая среда, радиационная обстановка, радиационно-экологический мониторинг, объекты живой природы.

Введение

Обеспечение радиационной безопасности человека и окружающей среды при обращении с радиоактивными отходами достигается многобарьерной защитой, при которой используются как естественные, так и искусственные барьеры для изоляции радиоактивных отходов (РАО) от биосферы. В соответствии с международными

основными нормами безопасности ОНБ-2014 подтверждение радиационной безопасности окружающей среды является важным элементом радиационной защиты при использовании атомной энергии [1]. Федеральным законом от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» заданы предпосылки для учета

экологического воздействия объектов захоронения РАО, однако до настоящего времени они не могут найти реального применения вследствие недостаточной разработанности критериев и показателей радиоэкологической безопасности этих объектов, а также порядка анализа их радиационного воздействия на объекты живой природы.

Наиболее общими критериями радиационной безопасности окружающей среды являются оценки дозы и экологического риска, рассчитанные с учетом множественных путей облучения объектов биоты. В соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 10 июля 2014 г. № 639 оценки и прогноз экологических рисков от радиоактивного загрязнения окружающей среды являются важным принципом функционирования системы мониторинга и ее функциональных подсистем.

В Рекомендациях Росгидромета по порядку оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды используются следующие показатели: индекс экологического риска, рассчитываемый по мощности дозы облучения референтных организмов биоты; интегральный показатель загрязнения территории; обобщенный показатель риска, оцениваемый в баллах с учетом интенсивности радиационного воздействия, площади и временной динамики загрязнения [2].

Целью работы является оценка радиоэкологической обстановки в районах расположения пунктов хранения РАО на основе анализа интегральных показателей загрязнения (ИПЗ) компонентов окружающей среды по данным многолетнего мониторинга в санитарно-защитных зонах (СЗЗ) ряда АЭС (Смоленской, Билибинской и Белоярской) и радиохимических комплексов (ФГУП «ГХК», ФГУП «ПО «Маяк» и АО «СХК»).

Базы радиоэкологических данных

Современные радиоэкологические базы данных (РЭБД) для этих объектов включают данные многолетнего мониторинга содержания техногенных радионуклидов в приземном слое атмосферы, осадках, почве, растительности, воде скважин, рек и промышленных водоемов предприятий вблизи хранилищ РАО, донных отложениях, местных пищевых продуктах, а также результаты измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) внешнего гамма-излучения.

На данный момент РЭБД содержат 2068 записей по Смоленской АЭС, 1832 — по Билибинской АЭС, 1869 — по Белоярской АЭС,

4816 — по ФГУП «ГХК», 6754 — по ФГУП «ПО «Маяк» и 2999 — по АО «СХК». Источником информации для формирования РЭБД являются результаты мониторинга, представленные в Ежегодниках Росгидромета «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств», экологических отчетах предприятий, а также в открытой научной печати.

Методика оценки радиационной безопасности окружающей среды

В качестве основного экологического критерия радиационного риска принимается максимально допустимая мощность дозы, не приводящая к влиянию на заболеваемость, размножение и продолжительность жизни организмов биоты. Предельно допустимая радиационная нагрузка (ПДРН): 1 мГр/сут — для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), 10 мГр/сут — для растений, кроме сосны, и беспозвоночных животных [3], [4].

В соответствии с постулатом порогового действия ионизирующего излучения на объекты живой природы при непревышении ПДРН сохраняются живучесть популяций и видовое разнообразие, являющееся одним из важных интегральных параметров биотического сообщества как в естественном состоянии, так и в условиях антропогенного воздействия. Данный показатель характеризуется высокой социальной и экологической значимостью, чувствительностью к источнику радиационного воздействия и является, по существу, синонимом качества окружающей среды.

Дополнительным критерием содержания радионуклидов в компонентах природной среды является ограничение уровнями, при которых происходит их переход в категорию РАО.

Методика оценки радиационной безопасности экосистемы по данным радиоэкологического мониторинга и результаты ее апробации для объектов использования атомной энергии и радиационно загрязненных территорий изложены в ряде работ [2], [5]—[15].

Для оценки радиационной безопасности окружающей среды в районах расположения хранилищ РАО были рассчитаны ИПЗ, представляющие собой сумму отношений наблюдаемых концентраций радионуклидов в объекте природной среды к соответствующим значениям контрольных уровней. В целях сохранения благоприятной окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в качестве такого показателя содержания радионуклидов в компоненте

окружающей среды выбирается минимальное значение из рассчитанных по радиационному (в соответствии с НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010, Постановлением Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069) и природоохранному/экологическому [16], [17] критериям. Значение ИПЗ меньше единицы обеспечивает радиационную безопасность окружающей среды.

Смоленская АЭС (САЭС)

Санитарно-защитная зона САЭС определена кругом радиусом 3 км. Хранилища жидких и твердых РАО размещены на территории промплощадки. РЭБД в районе их расположения включает результаты многолетнего мониторинга активности радионуклидов в воздухе, воде, донных отложениях, почве, травянистой растительности промплощадки, СЗЗ и контрольных пунктах (рис. 1). Также в РЭБД представлены среднегодовые и максимальные значения МАЭД.

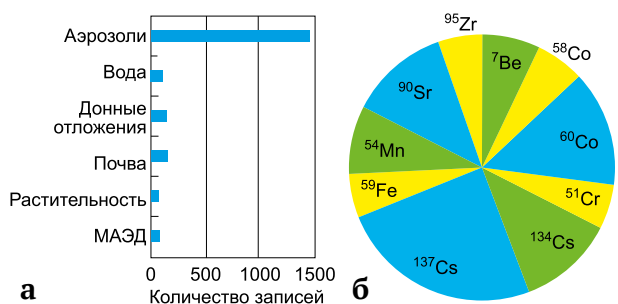


Рис. 1. Распределение записей базы данных по объектам мониторинга (а) и радионуклидам (б)

Кроме указанных на рис. 1(б) радионуклидов, в базе содержится небольшое количество записей о содержании ⁵⁸Fe (0,6%), ⁹⁵Nb (1,3%) и ¹³¹I (0,1%). Там же приведены значения удельной и объемной активности ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs во всех контролируемых объектах окружающей среды (за исключением ⁹⁰Sr в донных отложениях). Отметим, что эти радионуклиды входят в перечень релевантных для оценки радиационной безопасности при обращении с РАО, указанных в статье [18].

Для оценки радиационной безопасности окружающей среды в районе расположения хранилищ РАО САЭС были рассчитаны ИПЗ в атмосферном воздухе, поверхностных водах и почве. В качестве исходных использовались данные многолетнего мониторинга в СЗЗ. Таким образом, представленные ниже значения являются консервативными, поскольку основаны на данных, связанных не только с потенциальными утечками радионуклидов из хранилищ РАО, но

и в целом с деятельностью атомной станции. Выбор такого способа оценки позволяет не допустить занижения влияния хранилищ на радиационную обстановку в районе АЭС. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ, именно такой упрощенный скрининговый анализ проводится на начальном этапе оценки радиационной безопасности мониторируемого объекта [19]. При малых уровнях риска можно вполне ограничиться данным методом, без чрезмерного усложнения оценки.

Многолетняя динамика ИПЗ атмосферного воздуха СЗЗ САЭС приведена на рис. 2. При анализе ИПЗ, исходя из наличия данных мониторинга, с 1995 по 2011 год учитывались концентрации семи техногенных радионуклидов: ⁶⁰Co, ⁵¹Cr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn, ⁹⁰Sr и ⁹⁵Zr, в период с 2012 по 2022 год — трех: ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs. Полученные значения ИПЗ за весь период 1995—2022 гг. находятся в пределах $3,4 \cdot 10^{-6}$ — $3,8 \cdot 10^{-5}$, что на пять—шесть порядков ниже экологически безопасных уровней облучения, т. е. удовлетворяют условиям обеспечения радиационной безопасности и сохранения благоприятной окружающей среды. Основной вклад в ИПЗ атмосферного воздуха СЗЗ САЭС вносят ⁶⁰Co и ¹³⁷Cs.

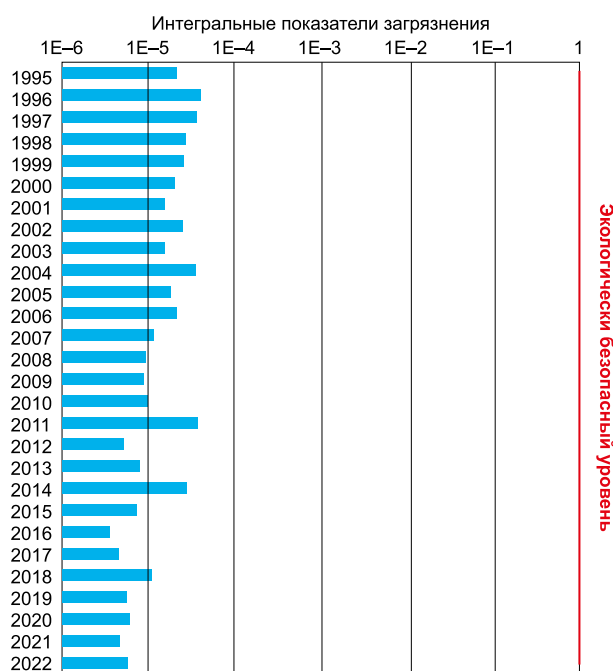


Рис. 2. Многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха техногенными радионуклидами в СЗЗ САЭС

Значения ИПЗ поверхностных вод в СЗЗ САЭС с 2004 по 2022 год колеблются в пределах $6,4 \cdot 10^{-5}$ — $3,2 \cdot 10^{-4}$, в почвенном покрове в период с 2001 по 2022 г. — $1,2 \cdot 10^{-4}$ — $2,0 \cdot 10^{-3}$, что существенно ниже экологически безопасного уровня.

Основной вклад в ИПЗ почвенного покрова и поверхностных вод в СЗЗ САЭС вносит ^{137}Cs .

Белоярская АЭС (БАЭС)

В качестве границы СЗЗ БАЭС принят периметр землеотводов под промплощадки трех ее очередей и территория Ольховской болотно-речной системы (Ольховское болото и р. Ольховка). Хранилища жидких и твердых РАО расположены на промплощадках БАЭС.

РЭБД включает результаты многолетнего радиационного мониторинга воздуха, снега, почвы, травянистой растительности, донных отложений, поверхностных и подземных вод СЗЗ и контрольных пунктов, а также среднегодовые значения МАЭД. Радионуклидный состав базы представлен в основном ^3H , ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs .

Результаты расчетов ИПЗ для поверхностных вод за период 2000–2023 гг. представлены на рис. 3. За рассматриваемый период они колеблются в пределах $5,6 \cdot 10^{-5}$ – $2,3 \cdot 10^{-3}$ для устья сбросного канала Белоярского водохранилища и $7,0 \cdot 10^{-4}$ – $1,8 \cdot 10^{-2}$ – для р. Ольховки, что на два–пять порядков ниже экологически безопасного уровня. Основной вклад в ИПЗ поверхностных вод в СЗЗ вносит ^{137}Cs .

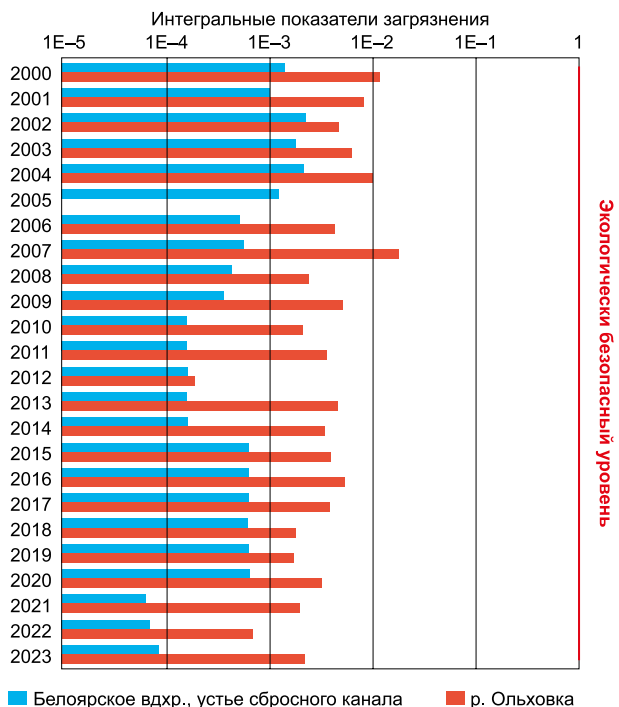


Рис. 3. Многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения поверхностных вод в СЗЗ БАЭС

Расчетные значения ИПЗ атмосферного воздуха по данным многолетнего мониторинга (2001–2023 гг.) находятся в пределах

$7,5 \cdot 10^{-7}$ – $1,3 \cdot 10^{-4}$, что на четыре–семь порядков ниже экологически безопасного уровня. Основной вклад в ИПЗ атмосферного воздуха СЗЗ БАЭС вносят ^{137}Cs и ^{90}Sr . Для других компонент окружающей среды в районе БАЭС (почва, донные отложения) они также значительно ниже экологически безопасного уровня.

Билибинская АЭС (БиАЭС)

Радиус СЗЗ вокруг БиАЭС составляет 0,5 км. Хранилища жидких и твердых РАО размещены на территории промплощадки.

РЭБД включает результаты многолетнего радиационного мониторинга воздуха, воды, почвы, снега, растительности (осоковые травы, ягель, хвоя кедрового стланика) и лесных продуктов питания (ягоды, грибы) в СЗЗ и контрольных пунктах БиАЭС, а также среднегодовые и максимальные значения МАЭД внешнего гамма-излучения.

Наиболее часто в большинстве объектов окружающей среды встречаются ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{54}Mn .

Значения ИПЗ почвенного покрова в СЗЗ БиАЭС ($3,2 \cdot 10^{-7}$ – $1,1 \cdot 10^{-2}$) в период с 1991 по 2021 г. на два–семь порядков ниже экологически безопасных уровней (рис. 4). Отчетливо проявляется тренд в снижении данных показателей со временем. Основной вклад в ИПЗ почвенного покрова СЗЗ БиАЭС вносит ^{60}Co и ^{137}Cs .

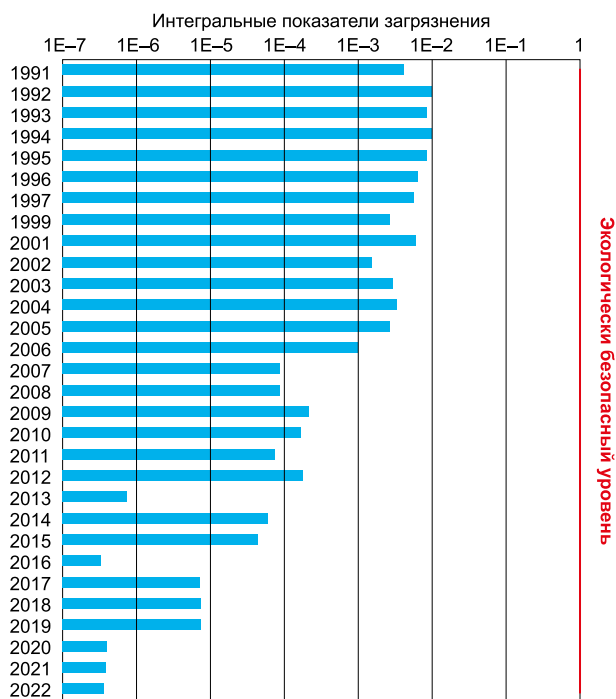


Рис. 4. Многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения почвенного покрова СЗЗ БиАЭС техногенными радионуклидами

Значения ИПЗ в атмосферном воздухе СЗЗ БиАЭС в период 1991–2022 гг. находятся в пределах $8,9 \cdot 10^{-7}$ – $9,1 \cdot 10^{-4}$, что на четыре–семь порядков ниже экологически безопасных уровней. Основной вклад вносит ^{60}Co .

Для поверхностных вод в СЗЗ БиАЭС с 1991 по 2022 год данные показатели колеблются в пределах $3,1 \cdot 10^{-5}$ – $1,0 \cdot 10^{-2}$, что значительно ниже экологически безопасного уровня.

ФГУП «ПО «Маяк»

Промышленная площадка ПО «Маяк» занимает площадь 252,4 км², внешняя граница которой совпадает с границей санитарно-защитной зоны. Высокоактивные и среднеактивные ТРО размещаются в капитальных сооружениях, а очень низкоактивные и низкоактивные ТРО – на специальном полигоне. Для хранения среднеактивных и низкоактивных ЖРО используются специальные промышленные водоемы: природные пруды В-2 (оз. Кызылташ) и В-6 (оз. Татыш), водоем В-17 (оз. Старое Болото), водоем В-9 (оз. Карачай), водоемы Теченского каскада (ТКВ): В-3, В-4, В-10, В-11.

РЭБД включает результаты многолетнего радиационного мониторинга в СЗЗ содержания техногенных радионуклидов в приземном слое атмосферы, осадках, почве, воде р. Течи и промышленных водоемах предприятия, донных отложениях, гидробионтах, растительности, местных пищевых продуктах, а также среднегодовые значения МАЭД. Наибольшее число данных содержится в категории «Вода» (3054), «Атмосферные выпадения» (1471) и «Почва» (723, включая почву пойм). Радионуклидный состав базы включает широкий перечень радиоизотопов, среди которых преобладает количество записей для ^{137}Cs (1928), ^{90}Sr (1843) и ^3H (624). Также в РЭБД представлены данные о содержании в компонентах природной среды ^{60}Co , изотопов Рц, ^{241}Am .

Расчетные значения ИПЗ атмосферного воздуха по результатам наблюдений в 2011–2023 гг. изменялись в диапазоне $1 \cdot 10^{-4}$ – $1,3 \cdot 10^{-3}$, что значительно ниже экологически безопасного уровня. Основным вклад вносили ^{90}Sr , ^{137}Cs и изотопы Рц.

За исключением непосредственно самих хранилищ ЖРО, значения ИПЗ поверхностных вод в районе расположения ФГУП «ПО «Маяк» не превышали экологически безопасного уровня (рис. 5).

Расчетные значения ИПЗ в почве по данным мониторинга за содержанием ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu в районе размещения пункта долговременного

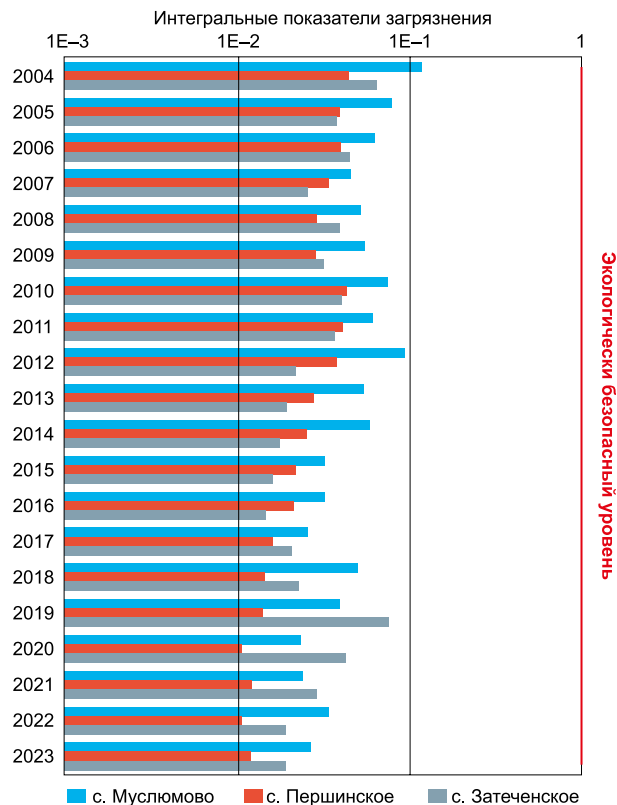


Рис. 5. Динамика интегрального показателя загрязнения техногенными радионуклидами р. Течи

хранения радиоактивных отходов «ТРО-ОНИС» также значительно ниже экологически безопасного уровня.

В целом, за исключением отдельных участков территории СЗЗ, загрязненных в результате прошлой деятельности (пойма в верховьях Течи, участки территории вблизи водоемов «Старое Болото» и «Карачай»), ИПЗ почвы в СЗЗ ПО «Маяк» не превышает экологически безопасного уровня.

Сибирский химический комбинат (СХК)

Общая площадь СЗЗ СХК составляет 112 км² с протяженностью границы по периметру 50 км. На территориях промышленных площадок и СЗЗ имеются радиационно загрязненные участки (14,6 м²), являющиеся результатом прошлой деятельности комбината. На промплощадках расположены хранилища РАО и полигон глубокого захоронения ЖРО.

РЭБД включает результаты многолетнего мониторинга в СЗЗ содержания техногенных радионуклидов в водных объектах, почве, атмосферном воздухе, биоте, а также среднегодовые и максимальные значения МАЭД. Радионуклидный состав базы включает широкий перечень радиоизотопов, среди которых более 100 раз встречаются записи для ^{239}Np , ^{24}Na , ^{76}As , ^{137}Cs , ^{99}Mo , ^{226}Ra , ^{60}Co , ^{51}Cr , ^{152}Eu .

По данным наблюдений расчетные значения ИПЗ атмосферного воздуха в СЗЗ СХК в 2015–2023 гг. изменялись в диапазоне $6,4 \cdot 10^{-7}$ – $1,3 \cdot 10^{-6}$, что значительно ниже экологически безопасного уровня, а для почвы в период с 2000 по 2022 г. – в пределах $1,6 \cdot 10^{-2}$ – $2,3 \cdot 10^{-1}$, т. е. были на один–два порядка меньше его величины.

Для поверхностных вод и донных отложений ИПЗ также были ниже экологически безопасного уровня. Относительно более высокие значения для донных отложений обусловлены накоплением в них ряда радионуклидов (рис. 6). Основной вклад в них для р. Ромашки вносили ^{241}Am и ^{226}Ra .



Рис. 6. Многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения донных отложений р. Ромашки в СЗЗ СХК

Горно-химический комбинат (ГХК)

Площадь промплощадки с СЗЗ ГХК составляет $56,19 \text{ км}^2$, на ней расположены хранилища ЖРО и ТРО. СЗЗ комбината протяженностью 17 км вытянута вдоль правого берега реки Енисей, и в ее пределах находится полигон глубинного захоронения ЖРО.

РЭБД содержит результаты многолетнего радиационного мониторинга атмосферного воздуха, снега, воды, донных отложений, почвы, биоты в СЗЗ ГХК и точках для контроля фона, а также среднегодовые и максимальные значения МАЭД, полученные в результате маршрутных обследований и работы постов автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) комбината, включая полигон «Северный».

РЭБД включает обширный перечень радиоизотопов, среди которых преобладает количество записей для ^{137}Cs – 1992, ^{90}Sr – 320, ^{60}Co – 288, $^{239,240}\text{Pu}$ – 169. Также в базе представлена информация о содержании в компонентах природной среды ^3H , ^{24}Na , ^{32}P , ^{46}Sc , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{239}Np , ^{241}Am и др.

Расчетные значения ИПЗ атмосферного воздуха в СЗЗ ГХК по результатам мониторинга в 2000–2023 гг. варьировали от $4,0 \cdot 10^{-5}$ до $5,5 \cdot 10^{-2}$, что на два–пять порядков ниже величины экологически безопасного уровня. Основной вклад в данные показатели для СЗЗ ГХК вносили изотопы плутония, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr .

ИПЗ почвы по итогам наблюдений в 2000–2023 гг. находился в пределах $2,1 \cdot 10^{-3}$ – $3,7 \cdot 10^{-3}$, на три порядка величины ниже экологически безопасного уровня. Заметных флуктуаций в многолетней динамике загрязнения почвы в СЗЗ ГХК не прослеживается. Основной вклад в ИПЗ почвы вносит ^{137}Cs .

Значения ИПЗ реки Енисей в СЗЗ ГХК изменялись в пределах от $3,4 \cdot 10^{-4}$ до $6,2 \cdot 10^{-1}$ (рис. 7). В многолетней динамике показателя наблюдается значительное снижение во времени, связанное с остановкой последнего ядерного реактора в 2010 году.

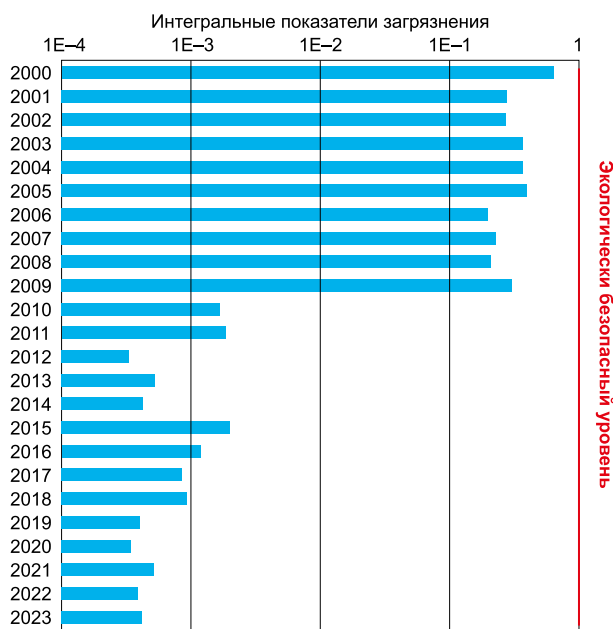


Рис. 7. Динамика интегрального показателя загрязнения р. Енисей техногенными радионуклидами в СЗЗ ГХК

Основной вклад в ИПЗ р. Енисей в период до остановки реакторов вносили короткоживущие радионуклиды ^{24}Na , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{76}As , ^{140}Ba , ^{239}Np , в период с 2012 года – ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{152}Eu , ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{137}Cs .

Современные значения ИПЗ в ручьях СЗЗ ГХК на три-четыре порядка ниже экологически безопасного уровня (рис. 8). Наиболее значимыми радионуклидами, обуславливающими их загрязнение, являются ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{90}Sr .

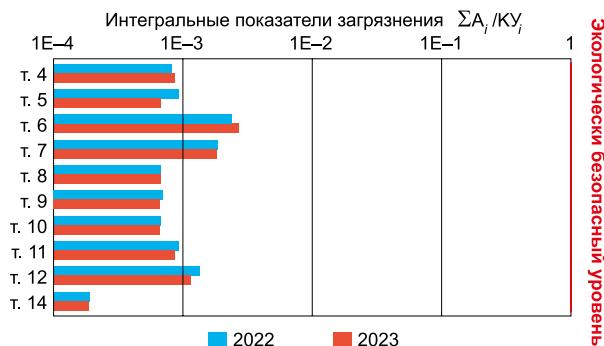


Рис. 8. Распределение интегрального показателя загрязнения ручьев в СЗЗ ГХК в 2022 и 2023 гг.

Заключение

Согласно расчетным оценкам, выполненным по результатам многолетнего мониторинга районов расположения рассмотренных объектов использования атомной энергии, значение ИПЗ значительно ниже единицы для всех компонент природной среды СЗЗ (атмосферный воздух, водные объекты, почва), что свидетельствует о непревышении экологически безопасных уровней облучения, представленных в Рекомендациях Росгидромета Минприроды России Р 52.18.820—2015 и публикациях МКРЗ.

Отметим, что представленные в настоящей работе оценки ИПЗ являются консервативными, поскольку основаны на данных, связанных не только с потенциальными утечками радионуклидов из хранилищ РАО, но и в целом с деятельностью рассматриваемых объектов. Выбор такого способа оценки позволяет не допустить занижения влияния хранилищ РАО на радиоэкологическую обстановку в районе ОИАЭ. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ при малых уровнях радиационного риска можно вполне ограничиться таким консервативным анализом, без чрезмерного усложнения оценки потенциального влияния хранилищ РАО на радиационную безопасность окружающей среды.

В целом радиационная обстановка в рассмотренных районах расположения хранилищ РАО стабильна. Значения контролируемых параметров радиационной обстановки ниже экологически безопасных уровней. С учетом потенциальной радиационной опасности хранилищ РАО рекомендуется продолжить проведение детального радиоэкологического мониторинга

в районах их расположения с использованием современных методов и средств контроля.

Данная статья подготовлена в рамках выполнения работ по договору между ИБРАЭ РАН и ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета № 1081-1/23 от 08.09.2023 «Модернизация баз данных по радиоэкологическому мониторингу в районах расположения пунктов размещения и консервации особых РАО, пунктов захоронения РАО» по ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2035 года».

Литература

1. IAEA — International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. 438 p.
2. Рекомендации Росгидромета Р 52.18.923—2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки / Крышев И. И., Павлова Н. Н., Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Косых И. В., Бурякова А. А., Газиев И. Я. — Обнинск, НПО «Тайфун», 2022. 28 с.
3. Рекомендации Росгидромета Р 52.18.820—2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015 / Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Крышев И. И., Лунёва К. В., Скакунова М. А., Санина К. Д. — Обнинск, ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 64 с.
4. ICRP — International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP 38 (4—6), 2008. 251 p.
5. Крышев И. И., Павлова Н. Н., Косых И. В., Бурякова А. А., Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Каткова М. Н. Оценка радиационной безопасности окружающей среды в зоне влияния ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3. С. 40—50.
6. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Косых И. В., Павлова Н. Н., Бурякова А. А. Принципы и критерии экологического нормирования качества окружающей среды по уровням радиоактивности // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 31—37. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-31-37.
7. Крышев И. И., Павлова Н. Н., Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Косых И. В., Бурякова А. А., Газиев И. Я. Оценка радиационной безопасности окружающей среды в зоне наблюдения объектов использования атомной энергии // Атомная энергия. 2021. Т. 130. № 2. С. 111—116.

8. Крышев И. И., Бурякова А. А., Сазыкина Т. Г. Оценка радиоэкологической обстановки на территориях аварийного чернобыльского следа в России (1986—2020) // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2021. Т. 30. № 2. С. 25—37. DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-25-37.
9. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г., Аракелян А. А., Ведерникова М. В., Панченко С. В. Вопросы установления нормативов радиационной безопасности объектов живой природы, в том числе при обращении с радиоактивными отходами // Радиоактивные отходы. 2021. № 2 (15). С. 99—105.
10. Крышев А. И., Косых И. В., Крышев И. И. Анализ экологического риска радиоактивного загрязнения Ольховского болота // Атомная энергия. 2022. Т. 132. № 1. С. 43—36.
11. Павлова Н. Н., Крышев И. И., Крышев А. И. Динамика радиоэкологической обстановки в зоне наблюдений ФГУП «ПО «Маяк» // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 650—659. DOI: 10.31857/S0869803122060091.
12. Крышев И. И., Павлова Н. Н., Сазыкина Т. Г., Крышев А. И., Косых И. В., Бурякова А. А., Росновская Н. А. Оценка экологического риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды // Проблемы анализа риска. 2023. Т. 20. № 3. С. 10—26. DOI: 10.32686/1812-5220-2023-20-3-10-26.
13. Павлова Н. Н., Крышев И. И., Сазыкина Т. Г., Каткова М. Н., Крышев А. И., Косых И. В. Оценка экологического риска и интегрального показателя загрязнения приземного слоя атмосферы в зоне наблюдения ФГУП «ПО «Маяк» // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2024. Т. 33. № 2. С. 79—89. DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-2-79-89.
14. Развитие системы мониторинга радиационной обстановки на территории России / Под ред. д. т. н. В. М. Шершакова. — М. : ООО «Маска», 2020. 280 с.
15. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / Под общ. ред. И. И. Линге и И. И. Крышева. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М. : ИБРАЭ РАН, 2021. 555 с.
16. Рекомендации Росгидромета Р 52.18.853—2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 / Крышев А. И., Сазыкина Т. Г., Крышев И. И., Лунёва К. В., Санина К. Д., Косых И. В., Скакунова М. А., Дайнеко Е. И. // В сборнике: Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды. — Обнинск, 2016. С. 29—55.
17. Рекомендации Росгидромета Р 52.18.913—2021. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в атмосферном воздухе. Утверждены приказом Росгидромета от 23.08.2021 № 273 / Сазыкина Т. Г., Крышев И. И., Крышев А. И., Косых И. В., Газиев И. Я., Бурякова А. А. — Обнинск, 2021. 50 с.
18. Линге И. И. О рационализации систем обращения с РАО и обеспечения радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2023. № 2 (23). С. 21—34.
19. IAEA — International Atomic Energy Agency. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Safety Guide No. RS-G-1.8. Vienna, IAEA, 2005. 136 p.

Информация об авторах

Крышев Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАЕН, главный научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

Павлова Надежда Николаевна, кандидат биологических наук, научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: nadpavl@yandex.ru.

Косых Ирина Владимировна, научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: ivkosyh@gmail.com.

Бурякова Анна Александровна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: buryakova@rpatyphoon.ru.

Аникина Нелли Александровна, младший научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: rosnovskaya@rpatyphoon.ru.

Газиев Ильдар Яктельевич, младший научный сотрудник, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун» (249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4), e-mail: gaziev@rpatyphoon.ru.

Панченко Сергей Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории радиоэкологии, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: panch@ibrae.ac.ru.

Ведерникова Марина Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Крышев И. И., Павлова Н. Н., Косых И. В., Бурякова А. А., Аникина Н. А., Газиев И. Я., Панченко С. В., Ведерникова М. В. Многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения техногенными радионуклидами окружающей среды в районах расположения пунктов хранения РАО // Радиоактивные отходы. 2025. № 4 (33). С. 75–85. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-4-75-85.

INTEGRAL CONTAMINATION INDICATOR AND ITS LONG-TERM DYNAMICS AS APPLIED TO THE ENVIRONMENTAL CONTAMINATION BY TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THE AREAS OF RADIOACTIVE WASTE STORAGE FACILITIES

Kryshch I. I.¹, Pavlova N. N.¹, Kosykh I. V.¹, Buryakova A. A.¹, Anikina N. A.¹,
Gaziev I. Ya.¹, Panchenko S. V.², Vedernikova M. V.²

¹ Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Kaluga region, Russia

² Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on September 17, 2025

The article evaluates the radioecological situation based on the long-term monitoring data available on the areas of radioactive waste storage facilities (Smolensk NPP, Bilibino NPP, Beloyarsk NPP) and radiochemical plants (Mining and Chemical Combine (MCC), Mayak Production Association and Siberian Chemical Combine (SCC)). Monitoring data presented in the Yearbook: The Radiation Situation in Russia and its Neighboring Countries, environmental reports of the enterprises, as well as open scientific press provided input information for this research. To assess the radiation safety of the environment in the areas of radioactive waste storage facilities, integral contamination indicators (ICI) were calculated as the sums of ratios for radionuclide concentrations observed in an environmental component to the corresponding reference levels. To provide favorable environment and the environmental safety, the minimum value calculated according to radiation (in accordance with the Standards of Radiation Safety (NRB-99/2009), the Basic Sanitary Rules (OSPORB-99/2010), the Decision of the Government of the Russian Federation No. 1069 of October 19, 2012) and environmental (R 52.18.853–2016, R 52.18.913-2021) criteria is selected as the reference radionuclide level for an environmental component. The radiation safety of the environment is provided at ICI of less than 1. Long-term monitoring data show that in the considered areas of radioactive waste storage facilities, the ICI were much lower than 1 for all environmental components found within their sanitary protection zones (atmospheric air, water bodies, soil). This indicates that environmentally sound levels of impact on wildlife are not exceeded.

Keywords: integral contamination indicator, radionuclides, radioactive waste, environment, radiation situation, radioecological monitoring, wildlife objects.

References

1. IAEA — International Atomic Energy Agency. International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. 438 p.
2. Recommendations of Roshydromet R 52.18.923-2022. *Poryadok otsenki riska ot radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy po dannym monitoringa radiatsionnoy obstanovki* [The procedure followed to assess the radioactive contamination risks for the environment according to the monitoring data on the radiation situation]. Kryshev I. I., Pavlova N. N., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kosykh I. V., Buryakova A. A., Gaziev I. Ya. Obninsk, RPA Typhoon Publ., 2022. 28 p.
3. Recommendations of Roshydromet R 52.18.820-2015. *Otsenka radiatsionno-ekologicheskogo vozdeystviya na ob"yekty prirodnoy sredy po dannym monitoringa radiatsionnoy obstanovki* [Assessment of the radiation and environmental impact on the objects of the natural environment according to the monitoring data on the radiation situation]. Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kryshev I. I., Luneva K. V., Skakunova M. A., Sanina K. D. Obninsk, RPA Typhoon Publ., 2015. 64 p.
4. ICRP — International Commission on Radiological Protection. Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. Ann. ICRP 38 (4–6), 2008. 251 p.
5. Kryshev I. I., Pavlova N. N., Kosykh I. V., Buryakova A. A., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Katkova M. N. Otsenka radiatsionnoy bezopasnosti okruzhayushchey sredy v zone vliyaniya PO “Mayak” [Assessment of Radiation Safety of the Environment in the Mayak PA Impact Area]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation Safety Issues*, 2019, no. 3, pp. 40–50.
6. Kryshev I. I., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kosykh I. V., Pavlova N. N., Buryakova A. A. Printsipy i kriterii ekologicheskogo normirovaniya kachestva okruzhayushchey sredy po urovnyam radioaktivnosti [Approaches and Criteria for Ecological Regulation of Environmental Quality by Radioactivity Levels]. *Meteorologiya i gidrologiya — Russian Meteorology and Hydrology*, 2021, vol. 46, no. 5, pp. 307–311. DOI: 10.3103/S1068373921050046.
7. Kryshev I. I., Pavlova N. N., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kosykh I. V., Buryakova A. A., Gaziev I. Ya. Otsenka radiatsionnoy bezopasnosti okruzhayushchey sredy v zone nablyudeniya ob"yektov ispol'zovaniya atomnoy energii [Environmental Radiation Safety Assessment in the Control Area at Nuclear Facilities]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2021, vol. 130, no. 2, pp. 119–125. DOI: 10.1007/s10512-021-00782-z.
8. Kryshev I. I., Buryakova A. A., Sazykina T. G. Otsenka radioekologicheskoy obstanovki na territoriyakh avariynogo chernobyl'skogo sleda v Rossii (1986–2020) [Assessment of Radioecological Situation in the Areas of the “Chernobyl Footprint” in Russia (1986–2020)]. *Radiatsiya i risk — Radiation and risk*, 2021, vol. 30, no. 2, pp. 25–37. DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-25-37.
9. Kryshev I. I., Sazykina T. G., Arakelyan A. A., Vedernikova M. V., Panchenko S. V. Voprosy ustanovleniya normativov radiatsionnoy bezopasnosti ob"yektov zhivoy prirody, v to chisle pri obrashchenii s radioaktivnymi otkhodami [Issues of Establishing Standards for Radiation Safety of Wildlife Including the Radioactive Waste Management]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2021, no. 2 (15), pp. 99–105. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-99-105.
10. Kryshev A. I., Kosykh I. V., Kryshev I. I. Analiz ekologicheskogo riska radioaktivnogo zagryazneniya Ol'khovskogo bolota [Environmental Risk Analysis of Radioactive Contamination of the Ol'khovskoe Marsh]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2022, vol. 132, no. 1, pp. 45–49. DOI: 10.1007/s10512-022-00902-3.
11. Pavlova N. N., Kryshev I. I., Kryshev A. I. Dinamika radioekologicheskoy obstanovki v zone nablyudeniya FGUP “PO “Mayak” [Dynamics of the Radioecological Situation in the Observation Area of FSUE “Mayak Production Association”]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya — Radiation biology. Radioecology*, 2022, vol. 62, no. 6, pp. 650–659. DOI: 10.31857/S0869803122060091.
12. Kryshev I. I., Pavlova N. N., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Kosykh I. V., Buryakova A. A., Rosnovskaya N. A. Otsenka ekologicheskogo riska ot radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Assessment of environmental risk from the radioactive contamination of the environment]. *Problemy analiza riska — Issues of Risk Analysis*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 10–26.
13. Pavlova N. N., Kryshev I. I., Sazykina T. G., Katkova M. N., Kryshev A. I., Kosykh I. V. Otsenka ekologicheskogo riska i integral'nogo pokazatelya zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery v zone nablyudeniya FGUP “PO “Mayak” [Assessment of Environmental Risk and Integrated Index of the Atmospheric Surface Layer Pollution in the Monitoring Area of the Mayak Production Association]. *Radiatsiya i risk — Radiation and risk*, 2024, vol. 33, no. 2, pp. 79–89. DOI: 10.21870/0131-3878-2024-33-2-79-89.
14. *Razvitiye sistemy monitoringa radiatsionnoy obstanovki na territorii Rossii* [Development of the radiation monitoring system in Russia]. Edited by Doctor of Technical Sciences V. M. Shershakov. Moscow, Maska Publ., 2020. 280 p.

15. *Radioekologicheskaya obstanovka v regionah raspolozheniya predpriyatij Gosudarstvennoj korporacii po atomnoj energii "Rosatom"* [Radioecological situation in the regions with enterprises of the State Atomic Energy Corporation Rosatom]. Under the general ed. of I. I. Linge and I. I. Krysheva. Moscow, 2021. 555 p.
16. Recommendations of Roshydromet R 52.18.853-2016. *Poryadok rascheta kontrol'nykh urovney sodержaniya radionuklidov v presnoy vode i pochve* [The procedure for calculating the reference radionuclide levels in fresh water and soil]. Kryshev A. I., Sazykina T. G., Kryshev I. I., Luneva K. V., Sanina K. D., Kosykh I. V., Skakunova M. A., Daineko E. I. In the collection: *Poryadok rascheta kontrol'nykh urovney sodержaniya radionuklidov v ob'yektakh prirodnoy sredy* [The procedure for calculating the reference radionuclide levels in the objects of the natural environment]. Obninsk. 2016.
17. Recommendations of Roshydromet R 52.18.913-2021. *Poryadok rascheta kontrol'nykh urovney sodержaniya radionuklidov v atmosfernom vozdukh*e [The procedure followed to calculate the reference radionuclide levels in the atmospheric air]. Sazykina T. G., Kryshev I. I., Kryshev A. I., Kosykh I. V., Gaziev I. Ya., Buryakova A. A. Obninsk, 2021. 50 p.
18. Linge I. I. O ratsionalizatsii sistem obrashcheniya s RAO i obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti [Streamlining RW management and radiation safety systems]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 2 (23), pp. 21–34. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-2-21-34.
19. IAEA — International Atomic Energy Agency. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Safety Guide No. RS-G-1.8. Vienna, IAEA, 2005. 136 p.

Information about the authors

Kryshev Ivan Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Chief Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: ecomod@obninsk.com.

Pavlova Nadezhda Nikolaevna, Ph.D. in Biological Sciences, Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: nadpavl@yandex.ru.

Kosykh Irina Vladimirovna, Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: ivkosyh@gmail.com.

Buryakova Anna Aleksandrovna, Junior Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: buryakova@rpatyphoon.ru.

Anikina Nelly Alexandrovna, Junior Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: rosnovskaya@rpatyphoon.ru.

Gaziev Ildar Yakovlevich, Junior Researcher, Research and Production Association "Typhoon" (4, Pobeda st., Obninsk, Kaluga region, 249038, Russia), e-mail: gaziev@rpatyphoon.ru.

Panchenko Sergej Vladimirovich, Senior Researcher at the Laboratory of Radioecology, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: panch@ibrae.ac.ru.

Vedernikova Marina Vladimirovna, Ph.D. in Technical Sciences, Senior Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulsкая st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: vmv@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Kryshev I. I., Pavlova N. N., Kosykh I. V., Buryakova A. A., Anikina N. A., Gaziev I. Ya., Panchenko S. V., Vedernikova M. V. Integral contamination indicator and its long-term dynamics as applied to the environmental contamination by technogenic radionuclides in the areas of radioactive waste storage facilities. *Radioactive Waste*, 2025, no. 4 (33), pp. 75–85. DOI: 10.25283/2587-9707-2025-4-75-85. (In Russian).