DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-44-53

УДК 621.039.58:504.054

К вопросу об оптимизации радиоэкологического мониторинга в регионе размещения предприятий ядерного топливного цикла

Спиридонов С.И., Кузнецов В.К., Панов А.В., Титов И.Е.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Выполнен краткий анализ радиоэкологических задач в сфере атомной энергетики, связанных с необходимостью обоснования экологической безопасности ядерно-энергетических объектов на этапе планирования и в процессе эксплуатации. Сформулированы принципы «мониторинга объекта», к которым относится комплексность оценки интегрального показателя – дозовой нагрузки с учётом всех путей облучения и оптимальная организация работ, сочетающих как экспериментальные, так и расчётные методы. Представлена общая схема «этапного подхода» к проведению радиоэкологического мониторинга объекта ядерного топливного цикла. Расчётные оценки, выполняемые на первом (после первичного радиоэкологического обследования) этапе, позволяют спланировать экспериментальные работы, направленные на консервативную оценку суммарной дозовой нагрузки. На основе обработки экспериментальных данных, полученных в зонах наблюдения атомных электростанций, установлен закон распределения плотности загрязнения почвы радионуклидами и определены значения дисперсии. Результаты точечной консервативной оценки и дополнительного вероятностного анализа позволяют сделать вывод о необходимости более затратных детализированных исследований.

Ключевые слова: радиоэкологический мониторинг, радиоэкологические задачи ядерной энергетики, объект ядерного топливного цикла, радионуклиды, пути облучения, дозовая нагрузка, дозовая квота, статистическое распределение.

Радиоэкологический мониторинг в системе радиоэкологических задач ядерной энергетики

При стратегическом планировании в ядерно-энергетической сфере рассматриваются различные концепции, основанные на применении инновационных технологий [1]. В рамках двухкомпонентной концепции предусматривается вовлечение быстрых реакторов в уже сложившуюся систему, включающую реакторы на тепловых нейтронах. В качестве перспективных реакторов рассматриваются установки с натриевым теплоносителем – БН-1200, разрабатываемые с учётом опыта эксплуатации БН-600 и создания БН-800.

Другая концепция, воплощённая в проекте «Прорыв», основана на использовании быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом [2]. В настоящее время реактор такого типа БРЕСТ-ОД-300 строится на площадке Сибирского химического комбината. Отличительная особенность концепции – создание в рамках опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) пристанционного ядерного топливного цикла (ПЯТЦ), включающего модуль фабрикация/рефабрикация ядерного топлива, а также модуль переработки отработавшего топлива. В перспективе планируется создание свинцового реактора БР-1200 и промышленного энергокомплекса с ПЯТЦ.

Одним из условий развития ядерной энергетики, наряду с экономической конкурентоспособностью, полным использованием сырьевого потенциала, технологической поддержкой режима нераспространения, является её экологическая приемлемость [3, 4]. Объекты ядерного

Спиридонов С.И.* – гл. научн. сотр., д.б.н., проф.; Кузнецов В.К. – гл. научн. сотр., д.б.н.; Панов А.В. – зам. директора, д.б.н., проф. РАН; Титов И.Е. – научн. сотр. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 249032, Калужская обл., Обнинск, Киевское шоссе, 109-й км. Тел. (484) 399-69-67; e-mail: spiridonov.si@gmail.com.

топливного цикла (ЯТЦ) оказывают многофакторное воздействие на окружающую среду. Однако повышенное внимание общественности приковано к радиационному фактору, специфичному для ядерного энергопроизводства [3]. В связи с этим следует подчеркнуть значимость радиоэкологических оценок эксплуатирующихся и планируемых объектов ЯТЦ. В настоящее время уделяется серьёзное внимание радиационной защите не только человека, но и биоты. Необходимость оценки радиационного воздействия на биоту декларируется в документах авторитетных международных организаций [5].

Совокупность радиоэкологических задач в сфере атомной энергетики включает обоснование ядерно-энергетических объектов и систем на всех стадиях их жизненного цикла: от этапа планирования до эксплуатации. Как отмечено выше, при разработке концепции развития ядерной энергетики в Российской Федерации большое внимание уделяется технологиям нового поколения. Инновационные технологии требуют всесторонней оценки, в том числе с точки зрения экологической безопасности, и сопоставления с существующими разработками.

При радиоэкологическом обосновании новых технологий целесообразно опираться на принцип интегральной сравнительной оценки как отдельных предприятий ЯТЦ, так и ядерно-энергетических систем [6]. Комплексность подхода определяет необходимость учёта различных режимов функционирования ядерных объектов, включая анализ вероятностей и последствий потенциальных нештатных и аварийных ситуаций. На начальной стадии исследовательского проекта сопоставление ядерно-энергетических систем может быть выполнено на основе обобщённых показателей, характеризующих радиационное воздействие на человека и биоту [7, 8]. Более детализированные оценки возможны при наличии информации о постулируемых аварийных сценариях для конкретных объектов ЯТЦ [9].

Важное место в рейтинге экологических задач ядерной энергетики занимает проблема радиоактивных отходов [3]. Решение вопросов по обращению с долгоживущими высокоактивными отходами, подлежащими окончательному захоронению, требует расчётного обоснования с использованием радиоэкологических подходов и методов. В качестве методического принципа рассматривается концепция радиационно-миграционной эквивалентности, согласно которой ставится задача максимального приближения к балансу биологической опасности высокоактивных отходов и сырьевых радиоактивных материалов [10]. Если при этом учитываются радиоэкологические параметры и особенности формирования дозовых нагрузок на население и биоту по всем путям облучения, можно говорить о радиоэкологической эквивалентности в системе «сырьё – отходы» [6]. Расчёты на базе указанной концепции позволяют сформулировать практические предложения по переработке отработавшего ядерного топлива перед его окончательным захоронением [11].

При «сопровождении» эксплуатирующихся предприятий ЯТЦ решаются разноплановые задачи, включающие радиоэкологический мониторинг в районах размещения предприятий и обеспечение возможности оценки последствий нештатных и аварийных ситуаций. Системы объектового мониторинга должны базироваться на наблюдениях за содержанием радионуклидов в приземном слое воздуха и контроле атмосферных выпадений. Такая информация позволяет оперативно реагировать на изменение радиационной обстановки и планировать проведение защитных мероприятий в случае аварий.

В систему мониторинга радиационно-опасных объектов должны быть включены агроэкологические показатели [12]. В некоторых ситуациях агропродукция может являться значимым

источником поступления радионуклидов в организм человека и формирования дозы внутреннего облучения. Так, при потреблении продукции, полученной с сельскохозяйственных угодий, орошаемых дождеванием водами водоёма-охладителя АЭС, суммарная доза внутреннего облучения может достигать 100 мкЗв/год [13]. Эта величина превышает квоту облучения населения от жидких сбросов АЭС (50 мкЗв/год) [14]. Основными дозообразующими радионуклидами в рассмотренном случае являлись ^{60}Co и ^{58}Co , критическими видами продукции – молоко и мясо.

При планировании мониторинговых работ, «сопровождающих» эксплуатацию объекта ЯТЦ, целесообразно сформировать оптимальные подходы к его проведению. С одной стороны, результаты мониторинга должны обеспечивать полновесную и достоверную радиоэкологическую оценку рассматриваемого объекта, с другой – при проведении мониторинговых исследований необходимо избежать излишних финансово-материальных затрат.

Общие принципы радиоэкологического мониторинга объекта ЯТЦ

Итоговым показателем, характеризующим воздействие выбросов и сбросов объекта ЯТЦ на население, является дозовая нагрузка. На основе этого показателя может быть рассчитан риск стохастических эффектов. Коэффициенты риска определены в соответствии с общепринятой линейной беспороговой концепцией зависимости риска стохастических эффектов от дозы [15]. Однако при радиоэкологической оценке радиационно-опасного объекта («мониторинг объекта») [16] дозовую нагрузку можно рассматривать в качестве ключевого показателя при наличии установленных нормативных значений. Согласно Санитарным правилам проектирования и эксплуатации атомных станций дозовая квота для проектируемых и строящихся АЭС составляет 100 мкЗв/год [14]. Дозовая квота установлена отдельно для газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов – 50 мкЗв/год. В качестве нижней границы при оптимизации радиационной защиты населения в режиме нормальной эксплуатации АЭС принимается минимально значимая дозовая нагрузка, равная 10 мкЗв/год [14].

Следует отметить, что годовая доза облучения населения, рассчитанная на основе данных по газоаэрозольным выбросам ОДЭК для усреднённых метеоусловий, составляет 3,62 мкЗв [17]. Указанное значение приближается к величине минимальной дозовой квоты. Это обстоятельство демонстрирует необходимость корректной и полной оценки суммарной дозовой нагрузки с учётом всех основных дозообразующих радионуклидов и путей облучения населения.

В Санитарных правилах проектирования и эксплуатации атомных станций [14] годовые допустимые выбросы в атмосферу разработаны для ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{60}Co и суммарного количества РБГ. В документе [18] для установления нормативов по выбросам сформирован перечень из 15 радионуклидов на основе данных, полученных для реакторных установок РБМК-1000, ВВЭР-1000 и БН-800 [19]. Следует отметить, что наборы радионуклидов, вносящих наибольший вклад в суммарную дозовую нагрузку от газоаэрозольных выбросов указанных реакторов, существенно образом различаются. Так, согласно [19], для ВВЭР-1000 в качестве основных вкладчиков выделены: ^{41}Ar (55%), ^{60}Co (21%) и ^{135}Xe (15%), для РБМК-1000 – ^{14}C (45%), ^{88}Kr (26%) и ^{41}Ar (13%), для БН-800 – ^3H (87%). В выбросах европейских АЭС контролируются, в общей сложности, 101 радионуклид, а также – β -, α -активность и ИРГ [20]. Наибольшее число параметров контролируется в Швеции (93), Испании (54), Болгарии (49), Словакии (48).

Как отмечено в [16], значимыми вкладчиками в дозу облучения населения от выбросов БРЕСТ-300 в комплексе с предприятиями ОДЭК будут являться (кроме продуктов деления) ^{14}C ,

^3H , ^{210}Po , изотопы Pu. В то же время, при проведении мониторинговых работ в аграрных экосистемах в зоне воздействия радиационно-опасных объектов основное внимание уделяется изотопам Cs и ^{90}Sr [21, 22]. Таким образом, выделение наиболее значимых радионуклидов и компонентов окружающей среды представляется необходимым этапом при разработке программ мониторинга конкретных ядерно-энергетических объектов.

Решение «задач обоснования» планируемых объектов и систем выполняется на основе расчётов с использованием соответствующих методологических подходов (например, концепция радиоэкологической эквивалентности) и миграционно-дозиметрических моделей. Представляется необходимым в максимальном объёме привлекать расчётные методы и при разработке программ радиоэкологического мониторинга новых ядерно-энергетических объектов. Это позволит оптимизировать выполнение мониторинговых работ и, возможно, уменьшить объём дорогостоящих экспериментальных исследований.

В качестве основных принципов радиоэкологического мониторинга радиационно-опасного объекта в процессе его эксплуатации следует выделить:

- целостность радиоэкологической оценки предприятий ЯТЦ («мониторинг объекта») с использованием в качестве итогового показателя дозовой нагрузки на население;
- комплексность оценки, позволяющая оценить суммарную дозовую нагрузку на население за счёт всех путей облучения и основных дозообразующих радионуклидов;
- оптимальную организацию работ, сочетающую как экспериментальные, так и расчётные методы, с целью разумной экономии средств, расходуемых на проведение мониторинговых исследований;
- обоснование необходимости детализированных оценок на основе анализа результатов, полученных в рамках консервативного подхода;
- учёт конкретных условий при выполнении расчётных оценок, включающих состав поступающих в окружающую среду радионуклидов, метеоусловия, миграционные параметры и т.д.

«Этапный подход» к проведению радиоэкологического мониторинга объекта ЯТЦ

Общая целевая установка радиоэкологического мониторинга ядерно-энергетического объекта – обеспечение достоверной оценки радиационного воздействия на население и компоненты окружающей среды с наименьшими затратами. Достижение этой цели возможно только при сочетанном использовании экспериментальных методов (пробоотбор, пробоподготовка, измерения) и расчётных средств (миграционные и дозиметрические модели).

В ходе первичного радиоэкологического обследования территории, прилегающей к планируемому объекту ЯТЦ, формируется база данных, включающая фоновое содержание природных и техногенных радионуклидов в компонентах экосистем, экологические, метеорологические параметры, особенности рациона питания населения и другие показатели. Эта информация позволяет параметризовать миграционные и дозиметрические модели с учётом региональных условий.

На первом этапе мониторинговых работ целесообразно провести сценарные расчёты дозовой нагрузки на население на основе данных по поступлению радионуклидов в окружающую среду (ОС). Для такой оценки можно использовать программные средства, интегрирующие мо-

дели миграции радионуклидов в компонентах ОС и позволяющие оценить дозовую нагрузку на население по различным путям облучения.

Анализ информации, полученной на этапе расчётных оценок, позволяет получить данные для проведения экспериментальных работ, направленных на консервативную оценку дозовой нагрузки:

- установить местоположение участков с максимальной плотностью радиоактивных выпадений;
- определить компоненты экосистем и радионуклиды, вносящие наибольший вклад в суммарную дозовую нагрузку;
- зафиксировать значения радиоэкологических показателей, обеспечивающих консервативность оценок.

Для идентификации компонентов ОС и радионуклидов, значимых с точки зрения дозообразования, необходимо на основе расчётных данных сформировать ряд парциальных дозовых нагрузок $\{D_k\}$ по убыванию значений D_k . Каждое из этих значений получено для совокупности показателей «компонент ОС – радионуклид». Далее, последовательно суммируем относительные значения парциальных дозовых нагрузок, проверяя на каждом шаге следующее условие:

$$\sum_k \frac{D_k}{D_{sum}} \geq 1 - \delta ,$$

где δ – допустимое отклонение от суммарной дозовой нагрузки D_{sum} .

На следующем этапе проводится экспериментальное определение содержания идентифицированных на предыдущем этапе радионуклидов в компонентах ОС на «критических участках» с использованием методик пробоотбора, пробоподготовки и измерения. Информация, полученная в ходе первичного радиоэкологического обследования зоны наблюдения объекта, позволяет исключить «фоновые» уровни содержания радионуклидов в компонентах ОС.

На основе экспериментальных данных выполняется консервативная оценка суммарной дозовой нагрузки, которую может получить «представительный человек» по всем путям облучения от объекта ЯТЦ. Следует подчеркнуть, что при таком подходе полагается, что все радиоэкологические процессы протекают в одной точке. В результате сопоставления D_{sum} с предельным значением дозовой нагрузки (D_{lim}) принимается решение о необходимости проведения дальнейших мониторинговых исследований. В качестве D_{lim} в рамках мониторинга АЭС следует принять величину дозовой квоты, установленную в Санитарных правилах проектирования и эксплуатации атомных станций [14].

При сопоставимых значениях D_{sum} и D_{lim} целесообразно выполнить оценку вероятности превышения дозового предела на территории зоны наблюдения объекта ЯТЦ. На основе распределения суммарной дозовой нагрузки $p(D)$ можно рассчитать вероятность (риск) R превышения предельного значения D_{lim} [23]. Для анализа результатов статистической оценки необходимо установить допустимый риск превышения дозового предела R_{lim} .

Результаты консервативной и вероятностной оценки являются основой для принятия решений о необходимости проведения детализированных мониторинговых исследований в районе расположения рассматриваемого объекта ЯТЦ. В случае, если суммарная дозовая нагрузка

меньше порогового значения D_{lim} или вероятность превышения D_{lim} не больше заданной величины R_{lim} , экспериментальные исследования при нормальной работе объекта ЯТЦ повторяются по истечении заданного временного интервала, согласно разработанному регламенту. На основе точечной консервативной оценки и дополнительного (в случае необходимости) вероятностного анализа можно сделать вывод о необходимости выполнения детализированных мониторинговых исследований с учётом расположения аграрных и природных экосистем на территории, прилегающей к ядерно-энергетическому объекту, местоположения населённых пунктов и т.д.

При планировании мониторинговых работ целесообразно опираться на статистические закономерности, установленные в результате обработки данных по распределению долгоживущих радионуклидов на территориях, подвергшихся радиоактивным выпадениям, в частности, в пределах зон наблюдения атомных электростанций.

Как отмечено в работе [21], частота значений удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах 5-км и 15-км зон Курской АЭС приближается к логнормальному распределению. Обработка данных для 30-км зоны Курской АЭС (объём выборки 300 значений) показала, что распределение плотности загрязнения ^{137}Cs (A , кБк/м^2) подчиняется логнормальному закону. Для статистического обоснования этого утверждения рассчитано значение критерия согласия Колмогорова-Смирнова, позволяющего оценить соответствие выборки $\ln(A)$ нормальному распределению. Рассчитанное значение этого критерия (0,0773) удовлетворяет критическому значению на уровне значимости 0,01 (1%). Получены величины параметров нормального распределения $N(\mu, \sigma)$ для логарифма плотности загрязнения ^{137}Cs на территории 30-км зоны Курской АЭС. Среднее значение μ и стандартное отклонение σ составили 1,03 и 0,46 соответственно.

Аналогичные оценки проведены для плотности загрязнения почвы ^{137}Cs (A , кБк/м^2) в 30-км зоне Ростовской АЭС (объём выборки 593 значения). Значение параметра σ нормального распределения $N(\mu, \sigma)$ для логарифма плотности загрязнения $\ln(A)$ составило 0,44 при величине μ равной 0,097. Поскольку величины σ для рассмотренных случаев являются близкими, можно предположить устойчивость количественной оценки этого параметра. Однако для подтверждения этого факта требуются дополнительные исследования, направленные на получение представительных выборок данных для регионов расположения других атомных электростанций и различных радионуклидов. Допущение об универсальности логнормального закона распределения радионуклидов по территории зон наблюдения объектов ЯТЦ и предположение об устойчивости количественной оценки дисперсии этого показателя дают возможность восстановить распределение плотности загрязнения A .

При использовании логнормальной модели для решения мониторинговых задач необходимо учитывать, что эта модель характеризует региональный техногенный фон. Данные многолетнего мониторинга свидетельствуют об отсутствии значимого влияния российских АЭС на содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в зонах наблюдения. При радиоэкологической оценке атомных станций и других ядерно-энергетических объектов следует оценить присутствие в пробах радионуклидов «не станционного происхождения», прежде всего для территорий, подвергшихся чернобыльским выпадениям. С этой целью необходимо проанализировать информацию, полученную в ходе первичного фонового обследования.

Заключение

Решение вопросов экологической безопасности – неотъемлемое условие развития ядерной энергетики, особенно при создании и внедрении новых технологий. Такие вопросы возникают как при планировании и обосновании ядерно-энергетических объектов и систем, так и при их эксплуатации. Главной задачей радиоэкологического мониторинга объекта (атомной станции) является подтверждение соответствия суммарной дозовой нагрузки на население, формируемой объектом, установленному значению дозовой квоты.

Дозовая нагрузка должна оцениваться на основе мониторинговых данных с учётом всех основных дозообразующих радионуклидов, поступающих в компоненты ОС при работе объекта ЯТЦ. При недооценке суммарной дозовой нагрузки выводы, касающиеся радиоэкологической безопасности рассматриваемого объекта, будут некорректными. В то же время, необходимо избежать излишних затрат на проведение пробоотбора, пробоподготовки и измерения содержания радионуклидов в компонентах ОС. Выполнение двух указанных условий возможно при использовании расчётных методов при мониторинговых исследованиях.

Расчётные оценки дают возможность спланировать экспериментальные работы, по результатам которых (с учётом «фоновых» данных первичного обследования) определяется консервативное значение суммарной дозы облучения от объекта ЯТЦ. Анализ результатов расчёта даёт возможность принять обоснованное решение о необходимости детализированных мониторинговых работ (и уровня детализации). Такой «этапный подход», сочетающий экспериментальные и расчётные методы, позволяет обеспечить оптимальную радиоэкологическую оценку объекта ЯТЦ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 18-19-00016).

Литература

1. **Рачков В.И., Калякин С.Г.** Инновационная ядерная технология – основа крупномасштабной ядерной энергетики //Известия вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 1. С. 5-15.
2. **Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В., Орлов В.В., Першуков В.А., Рачков В.И., Толстоухов Д.А., Троянов В.М.** Проект «Прорыв» – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики //Известия РАН. Энергетика. 2015. № 1. С. 5-12.
3. **Алексахин Р.М.** Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики //Атомная энергия. 2013. Т. 114, Вып. 5. С. 243-249.
4. **Крышев И.И., Рязанцев Е.П.** Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАт, 2010. 496 с.
5. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014.
6. **Спиридонов С.И.** Перспективы системной радиоэкологии в решении инновационных задач ядерной энергетики //Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 4. С. 415-422.
7. **Спиридонов С.И., Алексахин Р.М., Спирин Е.В.** Интегральные показатели радиационного воздействия объектов открытого и замкнутого топливного цикла на население //Атомная энергия. 2015. Т. 118, Вып. 1. С. 47-54.
8. **Спиридонов С.И., Алексахин Р.М., Спирин Е.В.** Обобщённый подход для сравнительной оценки радиационного воздействия ядерных топливных циклов на биоту //Атомная энергия. 2015. Т. 118, Вып. 6. С. 340-345.
9. **Спиридонов С.И., Микаилова Р.А.** Оценка радиоэкологических рисков для природных экосистем при аварийных выбросах предприятий ядерного топливного цикла //Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 2. С. 197-206.
10. **Адамов Е.О., Ганев И.Х.** Экологически безупречная ядерная энергетика. М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля, 2007. 145 с.
11. **Спиридонов С.И., Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В., Алексахин Р.М., Спирин Е.В.** Анализ биологической опасности для человека продуктов деления и актиноидов на примере отработавшего топлива реактора БРЕСТ-ОД-1200 //Атомная энергия. 2017. Т. 123, Вып. 2. С. 100-103.
12. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Спиридонов С.И., Курбаков Д.Н.** Анализ подходов к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения ядерно и радиационно-опасных объектов. Обзор //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 3. С. 75-95.
13. **Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Алексахин Р.М.** Радиационно-гигиенические аспекты использования воды водоёмов-охладителей АЭС для орошения сельскохозяйственных угодий //Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2004. Т. 49, № 6. С. 27-36.
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. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
16. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Safety Reports Series No. 64. Vienna: IAEA, 2010. 234 p.
17. **Спирин Д.А., Алексахин Р.М.** Структура дозы облучения населения при эксплуатации предприятий опытного демонстрационного энергокомплекса //Атомная энергия. 2018. Т. 124, Вып. 3. С. 169-173.
18. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. Методика МТ 1.2.2.15.1176-2016. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. 76 с.
19. Контроль и анализ данных о выбросе радионуклидов АЭС. Отчёт № 335/11-16. Екатеринбург: АЭБ «Альфа-X91», 2016. 40 с.

20. Екидин А.А., Жуковский М.В., Васянович М.Е. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС //Атомная энергия. 2016. Т. 120, Вып. 2. С. 106-108.
21. Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Сидорова Е.В., Гешель И.В., Андреева Н.В., Санжаров А.И. Результаты радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в районе расположения Курской АЭС //Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. Т. 29, № 1. С. 70-85.
22. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов. Методические указания МУ 13.5.13-00. М.: РАСХН, 2005, 35 с.
23. Иванов В.В., Спиридонов С.И., Микаилова Р.А. Статистики коррелированных радиоактивных загрязнений //Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58, № 3. С. 285-292.

To the question of optimisation of radioecological monitoring in the vicinity of nuclear fuel cycle enterprises

Spiridonov S.I., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Titov I.E.

Russian Research Institute of Radiology and Agroecology (RIRAE), Obninsk

Radioecological problems related to justification of the planned nuclear energy facilities and systems, as well as their "maintenance" during the operation process, are subjects to the analysis. The principles of "object monitoring" were formulated. They include the comprehensive evaluation of the integrated index – the radiation dose considering all pathways of radiation exposure and the optimal organisation of works combining both experimental and computational methods. The paper outlines the "stepwise approach" to radioecological monitoring of the nuclear fuel cycle enterprise. Prior assessment at the first stage (after the initial radioecological survey) allow planning the experimental work focused on conservative assessment of the total dose. On the basis of processed experimental data obtained in the observation zones of NPPs, the law of distribution of density of soil contamination with radionuclides was established. Dispersion values were determined. The results of a point conservative estimation and additional probabilistic analysis allow us to conclude, that to meet the requirements of radioecological protection and safety in the vicinity of nuclear facilities more detail and more cost-based research is necessary.

Keywords: *radioecological monitoring, radioecological tasks of nuclear power engineering, nuclear fuel cycle facility, radionuclides, radiation pathways, radiation dose, dose standard, statistical distribution.*

References

1. Rachkov V.I., Kalyakin S.G. Innovative nuclear power technology – the basis of large-scale nuclear power engineering. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika – University News. Nuclear Energy*, 2014, no. 1, pp. 5-15. (In Russian).
2. Adamov E.O., Aleksakhin R.M., Bol'shov L.A., Dedul' A.V., Orlov V.V., Pershukov V.A., Rachkov V.I., Tolstoukhov D.A., Troyanov V.M. Project "Proryv" – technological basis for large-scale nuclear power engineering. *Izvestiya RAN. Energetika – Proceedings of the RAS. Power Engineering*, 2015, no. 1, pp. 5-12. (In Russian).
3. Aleksakhin R.M. Topical environmental problems of nuclear power. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2013, vol. 114, no. 5, pp. 243-249. (In Russian).
4. Kryshev I.I., Ryazantsev E.P. Environmental safety of Russian nuclear power complex. Moscow, Izdat, 2010. 496 p. (In Russian).
5. *Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards*. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014.

Spiridonov S.I.* – Chief Researcher, D. Sc., Biol., Prof.; **Kuznetsov V.K.** – Chief Researcher, D. Sc., Biol.; **Panov A.V.** – Deputy Director, D. Sc., Biol., Prof. RAS; **Titov I.E.** – Researcher. RIRAE.

*Contacts: 109 km, Kievskoe Sh., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249032. Tel.: +7(484) 399-69-67; e-mail: spiridonov.si@gmail.com.

6. **Spiridonov S.I.** Prospects of systemic radioecology to solve innovative tasks of nuclear power engineering. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2014, vol. 54, no. 4, pp. 415-422. (In Russian).
7. **Spiridonov S.I., Alexakhin R.M., Spirin E.V.** Integral indicators of radiological impact of the open and closed nuclear fuel cycle facilities to the population. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2015, vol. 118, no. 1, pp. 47-54. (In Russian).
8. **Spiridonov S.I., Alexakhin R.M., Spirin E.V.** General approach to comparative assessment of radiation impact of nuclear fuel cycles to biota. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2015, vol. 118, no. 6, pp. 340-345. (In Russian).
9. **Spiridonov S.I., Mikailova R.A.** Radioecological risk assessment for ecosystems at accidental releases from nuclear facilities. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 197-206. (In Russian).
10. **Adamov E.O., Ganev I.Kh.** Ecologically perfect nuclear power industry. Moscow, NIKIET im. N. A. Dollezhal, 2007. 145 p. (In Russian).
11. **Spiridonov S.I., Perevolotskiy A.N., Perevolotskaya T.V., Aleksakhin R.M., Spirin E.V.** Analysis of the human biohazard of long-lived fission products and actinides for BREST-OD-1200 spent fuel. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2017, vol. 123, no. 2, pp. 100-103. (In Russian).
12. **Panov A.V., Sanzharova N.I., Kuznetsov V.K., Spiridonov S.I., Kurbakov D.N.** Analysis of radioecological monitoring approaches in the vicinity of nuclear and radiation hazardous facilities: a review. *Radiatsiya i Risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 75-95. (In Russian).
13. **Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I., Aleksakhin R.M.** Radiation-hygienic aspects of the use of waters of cooling pond NPP for irrigating the agricultural land. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' – Medical Radiology and Radiation Safety*, 2004, vol. 49, no. 6, pp. 27-36. (In Russian).
14. Sanitary rules of design and operation of nuclear power plants (SP AS-03). Sanitary rules and hygiene standards SP 2.6.1.24-03. Moscow, Russian Ministry of Health, 2003. 41 p. (In Russian).
15. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary epidemiological rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal Centre of Hygiene and Epidemiology Rospotrebnadzora, 2009, 100 p. (In Russian).
16. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Safety Reports Series No. 64. Vienna, IAEA, 2010. 232 p.
17. **Spirin D.A., Aleksakhin R.M.** Structure of the public irradiation dose during operation of experimental-demonstration power complex enterprises. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2018, vol. 124, no. 3, pp. 169-173. (In Russian).
18. Development and establishment of standards for maximum permissible emissions of radioactive substances into the atmosphere from nuclear plants. MT 1.2.2.15.1176-2016. Moscow, Rosenergoatom JSC, 2016. 76 p. (In Russian).
19. Monitoring and analysis of data on the radionuclides release from nuclear power plants. Report No. 335/11-16. Ekaterinburg, AEB "Alpha-X91", 2016. 40 p. (In Russian).
20. **Ekin A.A., Zhukovskiy M.V., Vasyanovich M.E.** Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2016, vol. 120, no. 2, pp. 106-108. (In Russian).
21. **Kuznetsov V.K., Isamov N.N., Sidorova E.V., Geshel' I.V., Andreeva N.V., Sanzharov A.I.** The results of radioecological monitoring of agroecosystems situated in the vicinity of Kursk NPP. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem – Problems of Ecological Monitoring and Modeling of Ecosystems*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 70-85. (In Russian).
22. Organization of state radioecological monitoring of agroecosystems in the zone of influence to radiation hazardous objects. MU 13.5.13-00. Moscow, Publisher of the RAAS, 2000. 35 p. (In Russian).
23. **Ivanov V.V., Spiridonov S.I., Mikailova R.A.** Statistics of correlated radioactive contaminations. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2018, vol. 58, no. 3, pp. 285-292. (In Russian).