

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВР-ц НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Фомичев В.В., Кочнов О.Ю., Пахолик Д.А., Кузнецов Н.В.

*АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова»,
249035, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 6*



Вопрос влияния ядерных установок (реакторов) на окружающую среду широко рассматривается для АЭС, но для маломощных исследовательских ядерных установок (ИЯУ) такой информации практически нет. В работе изучается влияние ИЯУ малой мощности на примере АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Для выполнения целей и задач национального проекта «Здравоохранение» и реализации региональных программ по борьбе с онкологическими заболеваниями увеличивается потребность в производстве радиофармпрепаратов. Это требует от организаций, выполняющих данную задачу, не только развивать технологии производства, но и особое внимание уделять системам по контролю радиационной обстановки окружающей среды. Исследование в статье было проведено по результатам мониторинга радиационных параметров с 2011 по 2022 гг. и выполнена корреляция данных параметров как с объемом производства, так и между собой. Результаты позволили выявить наиболее эффективные мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду. Дан прогноз по дальнейшей динамике выбросов и предложены новые мероприятия.

Ключевые слова: исследовательские ядерные установки, негативное воздействие, окружающая среда, выбросы радионуклидов.

Для цитирования: *Фомичев В.В., Кочнов О.Ю., Пахолик Д.А., Кузнецов Н.В.* Воздействие исследовательского ядерного реактора ВВР-ц на окружающую среду. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.10>

ВВЕДЕНИЕ

На исследовательских установках научных институтов нарабатываются уникальные изотопы, которые применяются во многих областях – от фундаментальной науки до промышленности. На их основе изготавливают радиофармпрепараты (РФП), которые эффективно лечат различные формы рака [1].

АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» (далее – институт, НИФХИ) производит как радионуклиды медицинского назначения, так и готовые радиофармпрепараты [2]. На основе ^{131}I делают радиофармпрепараты для обнаружения и лечения заболеваний щитовидной железы, почек и печени. На основе ^{99}Mo организовано производство генераторов технеция-99m, который является самым эффективным в функциональной диагностике практически всех органов человека и обнаружении на самых ранних стадиях онкологических заболеваний. На предприятии производится более 90% генераторов технеция, используемых в стране, и около 80% препаратов йода-131 [1, 3, 4].

Институт – единственный в России производитель препарата «Самарий, ^{153}Sm оксабифор». Он обладает способностью избирательно накапливаться в метастатических очагах в костной ткани и воздействовать на клетки очага и окружающие его нервные окончания. При этом наблюдается обезболивающий и антипролиферативный эффект. Также предприятие является единственным в стране производителем препарата «Уреакапс», который используется для диагностики заболеваний желудочно-кишечного тракта [2].

Для наработки изотопов в АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» используется комплекс с исследовательским ядерным реактором ВВР-ц (водо-водяной реактор – целевой). Максимальная проектная тепловая мощность реактора ВВР-ц составляет 15 МВт. Уникальность этой ядерной установки состоит в наличии широкого энергетического спектра нейтронов с высокой плотностью потока, большого количества технологических каналов, современных прецизионных измерительных установок.

На площадке НИФХИ идет строительство крупнейшего в Европе завода радиофармацевтических препаратов, где будут выпускаться продукты на основе йода-131, самария-153, молибдена-99, лютеция-177, актиния-225, радия-223 и др. Широкая линейка РФП позволит лечить широкий спектр заболеваний.

Краеугольным камнем производства РФП является обеспечение радиационной безопасности персонала, окружающей среды и населения. Здесь важно соблюдение основных принципов радиационной безопасности (обоснование, оптимизация, нормирование) и требований радиационной защиты, установленных Федеральными законами РФ, действующими нормами радиационной безопасности и санитарными правилами [5, 6].

За период эксплуатации реактора ВВР-ц накоплен большой массив данных по контролируемым радиационным параметрам, которые используются для оценки воздействия на окружающую среду. Для проведения такой оценки были использованы метод статистического анализа, в частности, статистическое наблюдение и корреляционный анализ [7, 8].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы – проанализировать влияние маломощных ИЯУ на окружающую среду на примере реактора ВВР-ц АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». В работе оценена динамика радиационных параметров и их корреляция с объемом производства радиофармпрепаратов на предприятии. Объемы производства РФП по годам показаны в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, значительный рост производства РФП начался в 2015 г. Снижение производства в 2020 г. и 2022 г. вызвано ограничениями на поставки РФП и изотопов медицинского назначения в мире.

По результатам работы разработан «План мероприятий», направленный на снижение негативного воздействия на окружающую среду. Он использован в АО «НИФХИ

Таблица 1

Объем производства РФП за год

Год	Объем производства, Ки
2011	около 3600
2012	около 6000
2013	около 2400
2014	около 2100
2015	около 8500
2016	около 8900
2017	около 9700
2018	около 10900
2019	около 17900
2020	около 15300
2021	около 18800
2022	около 14000
2023	около 16500

им. Л.Я. Карпова» и может быть рекомендован для маломощных ИЯУ с аналогичными производственными характеристиками. Дан прогноз по динамике активности выбросов в атмосферу на основании проведенных в 2022 г. мероприятий.

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для оценки воздействия АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» на окружающую среду были выбраны следующие контролируемые радиационные параметры:

- активность выбросов ^{131}I в атмосферу;
- суммарная бета-активность в поверхностном слое почвы;
- плотность загрязнения снега радионуклидами;
- суммарная бета-активность растительности;
- мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) фотонного (гамма) излучения;
- объемная активность ^{131}I в приземном слое атмосферы.

Значения радиационных параметров за рассматриваемый период взяты из «Отчетов об экологической безопасности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» [9].

Основное негативное воздействие АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» на окружающую среду связано с выбросами в атмосферу радионуклидов, в частности, изотопа йода – ^{131}I . Данные о выбросах ^{131}I в год приведены на рис. 1.

Анализ динамики активности выбросов ^{131}I в атмосферу показал, что рост значений наблюдается с 2014 г. и достигает своего пика в 2018 г. В период с 2015 по 2018 г. значение активности выбросов превышает допустимый выброс (ДВ), что связано с активным ростом объемов производства, начавшимся в 2015 г. (табл. 1). Следует отметить, что, начиная с 2019 г., фиксируется устойчивое снижение величины активности выбросов ^{131}I в атмосферу при увеличении объема выпускаемой продукции и в дальнейшем превышения ДВ не наблюдается. За весь рассматриваемый период активность выбросов ^{131}I в атмосферу не превышала предельно допустимых выбросов (ПДВ). Допустимые и предельно допустимые выбросы разрабатываются предприятием и утверждаются контролирующими органами.

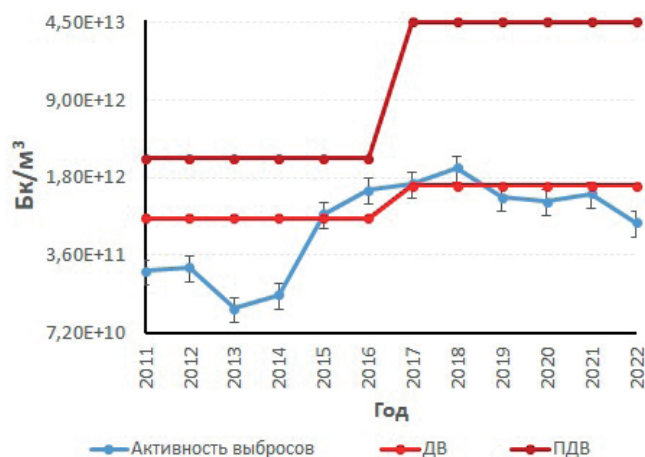


Рис. 1. Динамика выбросов ^{131}I

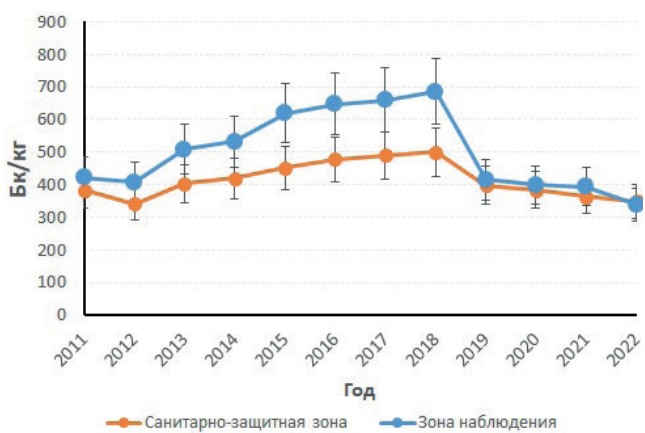


Рис. 2. Динамика суммарной бета-активности в поверхностном слое почвы



Рис. 3. Динамика суммарной бета-активности растительности

ми [10]. Увеличение значений ДВ и ПВД с 2016 г. связано с пересмотром этих нормативов на предприятии с последующим их утверждением контролирующими органами.

Анализ динамики суммарной бета-активности в поверхностном слое почвы (рис. 2) показал спад значений.

Иная картина наблюдается для общей бета-активности растительности (рис. 3). С 2018 по 2021 гг. значения снижаются с дальнейшим ростом в 2022 г.

Такое различие можно объяснить разной степенью накопления радиоизотопов в почвенно-растительном покрове на данной территории [11].

Похожие тенденции наблюдаются для плотности загрязнения снега радионуклидами (рис. 4а) и МАЭД фотонного (гамма) излучения (рис. 4б).

Отсутствие значений за 2019 и 2020 гг. на рис. 4а объясняется невозможностью отбора проб для анализа в соответствии с методическими рекомендациями ввиду малого количества снега. Снижение значений МАЭД с 2018 г. связано с уменьшением активности выбросов ^{131}I , которые раньше приводили к кратковременному росту МАЭД в санитарно-защитной зоне (СЗЗ) и зоне наблюдения (ЗН).

Анализ динамики данных объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы

(рис. 5) показывает рост значений объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы с 2015 по 2018 гг. Пиковые значения для СЗЗ и ЗН составили 0,49 и 0,31 Бк/м³ соответственно, что примерно в 15 раз ниже допустимой объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы для населения – 7,3 Бк/м³.

Такая зависимость хорошо коррелирует с объемом производства в эти годы (см. табл. 1) и с выбросами ^{131}I в атмосферу (см. рис. 1). Начиная с 2019 г. активность выбросов ^{131}I и объемная активность ^{131}I в приземном слое атмосферы падают с учетом дальнейшего роста объемов производства, следовательно, меры, принятые для стабильного снижения значений, оказались эффективными и будут рассмотрены ниже.

МЕРЫ ПО СНИЖЕНИЮ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Ежегодно АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова» разрабатывает и реализует широкий комплекс мероприятий, направленных на модернизацию производства и снижение негативного воздействия на окружающую среду. В таблице 2 приведены наиболее значимые мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду и годы их реализации.

После 2018 г. произошло значительное снижение значений этих радиационных параметров (активности выбросов радионуклидов в атмосферу и объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы), что свидетельствует об эффективности предпринятых мер в этом и последующих годах. Из таблицы 2 можно выделить мероприятия № 6 и № 7,

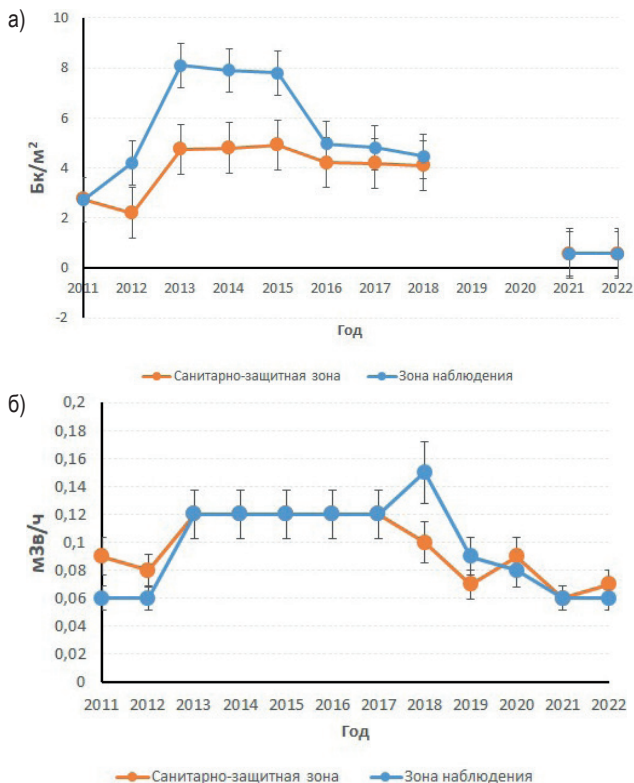


Рис. 4. Динамика плотности загрязнения снега радионуклидами (а); МАЭД фотонного (гамма) излучения (б)

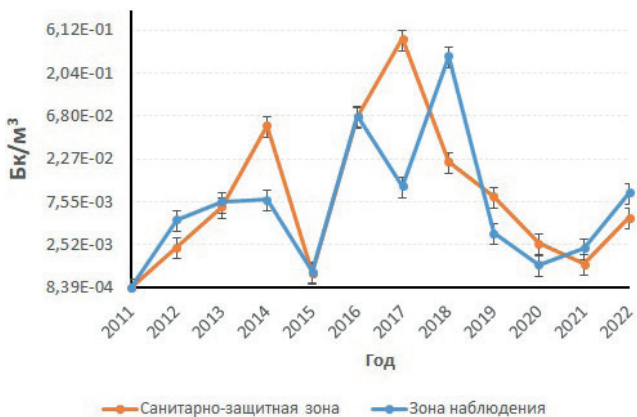


Рис. 5. Динамика объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы

Мероприятия по снижению негативного воздействия на окружающую среду

№	Наименование	Год реализации
1	Модернизация системы очистки выбросов из горячей камеры 9 и химических боксов с использованием фильтров насыпного типа с гранулированным сорбентом	Начало 2014
2	Использование герметичных контейнеров в процессе выгрузки высокоактивных отходов при производстве Mo-99	Начало 2015
3	Модернизация подкамерного пространства «горячих» камер с целью исключения перетоков воздуха	2016
4	Установка вентиляторов В-III большей производительности для поддержания стабильного разрежения в «горячих» камерах	Конец 2016
5	Организация постоянного контроля эффективности щелевых фильтров в «горячих» камерах	2017
6	Внедрение модернизированной технологии переработки облученных мишеней для эффективного улавливания радиойода и благородных радиоактивных газов (РБГ)	2018
7	Модернизация системы спецвентиляции В-III с аэрозольными и противойодными фильтрами	2018
8	Герметизация лампового пространства «горячих» камер, установка модернизированных светильников, не требующих принудительного охлаждения.	2018
9	Модернизация основной линии системы спецвентиляции В-II с аэрозольными и противойодными фильтрами	2022

реализованные за год до снижения значений. Также стоит отметить мероприятие № 9, реализованное в августе 2022 г.

Как уже было показано на рис. 1, в 2019 г. было достигнуто значительное снижение выбросов ¹³¹I в атмосферу. Более явно данный эффект заметен на рис. 6. Снижение удельных показателей активности выбросов в расчете на единицу произведенной продукции начиная с 2019 года, наглядно свидетельствует об эффективности принимаемых мер.



Рис. 6. Соотношение объемов производства (Ки) и удельных выбросов на ед. Ки

Снижение удельного выброса за 2019 г. относительно 2018 г. составило 66%. Для сопоставимости показателей на рис. 6 размерность выбросов уменьшена в 10^4 раз.

С целью дальнейшего снижения выбросов в окружающую среду в июне 2022 г. была проведена модернизация системы спецвентиляции – мероприятие №9. Для определения фактической эффективности был проведен сравнительный анализ суммарной объемной активности (ОА) ^{131}I как в общем выбросе, так и отдельно для линии системы спецвентиляции В-II. Для этого был проанализирован период работы спецвентиляции за полгода до и после проведенной модернизации. Сравнительный анализ ОА ^{131}I для спецвентиляции В-II до и после модернизации представлен на рис. 7.



Рис. 7. Изменение объемной активности ^{131}I для спецвентиляции В-II до и после модернизации

Как видно из рис. 7, после проведенной модернизации спецвентиляции В-II (вторая половина июля 2022 г.) значения ОА ^{131}I резко снизились, что хорошо коррелирует как с содержанием ^{131}I в общем выбросе из трубы, так и с динамикой удельных выбросов, которые также существенно снизились. До запуска модернизированной системы суммарная ОА ^{131}I за рассматриваемый период составляла $19,4 \times 10^9$ Бк/м³, после запуска – $5,9 \times 10^9$ Бк/м³. Это свидетельствует о снижении содержания ^{131}I в общем выбросе примерно в 3,2 раза.

ПРОГНОЗ АКТИВНОСТИ ВЫБРОСОВ РАДИОНУКЛИДОВ В АТМОСФЕРУ НА 2023 Г.

С целью обоснования необходимости и эффективности модернизации была дана прогнозная оценка эффекта от проведенного мероприятия №9, которая оценивалась в 15% от значений до модернизации спецвентиляции В-II – $1,05 \times 10^{11}$ Бк.

По итогам 2023 г. фактически зафиксированная активность выброса ^{131}I составила $2,9 \times 10^{11}$ Бк. На рисунке 8 представлен сравнительный график значений фактического и оценочного выбросов, который рассчитывался из предположения, что мероприятия № 6, № 7 и № 9 не проводились.

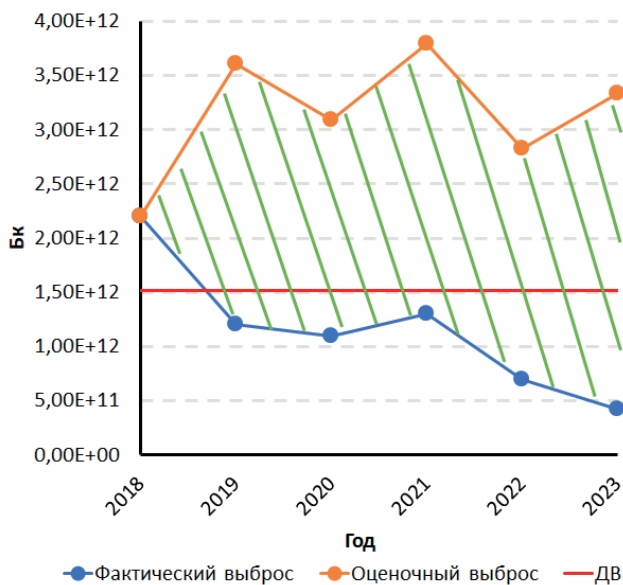


Рис. 8. Сравнительный график значений фактического и оценочного выбросов

Как видно из рис. 8, по итогам 2023 г. кумулятивный эффект снижения выбросов от проведенных мероприятий составил примерно 10 раз, что является однозначным подтверждением эффективности выбранного вектора модернизации.

ВЫВОДЫ

Радиационные параметры: суммарная бета-активность в поверхностном слое почвы, плотность загрязнения снега радионуклидами, суммарная бета-активность растительности и мощность амбиентного эквивалента дозы фотонного (гамма) излучения

находятся в пределах фоновых значений для региона, в котором находится АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова».

Активность выбросов радионуклидов в атмосферу превышала допустимые выбросы, установленные для предприятия с 2015 по 2018 гг., что было связано с увеличением производства на предприятии, в то же время была ниже установленного норматива – предельного допустимого выброса.

Максимальные значения объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы также были достигнуты с 2015 по 2018 гг., и эти пиковые значения для санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения составили 0,49 и 0,31 Бк/м³, что примерно в 15 раз ниже допустимой объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы для населения – 7,3 Бк/м³.

После 2018 г. произошло значительное снижение значений активности выбросов радионуклидов в атмосферу и объемной активности ^{131}I в приземном слое атмосферы в результате реализованных мероприятий. Из реализованных мероприятий в табл. 2 стоит выделить мероприятия №6, №7 и №9, которые привели к стабильному снижению значений радиационных параметров по активности выбросов радионуклидов в атмосферу и объемной активности ^{131}I в приземном слое, несмотря на дальнейший рост объема производства радионуклидов. Данные мероприятия можно рекомендовать для предприятий с аналогичной производственной спецификой.

При планировании увеличения объемов производства необходимо учитывать технические возможности существующего производственного комплекса. В рассматриваемом случае «слабым местом» является спецвентиляция, которая на момент начала роста производства (2015 г.) не обеспечивала достаточной эффективности очистки выбросов от радиоiodа, что приводило к превышению допустимых выбросов до 2018 г.

Благодаря уже использованным возможностям дальнейшей модернизации систем спецвентиляции в целях дальнейшего снижения значений радиационных параметров необходимо акцентировать внимание на совершенствовании технологий производства РФП.

Мероприятия, которые можно рекомендовать к реализации:

- модернизации резервной линии спецвентиляции В-II;
- совершенствование технологии производства ^{131}I ; переход на новую установку сублимации ^{131}I ;
- совершенствование технологии производства ^{131}I ; переход на кварцевые изделия.

Стоит отметить, что представленные выше мероприятия не гарантируют на 100% эффективность для других организаций с аналогичной спецификой производства, так как не существует полностью идентичной технологии производства и всегда есть хотя бы незначительные отличия, которые могут привести к снижению эффективности рекомендуемых мер.

Литература

1. Бажукова И.Н., Бажуков С.И., Баранова А.А. Технологии ядерной медицины. – Екатеринбург, Уральский федеральный университет, 2022. – 105 с.
2. Каталог РФП АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», Обнинск. Электронный ресурс <https://karpoviprc.ru/index.php/katalogifr> (дата доступа 07.03.2023).
3. The Supply of Medical Radioisotopes «Medical Isotope Supply in the Future: Production Capacity and Demand Forecast for the $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ Market, 2015-2020». Nuclear Energy Agency, OECD, 2015. Электронный ресурс: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_36035/the-supply-of-medical-radioisotopes-2015-medical-isotope-supply-review-99mo/99mtc-market-demand-and-production-capacity-projection-2015-2020 (дата доступа 05.03.2023).
4. Кодина Г.Е., Красикова Р.Н. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины. – М.: МЭИ, 2014. – 281 с.
5. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ–99/2009). Введены в действие приказом Главного государственного санитарного врача РФ от 07.07.2009 №47. Электронный ресурс https://www.np-ciz.ru/userfiles/2_6_1_2523-09.pdf (дата доступа 07.03.2023).
6. СП 2.6.1.2612–10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ–99/2010). Введены в действие приказом Главного государственного санитарного врача РФ от 26.04.2010 №40. Электронный ресурс: https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf (дата доступа 07.03.2023).
7. Соболева И.А., Беляева Е.Н. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды. – М., 2002. – 432 с.
8. Махонько К.П. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 350 с.
9. Отчет по экологической безопасности АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова». Обнинск. Электронный ресурс: <http://www.karpoviprc.ru/index.php/ekologiya> (дата доступа 07.03.2023).
10. Постановление Правительства Российской Федерации №731 от 26.06.2018 «О нормативах допустимых выбросов радиоактивных веществ и нормативах допустимых сбросов радиоактивных веществ, а также о выдаче разрешений на выбросы радиоактивных веществ, разрешений на сбросы радиоактивных веществ». Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/550507640> (дата доступа 07.03.2023).
11. Махонько К.П., Авраменко А.С. Поверхностная бета-активность почвенно-растительного покрова, обусловленная продуктами ядерных взрывов, и ее зависимость от вертикальной миграции изотопов. // Атомная энергия. – 1977. – Т. 42. – Вып. 7. – С. 413–414. Электронный ресурс https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t42-5_1977/p413/ (дата доступа 07.03.2023).

Поступила в редакцию 12.02.2024

Авторы

Фомичев Владимир Владимирович, начальник участка ДРиГИ,

E-mail: Vovik19931993@mail.ru

Пахолик Денис Анатольевич, ведущий инженер-физик

E-mail: pakholikda@mail.ru

Кочнов Олег Юрьевич, главный инженер, д.т.н., профессор,

E-mail: kochnov@karpovipc.ru

Кузнецов Никита Васильевич, начальник участка ДиРК,

E-mail: kuznetsov@karpovipc.ru

UDC 504.054

Impact of the VVR-ts Nuclear Research Reactor on the Environment

Fomichev V.V., Pakholik D.A., Kochnov O.Yu., Kuznetsov N.V.

*Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry, JSC,
6 Kievskoe Sh., 249035 Obninsk, Kaluga reg., Russia*

Abstract

Nuclear power is hazardous not only in terms of accidents and disasters. Regular operations of nuclear reactors also lead to the release of radioactive isotopes into the environment. The effects from nuclear facilities (reactors) have been discussed extensively as applicable to nuclear power plants but there is no practically such data for low-power nuclear research facilities (NRF).

This paper considers the effect of low-power nuclear facilities based on the example of the Karpov Research and Development Institute for Physical Chemistry, JSC. To achieve the goals and objectives under the Public Health National Project, and to implement regional cancer control programs, there is a growing demand for radiopharmaceutical production. The organizations engaged in this production need not only to develop manufacturing technologies but also pay careful attention to the system for monitoring the radiation situation in the environment.

The analysis was undertaken based on the results of monitoring radiation parameters from the period of 2011 to 2022, and the monitored parameters were correlated both with the production output and among each other.

The results of the study were used to identify the most effective measures for reducing the negative environmental impact. Also, based on the latest measures taken in 2022, a forecast was provided for the further dynamics of emissions. These activities can be recommended for enterprises with a similar nature of production.

It is worth noting that the measures presented above are not sure to be 100% efficient for other organizations with a similar nature of production, since there is no fully identical production technology, and there are always at least minor differences that can lead to a smaller efficiency of recommended measures.

Keywords: nuclear research facilities, negative effect, environment, radionuclide release.

For citation: Fomichev V.V., Pakholik D.A., Kochnov O.Yu., Kuznetsov N.V. Impact of the VVR-ts Nuclear Research Reactor on the Environment. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 117–127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.10> (in Russian).

References

1. Bazhukova I.N., Bazhukov S.I., Baranova A.A. *Technologies of nuclear medicine*. Yekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2022, 105 p. (in Russian).
2. *Catalog of the RFP JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry»*. Obninsk. Available at: <https://karpovipc.ru/index.php/katalogrpf> (data accessed Mar. 07, 2023) (in Russian).
3. *The Supply of Medical Radioisotopes «Medical Isotope Supply in the Future: Production Capacity and Demand Forecast for the 99Mo/99mTc Market, 2015-2020»*. Nuclear Energy Agency, OECD, 2015. Available at: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_36035/the-supply-of-medical-radioisotopes-2015-medical-isotope-supply-review-99mo/99mtc-market-demand-and-production-capacity-projection-2015-2020 (data accessed Mar. 05, 2023).
4. Kodina G.E., Krasikova R.N. *Methods for obtaining radiopharmaceuticals and radionuclide generators for nuclear medicine*. Moscow, MPEI Publ, 2014, 281 p. (in Russian).
5. SanPiN 2.6.1.2523-09. *Radiation safety standards*. Put into act by order of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 07.07.2009 No. 47. Available at: https://www.np-ciz.ru/user-files/2_6_1_2523-09.pdf (data accessed Mar. 07, 2023) (in Russian).
6. SP 2.6.1.2612–10. *Basic sanitary rules for ensuring radiation safety*. Put into act by order of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 26.04.2010 No. 40. Available at: https://orfi.ru/files/doc/uchcenter/osporb_2612612-10.pdf (data accessed Mar. 07, 2023) (in Russian).
7. Soboleva I.A., Belyaeva E.N. *Guide to methods for monitoring environmental radioactivity*. Moscow, 2002, 432 p. (in Russian).
8. Makhonko K.P. *Guidelines for the organization of monitoring the state of the natural environment in the area of the location of the nuclear power plant*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990, 350 p. (in Russian).
9. *Report on environmental safety of JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry»*, Obninsk. Available at: <http://www.karpovipc.ru/index.php/ekologiya> (data accessed Mar. 07, 2023) (in Russian).
10. Decree of the Government of the Russian Federation No. 731 dated June 26, 2018 «On the standards for permissible releases of radioactive substances and the standards for permissible discharges of radioactive substances, as well as on the issuance of permits for the release of radioactive substances, permits for the discharge of radioactive substances». Available at: <https://docs.cntd.ru/document/550507640> (data accessed Mar. 07, 2023) (in Russian).
11. Makhon'ko K.P., Avramenko A.S. Surface β -activity of soil and vegetation caused by nuclear-explosion products and its dependence on the vertical migration of isotopes. *Atomic Energy*. 1977, vol. 42, iss. 5, pp. 465–467. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01120073>

Authors

Vladimir V. Fomichev, head of department,

E-mail: Vovik19931993@mail.ru

Denis A. Pakholik, leading engineer-physicist,

E-mail: pakholikda@mail.ru

Oleg Yu. Kochnov, chief engineer, professor, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: kochnov@karpovipc.ru

Nikita V. Kuznetsov, head of department,

E-mail: kuznetsov@karpovipc.ru