

Анализ возможностей радиоэкологического мониторинга для оценки влияния нормализованных выбросов АЭС на агроэкосистемы

С.И. Спиридонов, Р.А. Микаилова, В.К. Кузнецов

НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ,
249035, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, д. 1, корп. 1

Реферат. Регламенты радиоэкологического мониторинга (РЭМ) агроэкосистем в районах расположения штатно функционирующих АЭС характеризуются высокой степенью детализации. Получение регламентированных эмпирических данных требует значительных финансовых затрат. В этой связи возникает вопрос – насколько мониторинговые данные отражают влияние АЭС на агросферу? На основании информации о многолетних фактических выбросах Курской и Ростовской АЭС рассчитана динамика содержания в почве радионуклидов станционного происхождения. Показано, что содержание долгоживущих ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве увеличивается в течение времени работы АЭС в 30–40 раз. Однако сопоставление результатов расчета с многолетними данными РЭМ показало, что вклад станционных ^{137}Cs и ^{90}Sr в удельную активность этих радионуклидов в почве не превышает 0,01–0,1%. Таким образом, в ходе РЭМ определяется содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr глобального и чернобыльского происхождения. Пространственное распределение ^{137}Cs на территориях 30-километровых зон в силу пренебрежимо малого вклада АЭС является безградиентным и подчиняется логнормальному закону. Согласно расчетным оценкам, активность станционных радионуклидов в почве, рекомендованных к определению в ходе РЭМ, меньше порогов обнаружения. Сделан вывод о целесообразности оптимизации регламента РЭМ агроэкосистем на территориях, прилегающих к АЭС. Возможна корректировка перечня определяемых радиоактивных веществ, сокращения видов агропродукции, подлежащей контролю, и увеличения периодов между отборами проб. Подчеркнута необходимость фокусировки усилий на разработке программ РЭМ агроэкосистем для оценки последствий нештатных и аварийных ситуаций.

Ключевые слова: атомные электростанции, радиоэкологический мониторинг, агроэкосистемы, станционные радионуклиды, глобальные и чернобыльские выпадения, удельная активность в почве, плотность вероятности распределения, дозовая нагрузка на население.

Для цитирования: Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Кузнецов В.К. Анализ возможностей радиоэкологического мониторинга для оценки влияния нормализованных выбросов АЭС на агроэкосистемы. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:113–127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.08>

Введение

Важнейшим условием развития ядерной энергетики наряду с экономической конкурентоспособностью, полным использованием сырьевого потенциала, технологической поддержкой режима нераспространения является обеспечение радиационной безопасности населения и биоты. Комплекс задач в этой сфере включает в себя как радиоэкологическое обоснование планируемых ядерно-энергетических объектов, так и их «сопровождение» в процессе функционирования, включающее в себя мониторинговые исследования и обеспечение возможности прогнозирования последствий радиационных аварий [1].

Многообразие радиоэкологических задач диктует необходимость разработки и использования различных методологических подходов, экспериментальных методов и расчетного инструментария. В статье уделено внимание вопросам радиоэкологического мониторинга (РЭМ) АЭС, работающих в штатном режиме. Следует подчеркнуть, что мониторинговые работы в условиях аварийных (нештатных) ситуаций должны планироваться на основе специальных методов прогностической оценки.

Основная цель РЭМ в регионе расположения АЭС – оценка воздействия атомной станции на население на основе многолетних данных радиоэкологических исследований [2, 3]. При этом особое внимание уделяется аграрным экосистемам, поскольку в 50-километровой зоне функционирующих в настоящее время атомных станций от 50 до 90% территории занимают сельскохозяйственные угодья [4]. Агропродукция, производимая в регионе размещения АЭС, является одним из основных источников поступления радионуклидов в организм человека. Для оценки роли агросферы в формировании дозовой нагрузки на население от газоаэрозольных выбросов АЭС выполнены расчеты парциальных доз, формируемых стационарными радионуклидами в составе различных компонентов окружающей среды [5]. Установлено, что основные вклады в суммарную дозу от выбросов АЭС вносят радионуклиды, поступившие в сельскохозяйственную продукцию.

К настоящему времени накоплен значительный объем информации по результатам РЭМ агроэкосистем в районах расположения АЭС Российской Федерации [2, 3, 6 – 8]. Представляется необходимым проанализировать накопленные эмпирические данные на предмет того, насколько они позволяют оценить влияние именно АЭС на загрязнение почвы и сельскохозяйственной продукции. На основании результатов такого анализа можно будет сделать вывод о целесообразности детализированных регламентов РЭМ агроэкосистем в районах расположения АЭС, функционирующих в штатном режиме.

Как отмечено в [1], один из основных принципов радиоэкологического мониторинга – обеспечение достоверной оценки радиационного воздействия на население с наименьшими затратами. В этой связи в качестве одного из основных принципов РЭМ следует рассматривать оптимальную организацию работ, сочетающих как экспериментальные, так и расчетные методы, с целью разумной экономии средств, расходуемых на проведение мониторинговых исследований (пробоотбор, пробоподготовка, измерения) [1].

Данная работа посвящена анализу возможностей радиоэкологического мониторинга для оценки влияния АЭС, функционирующих в штатном режиме, на агросферу.

Выполнен краткий обзор существующих регламентов РЭМ агроэкосистем; проведены расчеты накопления в почве регламентируемых радионуклидов, выбрасываемых в атмосферу при работе АЭС; оценены вклады стационарных радионуклидов в загрязнение почвы на основании сопоставления результатов расчета и многолетних данных РЭМ.

Особенности регламентов РЭМ агроэкосистем

Важнейшими элементами регламентов РЭМ агроэкосистем в районах расположения АЭС являются [4, 8, 9]

- список компонентов агроэкосистем и видов сельскохозяйственной продукции, подлежащих контролю;
- перечни контролируемых радионуклидов;
- «временной фактор» – периодичность отбора проб с последующей пробоподготовкой и измерением содержания радионуклидов в пробах.

Эти элементы определяют степень детализации обследования территорий, прилегающих к АЭС, и совокупные финансовые затраты на проведение радиоэкологического мониторинга.

Согласно регламенту радиоэкологического мониторинга агроэкосистем, в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации [4] следует отбирать пробы почвы пахотных и кормовых угодий, воды, продукции растениеводства (овощи, картофель, злаки и т.д.), кормов, продукции животноводства (мясо различных сельскохозяйственных животных, молоко и т.д.). Наиболее часто рекомендуется выполнять отбор образцов молока – пять раз в течение года. Содержание радионуклидов в почве, как указано в [4], следует определять два раза в год для пахотных угодий и три раза – для пастбищ и сенокосов. Перечни контролируемых радионуклидов включают в себя продукты деления ($^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I) и продукты активации (^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe). Кроме того рекомендуется измерять содержание ^3H в воде в период орошения или лова рыбы.

В документе МАГАТЭ [9], посвященном программам и системам мониторинга источника (source monitoring) и мониторинга окружающей среды (environmental radiation monitoring), рекомендовано контролировать содержание радионуклидов в воздухе, почве, питьевой воде, подземных водах и широком наборе агропродукции. При этом периодичность отбора проб варьирует от одного года (для почвы) до месяца (молоко, трава на пастбищах, листовые овощи). В качестве типичного измеряемого параметра упоминается суммарная бета-активность, говорится о возможности применения методов гамма-спектрометрии. Перечень радионуклидов в составе атмосферных выбросов АЭС, которые необходимо определять в ходе РЭМ, не конкретизирован.

В этом же документе МАГАТЭ приведены значения пределов обнаружения стационарных радионуклидов ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Sr , $^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, ^{137}Cs в почве и воде. Минимально детектируемые концентрации этих радионуклидов в почве варьируют в диапазоне 2 – 4 Бк/кг при массе образца 100 г [9]. Следует отметить, что определение содержания ^{90}Sr в почве и других объектах окружающей среды выполняется, согласно существующим стандартам, трудоемким, долговременным и дорогостоящим радиохимическим методом. Разработан гораздо менее затратный метод измерения

активности этого радионуклида на основе бета-спектрометрии. Как отмечено в [10], минимальная измеряемая активность ^{90}Sr в почве составляет в этом случае 60 – 100 Бк/кг при отсутствии других техногенных радионуклидов. При наличии ^{137}Cs и ^{60}Co в почве этот показатель может составить 200 Бк/кг.

На основании краткого анализа особенностей регламентов РЭМ можно сделать вывод о том, что неоднократное (в течение года) определение содержания широкого перечня радионуклидов в большом количестве объектов требует значительных материальных и финансовых затрат. При этом возникает вопрос о возможности определения содержания радионуклидов стационарного происхождения в почве и сельскохозяйственной продукции с учетом двух факторов:

- ограничение измеряемых концентраций радионуклидов пределами детектирования;
- наличие на территориях, прилегающих к АЭС, дополнительных источников техногенных радионуклидов, к которым относятся глобальные и чернобыльские выпадения.

При обосновании оптимальных уровней детализации регламентов РЭМ агроэкосистем следует учесть, что радиоактивные выбросы АЭС при штатной работе строго контролируются. Наличие данных о фактических выбросах АЭС позволяет выполнить расчетные оценки содержания стационарных радионуклидов в компонентах агроэкосистем на основе радиоэкологических моделей.

Содержание стационарных радионуклидов в почве на территориях, прилегающих к АЭС

Поступая в окружающую среду, радионуклиды аккумулируются в почве, которая является источником их поступления в растительность и дальнейшей миграции по пищевым цепям. В этой связи получение эмпирических данных по содержанию радионуклидов в почве является неотъемлемой составляющей РЭМ территорий, прилегающих к АЭС [3, 4, 8]. Основное внимание при проведении РЭМ уделяется радиологически значимым долгоживущим радионуклидам ^{137}Cs и ^{90}Sr , нормируемым в сельскохозяйственной и пищевой продукции [2, 3, 6 – 8].

Для оценки вкладов радиоактивных веществ стационарного происхождения в загрязнение почвы техногенными радионуклидами выполнены расчеты с использованием программного пакета CROM (версия 8.4.1) [11]. Это программное средство разработано на основе моделей, представленных в документе МАГАТЭ [12], и предназначено для прогнозирования распределения радионуклидов в составе выбросов АЭС по компонентам окружающей среды и расчета дозовых нагрузок на население. Модели параметризованы с учетом среднесуточных метеоусловий и других региональных характеристик. Содержание радионуклидов, накапливающихся в почве, рассчитывалось на основе точечного консервативного подхода для «точки» на границе санитарно защитных зон АЭС.

В качестве ядерно-энергетических объектов – источников поступления радионуклидов в окружающую среду – выбраны Курская АЭС с реакторами РБМК-1000 и Ростовская АЭС с реакторами ВВЭР-1000. Ввод в эксплуатацию первого реактора Курской АЭС состоялся в 1977 г., Ростовской АЭС – в 2001 г. Расчеты выполнены на основании информации [13], характеризующей многолетние фактические атмосфер-

ные выбросы этих АЭС. Следует отметить, что годовые выбросы в рамках длительного времени работы атомных электростанций приведены только для ^{131}I , ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co и ИРГ. На Курской АЭС ряд радионуклидов (^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{140}Ba и др.) начали контролировать с 2020 г., а ^{90}Sr определяли в составе атмосферных выбросов до 2004 г. [13]. Для заполнения пропусков в исходных данных по отдельным радионуклидам использовали усредненные значения их годовых выбросов.

На рисунке 1 представлена расчетная максимальная удельная активность радионуклидов стационарного происхождения в верхнем слое почвы (0–25 см) в непосредственной близости от Курской АЭС. Динамика рассматриваемого показателя определяется суперпозицией процессов различной природы – выпадением радионуклидов на поверхность почвы, радиоактивным распадом и экологическим очищением прежде всего за счет вертикальной миграции по почвенному профилю. Период полураспада существенным образом влияет на интенсивность снижения содержания радионуклидов в почве.

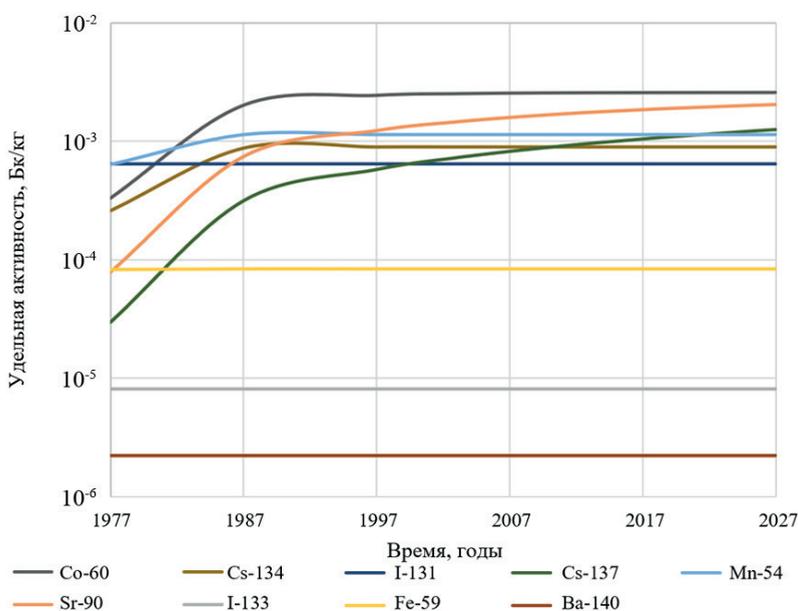


Рис. 1. Расчетная динамика максимальной удельной активности в почве радионуклидов, выбрасываемых Курской АЭС

Удельная активность короткоживущих радионуклидов (^{133}I , ^{131}I , ^{140}Ba и ^{59}Fe с периодами полураспада 0,83; 8; 12 и 44 сут. соответственно) в почве не меняется начиная с первого года после начала эксплуатации АЭС. Концентрации ^{54}Mn , ^{134}Cs и ^{60}Co (периоды полураспада – от 312 сут до 5,27 лет) приходят к состоянию квазиравновесия через 10–15 лет. Долгоживущие радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr с периодами полураспада 30 и 29 лет продолжают накапливаться в почве в течение всего времени работы станции. Так за период с 1977 по 2030 гг. концентрация ^{137}Cs в почве увеличивается в 43 раза, а концентрация ^{90}Sr – в 26 раз. Некоторое различие связано с тем, что ^{90}Sr мигрирует по почвенному профилю с большей интенсивностью по сравнению с ^{137}Cs .

Динамика максимальной удельной активности радионуклидов стационарного происхождения в верхнем слое почвы (0–25 см) в непосредственной близости от Ростовской АЭС представлена на рис. 2. В отличие от ^{131}I , ^{134}Cs и ^{60}Co долгоживущий ^{137}Cs продолжает накапливаться в почве и в настоящее время.

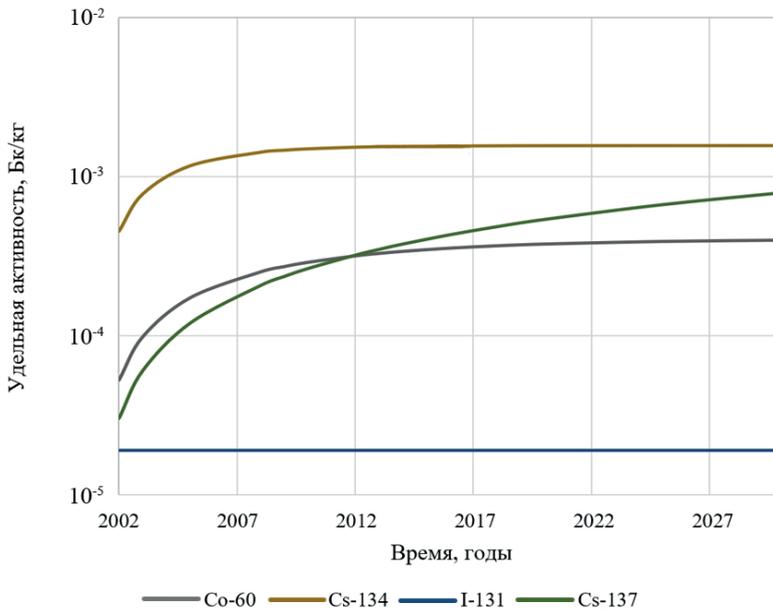


Рис. 2. Расчетная динамика максимальной удельной активности в почве радионуклидов, выбрасываемых Ростовской АЭС

Следует отметить, что концентрации каждого из рассмотренных радионуклидов стационарного происхождения в почве не превышают значения $3 \cdot 10^{-3}$ Бк/кг (ниже порога обнаружения) в течение всего времени функционирования АЭС. Представляет интерес сопоставление полученных результатов с данными радиоэкологического мониторинга территорий, прилегающих к рассматриваемым АЭС.

Сравнение результатов расчета с данными РЭМ

К техногенным радионуклидам, содержание которых определяют в почве и агропродукции при проведении РЭМ в регионах размещения АЭС, относятся прежде всего ^{137}Cs и ^{90}Sr [2, 3, 6–8]. Данные многолетних наблюдений за удельной активностью этих радионуклидов в верхнем слое почвы (0–25 см) на расстоянии, не превышающем 10 км от Курской АЭС [2, 7], представлены на рис. 3–4 (статистические параметры включают в себя медиану, первый и третий квартили, а также границы эмпирической выборки – минимальное и максимальное значения). На этих же рисунках отражена расчетная динамика удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr , накапливающихся в почве в результате атмосферных выбросов Курской АЭС.

Сравнительный анализ полученных данных показывает, что удельная активность ^{137}Cs стационарного происхождения в почве на четыре порядка меньше удельной

Анализ возможностей радиоэкологического мониторинга для оценки влияния нормализованных выбросов АЭС на агроэкосистемы

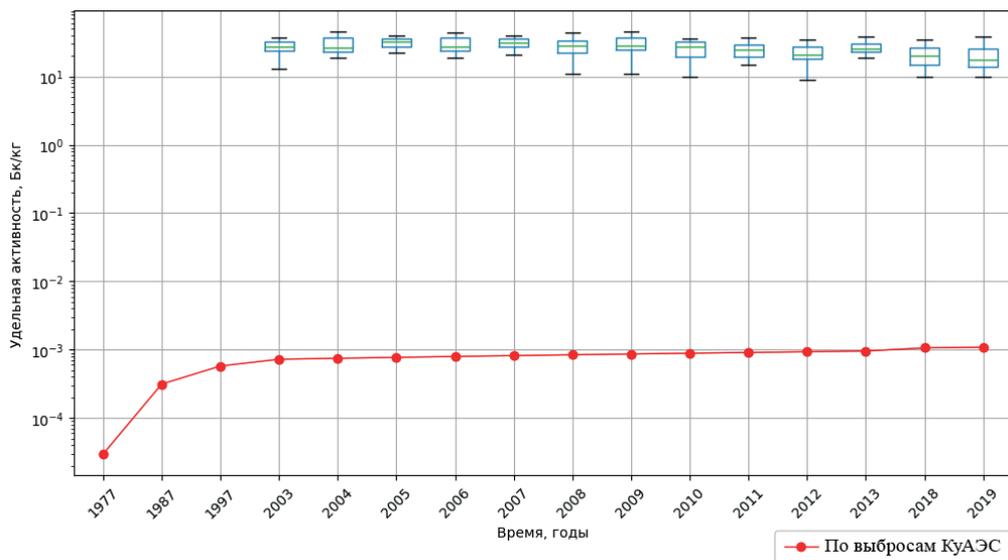


Рис. 3. Сопоставление удельных активностей ^{137}Cs в почве в непосредственной близости от Курской АЭС, полученных в ходе РЭМ и рассчитанных по данным атмосферных выбросов станции

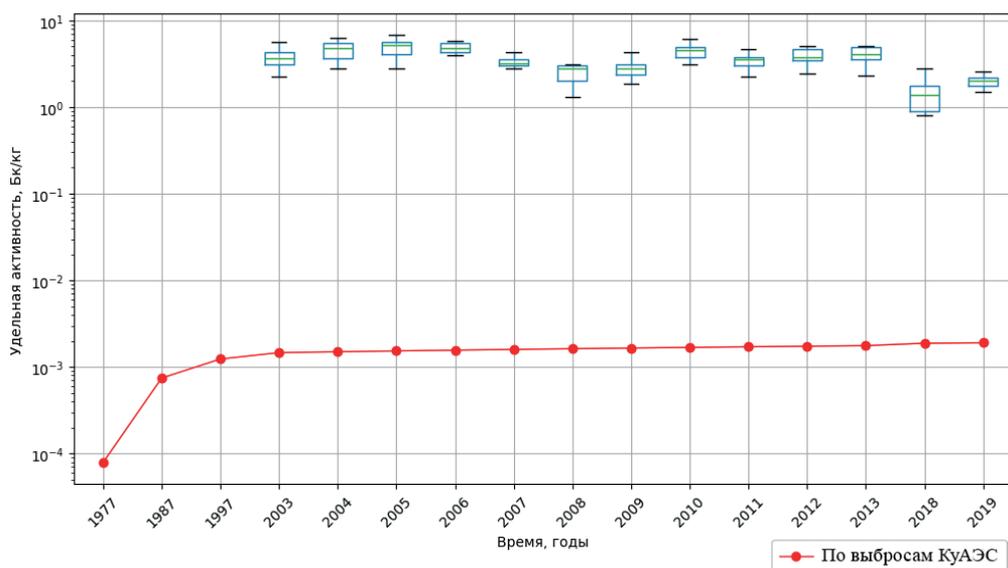


Рис. 4. Сопоставление удельных активностей ^{90}Sr в почве в непосредственной близости от Курской АЭС, полученных в ходе РЭМ и рассчитанных по данным атмосферных выбросов станции

активности этого радионуклида в почве, измеренной в ходе РЭМ на территории, прилегающей к Курской АЭС. Аналогичное сравнение для ^{90}Sr демонстрирует превышение суммарного содержания этого радионуклида в почве над содержанием ^{90}Sr , источником которого является Курская АЭС, на три порядка.

Таким образом, в ходе РЭМ зоны влияния АЭС проводится определение содержания в почве «фоновых» техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , источники происхождения которых – глобальные и чернобыльские выпадения. Вклады ^{137}Cs и ^{90}Sr , поступивших

в почву в результате выбросов Курской АЭС, в суммарную удельную активность этих радионуклидов в почве не превышают 0,013 и 0,22% соответственно (при выполнении консервативных оценок вкладов АЭС рассматривались минимальные мониторинговые и максимальные расчетные значения в рамках периода 2003 – 2019 гг.). Меньший вклад стационарного ^{137}Cs по сравнению с ^{90}Sr можно объяснить тем, что чернобыльское загрязнение рассматриваемой территории обусловлено, в основном, ^{137}Cs .

На рисунке 5 представлено сравнение динамики максимальной удельной активности ^{137}Cs стационарного происхождения в почве на территории, прилегающей к Ростовской АЭС, с многолетними данными радиоэкологического мониторинга [6]. Из рисунка видно, что, согласно данным последнего года проведения РЭМ, содержание ^{137}Cs в почве, сформированное, в основном, за счет глобальных выпадений, на четыре порядка превышает содержание этого радионуклида, накопленного в результате выбросов Ростовской АЭС.

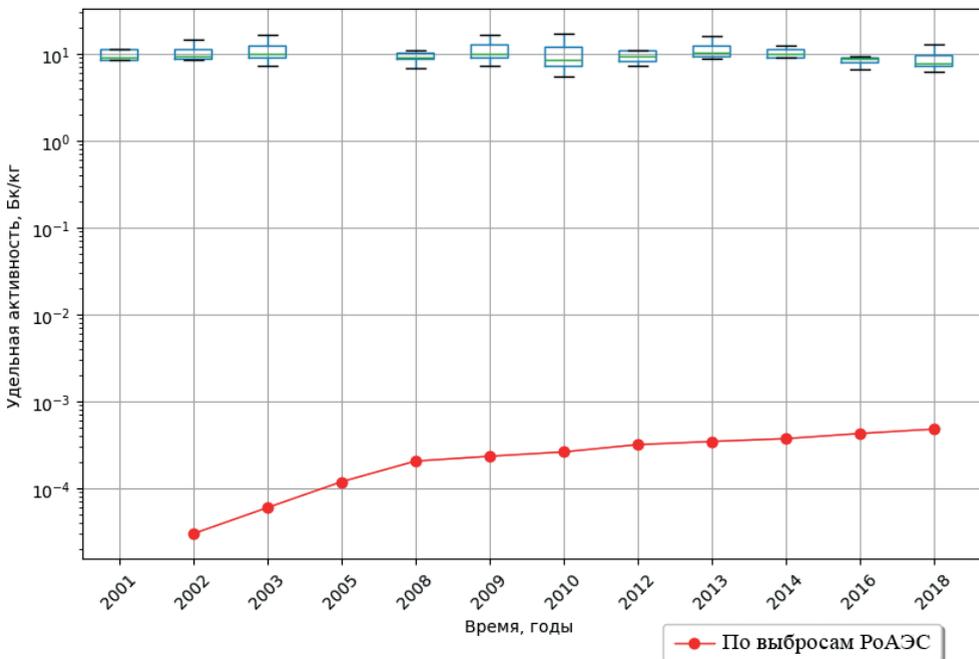


Рис. 5. Сопоставление удельных активностей ^{137}Cs в почве в непосредственной близости от Ростовской АЭС, полученных в ходе РЭМ и рассчитанных по данным атмосферных выбросов станции

Полученные результаты позволяют сделать вывод об отсутствии заметного влияния выбросов АЭС на увеличение удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве на фоне содержания этих радионуклидов глобального и чернобыльского происхождения.

В подтверждение этого вывода можно рассмотреть данные, характеризующие распределение ^{137}Cs в почве на территории 30-километровых зон Курской и Ростовской АЭС (объемы выборок – 300 и 590 значений). Обработка данных для Курской АЭС показала, что распределение плотности загрязнения ^{137}Cs (A , кБк/м²) подчиняется логнормальному закону (рис. 6а). Значение критерия согласия Колмогорова – Смирнова, позволяющего оценить соответствие выборки $\ln(A)$ нормальному распределению, составило 0,0773, что удовлетворяет критическому значению на уровне значимости

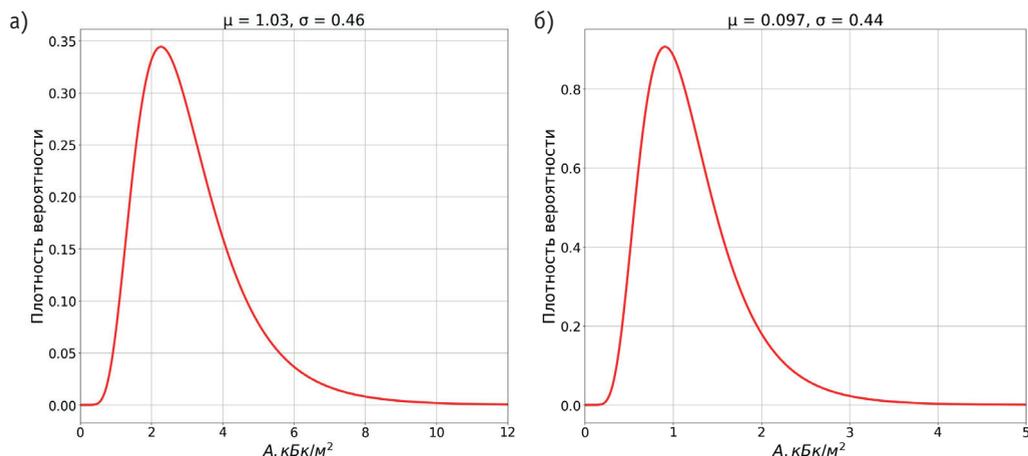


Рис. 6. Плотности вероятности распределения величин плотности загрязнения почвы ^{137}Cs 30-километровых зон Курской (а) и Ростовской (б) атомных электростанций

0,01 (1%). Логнормальному закону подчиняется и распределение плотности загрязнения почвы ^{137}Cs в 30-километровой зоне Ростовской АЭС (рис. 6б).

Оценены величины параметров нормального распределения $N(\mu, \sigma)$ для логарифма плотности загрязнения ^{137}Cs почвы 30-километровых зон рассматриваемых атомных станций [1]. Значения μ и σ для Курской АЭС составили 1,03 и 0,46, а для Ростовской АЭС – 0,097 и 0,44 соответственно. Меньшее значение среднего значения μ во втором случае, по всей видимости, обусловлено тем, что регион Ростовской АЭС не затронут чернобыльскими выпадениями. Величины σ являются близкими, несмотря на различие в основных источниках загрязнения территорий ^{137}Cs (наличие «чернобыльского вклада» для Курской АЭС).

Таким образом, на основании анализа эмпирических данных, характеризующих распределение ^{137}Cs на территориях 30-километровых зон АЭС, можно утверждать, что плотность загрязнения почвы этим радионуклидом является случайной величиной, подчиняющейся теоретическому (логнормальному) закону распределения. Рассматриваемые территории являются безградиентными с точки зрения загрязнения ^{137}Cs в силу пренебрежимо малого вклада АЭС в формирование градиента следа радиоактивных выпадений.

Анализ полученных результатов

Сопоставление динамики содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве, рассчитанной по данным многолетних выбросов Ростовской и Курской АЭС, и результатов РЭМ за долгосрочный период показало, что АЭС не вносят заметный вклад в загрязнение почвы этими радионуклидами. Вклад станционных ^{137}Cs и ^{90}Sr в удельную активность этих радионуклидов в почве не превышает 0,01 – 0,1%. В ходе радиоэкологического мониторинга территорий, прилегающих к АЭС, определяется содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr глобального и чернобыльского происхождения. Получено статистическое обоснование того, что пространственное распределение этих радионуклидов на территории, прилегающей к АЭС, подчиняется логнормальному распределению.

Согласно расчетным оценкам, активность стационарных радионуклидов (^{54}Mn , ^{134}Cs , ^{60}Co , ^{131}I , ^{59}Fe , ^{140}Ba) в почве, большинство из которых рекомендованы к определению согласно регламенту РЭМ агроэкосистем в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации [4, 8], меньше минимально детектируемой активности. Из этого следует, что содержание этих радионуклидов в продукции сельского хозяйства так же, как и стационарных ^{137}Cs и ^{90}Sr , не превысит пределов обнаружения в течение всего времени работы АЭС. Коэффициенты накопления радионуклидов в растительности из почвы, как правило, меньше единицы за редким исключением. Интегральный показатель воздействия АЭС на население – дозовая нагрузка, рассчитанная на основании фактических выбросов Курской и Ростовской АЭС, не превысит 4,6 мкЗв/год. Эта величина меньше нижней границы дозовой квоты для АЭС, составляющей 10 мкЗв/год [14].

В этой связи представляется целесообразной оптимизация регламента РЭМ агроэкосистем на территориях, прилегающих к АЭС. Возможна корректировка перечня определяемых радиоактивных веществ прежде всего за счет снижения количества измерений трудозатратных радионуклидов (не определяемых посредством гамма-спектрометрии), сокращения видов сельскохозяйственной продукции, подлежащей контролю, и увеличения периодов между отборами проб.

При этом следует обратить внимание на радионуклиды, вносящие наибольший вклад в суммарную дозовую нагрузку на население. К ним относятся прежде всего ^{14}C и ^3H [5, 15], контроль которых в составе выбросов российских АЭС стали осуществлять с 2018–2020 гг. Как отмечено в [16], искусственная продукция ^{14}C сопоставима с естественным образованием, что приводит к накоплению ^{14}C в биосфере и генетических структурах. Важными направлениями исследований являются совершенствование методов экспериментального определения ^{14}C и ^3H в природных средах и развитие моделей, описывающих их поведение в окружающей среде.

При планировании РЭМ агроэкосистем на территориях, прилегающих к АЭС, необходимо учитывать региональные особенности и прежде всего наличие дополнительных источников техногенного загрязнения (кроме глобальных и чернобыльских выпадений). Так Ленинградская АЭС не является основным «дозообразующим объектом» для населения в регионе ее расположения [17]. Наибольший вклад в дозу облучения населения вносит предприятие по переработке и захоронению радиоактивных отходов – «РосРАО».

В некоторых регионах дополнительное загрязнение агропродукции может быть обусловлено специфическими процессами, к которым относится орошение дождеванием. Как отмечено в [18], при потреблении продукции, полученной с сельскохозяйственных угодий, орошаемых водами водоема-охладителя АЭС, суммарная доза внутреннего облучения населения может достигать 100 мкЗв/год. Это значение превышает нижнюю границу дозовой квоты для АЭС – 10 мкЗв/год [19]. Таким образом, регламенты РЭМ агроэкосистем целесообразно разрабатывать с учетом особенностей ведения агропроизводства в регионах расположения конкретных АЭС.

Заключение

Радиоэкологический мониторинг зон влияния АЭС безусловно необходим с точки зрения периодического информирования общественности о радиологической об-

становке. Оценка независимых специалистов и экспертов представляется важным дополнением к исследованиям штатных экологов АЭС. Согласно рекомендациям МАГАТЭ [13], радиационный контроль сельскохозяйственной продукции местного производства является неотъемлемым условием функционирования АЭС.

В качестве ключевого постулата при коррекции программ и регламентов РЭМ агроэкосистем необходимо рассматривать стремление к оптимальному расходованию средств на проведение пробоотбора, пробоподготовки и измерений. Одним из путей достижения этой цели является использование наряду с экспериментальными методами прогностических оценок на основе радиоэкологических моделей при наличии полновесной информации, характеризующей атмосферные выбросы АЭС.

Упомянутая выше оптимизация касается регламента РЭМ агроэкосистем в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации [8, 12]. Следует подчеркнуть, что в условиях существующей геополитической ситуации необходимо сфокусировать усилия на разработке систем РЭМ, позволяющих оценить последствия для агроэкосферы различного рода нештатных ситуаций на АЭС и других объектах ЯТЦ. Неотъемлемый элемент такого рода систем – методические подходы к обоснованию уровней оперативного вмешательства на основании данных мониторинга [19]. Для решения двух взаимосвязанных задач – радиоэкологического прогнозирования и корректного установления уровней оперативного вмешательства – целесообразно применять единый расчетный инструментарий [20].

Литература

1. Спиридонов С.И., Кузнецов В.К., Панов А.В., Титов И.Е. К вопросу об оптимизации радиоэкологического мониторинга в регионе размещения предприятий ядерного топливного цикла. *Радиация и риск*. 2019;28(4):44–53. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-44-53>
2. Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в зоне воздействия АЭС: методология и результаты исследований. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2019;64(4):25–31. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5d1102809c5ac3.32613968
3. Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Карпенко Е.И., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Панов А.В., Цыгвинцев П.Н. Радиоэкологический мониторинг и его роль в обеспечении безопасности атомных электростанций. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;4:19–30. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.02>
4. МУ 13.5.13-00. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов (2-е издание): Методические указания (утв. Министерством сельского хозяйства РФ 7 августа 2000 г.). М., 2005, 35 с.
5. Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Нуштаева В.Э. К вопросу об оценке соблюдения квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов АЭС. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2021;61(6):664–670. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869803121060114>
6. Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К. Радиационно-экологический мониторинг в регионе размещения Ростовской АЭС. Анализ результатов многолетних исследований. *Радиационная гигиена*. 2019;12(2):54–65. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-54-65>
7. Кузнецов В.К., Панов А.В., Санжарова Н.И., Исамов Н.Н., Андреева Н.В., Гешель И.В., Сидорова Е.В. Анализ результатов радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Курской АЭС. *Радиационная гигиена*. 2020;13(2):19–30. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-2-19-30>

8. Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Карпенко Е.И., Андреева Н.В., Гордиенко Е.В. Концепция и программа радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 (Под ред. проф. С.В. Фесенко). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020, с. 9–21.

9. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection. IAEA Safety standards series no. RS-G-1.8. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005, 119 p.

10. Потапов В.Н., Иванов О.П., Лукьянов В.В., Степанов В.Е., Коробова Е.М., Михайловская Л.Н. Портативный бета-спектрометр для полевых измерений активности ^{90}Sr в радиоэкологии и при реабилитации объектов использования атомной энергии. *Атомная энергия*. 2020;129(3):159–165. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3546> (дата обращения 10.10.2024).

11. Robles B., Suárez A., Mora J.C., Cancio D. Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluaciÓn de iMpacto). Madrid, 2007, 60 p. (Исп.).

12. 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, 229 p.

13. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2002–2022 годы. Ежегодники Росгидромета. Обнинск: НПО «Тайфун».

14. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03. М.: Минздрав России, 2003. 41 с.

15. Vasyanovich M.E., Ekin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;208–209:106006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106006>

16. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Аналитические методы дозиметрии ионизирующих излучений в окружающей среде. М.: ООО «ИПЦ «Маска», 2024, 236 с.

17. Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э., Карпенко Е.И. Сравнительная оценка дозовой нагрузки на население от атмосферных выбросов предприятий атомно-промышленного комплекса в регионе расположения Ленинградской АЭС. Актуальные вопросы радиоэкологии: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 1 (Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018, с. 58–66.

18. Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М. Радиационно-гигиенические аспекты использования воды водоемов-охладителей АЭС для орошения сельскохозяйственных угодий. *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. 2004;49(6):27–36.

19. Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Фесенко С.В. Оценка уровней оперативного вмешательства для защиты населения на основе сценариев аварий на российских АЭС. *Радиация и риск*. 2023;32(1):36–47. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-1-36-47>

20. Спиридонов С.И., Микаилова Р.А. Подход к оценке мониторинговых уровней оперативного вмешательства после аварии на АЭС с использованием системы RODOS. *Радиация и риск*. 2024;33(3):66–79. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2024-33-3-66-79>

Поступила в редакцию 12.11.2024

После доработки 06.03.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025

Авторы

Спиридонов Сергей Иннокентьевич, главный научный сотрудник, д.биол.н., профессор,

E-mail: spiridonov.si@gmail.com

Микаилова Рена Александровна, научный сотрудник,

E-mail: renchik_vhi@mail.ru

Кузнецов Владимир Константинович, главный научный сотрудник, д.биол.н.,

E-mail: vkkuzn@yandex.ru

UDC 621.311.25:614.876:504.064.2

Analysis of Radioecological Monitoring Capabilities for Assessing the Impact of Normalized NPP Emissions on Agroecosystems

Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Kuznetsov V.K.

NRC "Kurchatov Institute" – RIRAE,

1 Kievskoe sh., 249035 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The regulations for radioecological monitoring (REM) of agroecosystems in areas surrounding operational nuclear power plants (NPPs) are characterized by a high level of detail. Obtaining the required empirical data involves significant financial costs. This raises the question: to what extent do monitoring data reflect the impact of NPPs on the agricultural environment? Based on long-term emissions data from the Kursk and Rostov NPPs, the dynamics of radionuclide accumulation in soil of NPP origin were calculated. It was shown that the concentrations of long-lived ^{137}Cs and ^{90}Sr in soil increase over time during NPP operation by 30–40 times. However, a comparison of the calculations with REM data over many years indicates that the contribution of NPP-derived ^{137}Cs and ^{90}Sr to the specific activity of these radionuclides in soil does not exceed 0.01–0.1%. Thus, REM primarily detects ^{137}Cs and ^{90}Sr of global and Chernobyl origin. Due to the negligible NPP contribution, the spatial distribution of ^{137}Cs within 30-km zones is uniform and follows a lognormal distribution. According to estimates, the activity levels of NPP-derived radionuclides in soil, recommended for REM, are below detection limits. The study concludes that REM guidelines for agroecosystems around NPPs should be optimized. Adjustments may include revising the list of radionuclides analyzed, reducing the types of agricultural products monitored, and increasing the intervals between sampling. The need to focus efforts on developing REM programs for assessing impacts in non-routine and emergency situations is emphasized.

Keywords: nuclear power plants, radioecological monitoring, agroecosystems, NPP radionuclides, global and Chernobyl fallout, specific soil activity, probability density distribution, population dose load.

For citation: Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Kuznetsov V.K. Analysis of Radioecological Monitoring Capabilities for Assessing the Impact of Normalized NPP Emissions on Agroecosystems. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025.1:113–127. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.08> (in Russian).

References

1. Spiridonov S.I., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Titov I.E. To the question of optimisation of radioecological monitoring in the vicinity of nuclear fuel cycle enterprises. *Radiation and Risk*. 2019;28(4):44–53. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-44-53> (in Russian).

2. Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I., Panov A.V., Isamov N.N. Radioecological Monitoring of Agroecosystems in the NPP Vicinity: Methodology and Results of Investigations. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2019;64(4):25–31. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5d-1102809c5ac3.32613968 (in Russian).
3. Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Karpenko E.I., Isamov N.N., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Tsigvintsev P.N. Radioecological Monitoring and its Role in Ensuring Safety of Nuclear Power Plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021;4:19–30. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.02> (in Russian).
4. MU 13.5.13-00. Organization of state radioecological monitoring of agroecosystems in the zone of influence to radiation hazardous objects. Moscow, Publisher of the RAAS, 2000, 28 p.
5. Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Nushtaeva V.E. About the assessment of radiation doses for the population from NPP atmospheric releases within the compliance with the dose constraint for a single facility. *Radiation Biology. Radioecology*. 2021;61(6):664–670 (in Russian).
6. Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K. Radioecological monitoring in the vicinity of Rostov NPP. The analysis of results of long-term investigations. *Radiation Hygiene*. 2019;12(2):54–65. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-54-65> (in Russian).
7. Kuznetsov V.K., Panov A.V., Sanzharova N.I., Isamov N.N., Andreeva N.V., Geshel I.V., Sidorova E.V. The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of the Kursk Nuclear Power Plant. *Radiation Hygiene*. 2020;13(2):19–30. DOI: <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-2-19-30> (in Russian).
8. Sanzharova N.I., Panov A.V., Isamov N.N., Kuznetsov V.K., Karpenko E.I., Andreeva N.V., Gordienko E.V. Concept and program of radiation-ecological monitoring in the areas of nuclear power plant placement. *Monitoring of natural and agricultural ecosystems in areas of nuclear power plants: Proceedings of the RIRAE. Issue 3* (Ed. Prof. S.V. Fesenko). Obninsk: RIRAE Publ., 2020, p. 9–21 (in Russian).
9. Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection. IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.8. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005, 119 p.
10. Potapov V.N., Ivanov O.P., Luk'yanov V.V., Stepanov V.E., Korobova E.M., Mikhailovskaya L.N. Portable β -Spectrometer for ^{90}Sr Activity Field-Measurements in Radioecology and Rehabilitation of Nuclear Energy Facilities. *Atomic Energy*. 2021;129(3):155–162. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00728-5>
11. Robles B., Suárez A., Mora J.C., Cancio D. Models implemented in the CROM code (Crom code for impact assessment). Madrid, 2007, 60 p. (in Spanish).
12. 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, 229 p.
13. The radiation situation on the territory of Russia and neighboring states in 2002-2022. Yearbooks, 2004 – 2023. Obninsk, Roshydromet, FSBI “NPO Typhoon” Publ., 2004–2023 (in Russian).
14. Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants (SP AS-03). Sanitary rules and hygiene standards SanPin 2.6.1.24-03. Moscow, Ministry of Health of Russia, 2003, 41 p. (in Russian).
15. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019;208–209:106006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106006>
16. Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Analytical methods for dosimetry of ionizing radiation in the environment. Moscow: LLC “IPC “Maska”, 2024, 236 p. (in Russian).

17. Spiridonov S.I., Kurtmulaeva V.E., Karpenko E.I. Comparative assessment of the dose load on the population from atmospheric emissions of enterprises of the nuclear-industrial complex in the region of the Leningrad Nuclear Power Plant. Current issues of radioecology: Proceedings of the RIRAE. Issue 1. Ed. Corresponding Member of the RAS N.I. Sanzharova. Obninsk: RIRAE Publ., 2018, p. 58–66 (in Russian).

18. Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I., Alexakhin R.M. Radiation-hygienic aspects of the use of waters of cooling pond NPP for irrigating the agricultural land. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2004;49(6):27–36 (in Russian).

19. Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Fesenko S.V. Evaluation of the operational intervention levels for radiation protection of the public based on the emergency scenarios at Russian nuclear power plants. *Radiation and Risk*. 2023;32(1):36–47. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-1-36-47> (in Russian).

20. Spiridonov S.I., Mikailova R.A. Approach to assessing monitoring operational intervention levels after an accident at a nuclear power plant using the RODOS system. *Radiation and Risk*. 2024;33(3):66–79. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2024-33-3-66-79> (in Russian).

Authors

Sergei I. Spiridonov, chief researcher, Dr. Sci. (Biology), professor,

E-mail: spiridonov.si@gmail.com

Rena A. Mikailova, researcher,

E-mail: renchik_vhi@mail.ru

Vladimir K. Kuznetsov, chief researcher, Dr. Sci. (Biology),

E-mail: vkkuzn@yandex.ru