DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-3-112-123

УДК 621.039:502

Неопределённости в оценке радиационного воздействия на биоту в районах расположения объектов использования атомной энергии

Спиридонов С.И., Нуштаева В.Э.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии, Обнинск

Проанализированы результаты расчёта дозовых нагрузок на референтные организмы биоты от атмосферных выбросов реакторных установок различных типов (ВВЭР-1200, БН-600, БН-800, ИВВ-2М). Мощность дозы облучения наземных референтных организмов (аннелиды, насекомые, крупные и мелкие млекопитающие, травы и хвойные деревья) варьирует в диапазоне от 0,01 до 0,2 мкГр/сут. Показано, что вклад АЭС с реакторами нового поколения ВВЭР-1200 в облучение наземной биоты не превышает 1% от суммарной дозовой нагрузки. Отмечено, что для корректного сопоставления с установленными в настоящее время предельными мощностями доз для биоты следует оценивать суммарную дозовую нагрузку с учётом всех составляющих радиационного фона. Выполнен анализ чувствительности итогового показателя радиационного воздействия на биоту к варибельности оценённых суммарных дозовых нагрузок и предельных мощностей доз. Индекс чувствительности для мощностей доз облучения референтных организмов не превысил значения 0,1. Значение этого показателя для предельных дозовых нагрузок составило 0,9. Установлено, что основным источником неопределённости оценки радиационного воздействия на биоту в ситуациях планового облучения является неопределённость предельных дозовых нагрузок. Сделан акцент на необходимости установления «аварийных» дозовых критериев для биоты с целью обеспечения возможности полновесного радиозэкологического обоснования ядерно-энергетических объектов с учётом постулируемых аварий.

Ключевые слова: биота, атомные электростанции, реакторные установки, мощность дозы, радиационные эффекты, индекс радиационного воздействия, референтные дозовые нагрузки, варибельность, анализ чувствительности, радиозэкологические риски.

Введение

Экологическая приемлемость ядерной энергетики – обязательное условие её развития наряду с экономической конкурентоспособностью, полным использованием сырьевого потенциала, поддержкой режима нераспространения радиоактивных материалов. Атомные электростанции и другие предприятия ядерного топливного цикла оказывают многофакторное воздействие на окружающую среду. В то же время, общественность и сторонники альтернативных энерготехнологий уделяют повышенное внимание радиационному фактору, специфичному для ядерного энергопроизводства. В этой связи следует подчеркнуть значимость радиозэкологической оценки территорий, прилегающих к атомным электростанциям и другим объектам ядерного топливного цикла.

Научные основы радиационной защиты изначально базировались на постулате: если радиационными стандартами защищён человек, то защищена и окружающая среда. Основной предпосылкой корректности этого принципа является то, что человек относится к самым радиочувствительным живым организмам в биосфере. Кроме того, радиационно-гигиенические стандарты, определяющие ограничение радиационного воздействия, предусматривают многократные коэффициенты запаса допустимой дозы облучения человека [1].

В настоящее время всё большее развитие получают эоцентрические взгляды, согласно которым следует уделять внимание радиационной защите не только человека, но и биоты [2, 3].

Спиридонов С.И.* – гл. науч. сотр., д.б.н., проф.; Нуштаева В.Э. – науч. сотр. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

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

Необходимость подтверждать, а не исходить из предположения о защищённости окружающей среды декларируется в документах МАГАТЭ, МКРЗ и других международных организаций [4-6]. Целевая установка, сформулированная в этих документах, – предотвращение или снижение частоты проявления нежелательных радиационных эффектов у флоры и фауны до уровня, при котором поддерживается биологическое разнообразие, сохраняются виды, сообщества и экосистемы. Таким образом, радиационная защита биоты направлена на сохранение популяций и видов, входящих в состав экосистем, а не отдельных живых организмов.

В Федеральном законе Российской Федерации «Об охране окружающей среды» № 7-ФЗ от 10.01.2002 г. (с изменениями, вступившими в силу 01.01.2013 г.) обосновывается необходимость обеспечения устойчивого функционирования экологических систем при проектировании объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Нормы радиационной защиты человека не гарантируют абсолютной защиты объектов природной среды, поскольку в некоторых радиоэкологических ситуациях отдельные представители биоты могут подвергаться большему, чем человек, радиационному воздействию [1, 2, 7].

Неотъемлемым элементом радиоэкологического обоснования атомных станций и других ОИАЭ при их планировании и строительстве является оценка радиационного воздействия на биоту. Такая оценка выполняется и в процессе функционирования этих объектов на основе данных по фактическим выбросам радионуклидов, определяемых в ходе мониторинга источника.

Для расчёта доз облучения представителей биоты разработаны эффективные «инструменты» – программные средства, интегрирующие миграционно-дозиметрические модели [8, 9]. Итоговые показатели радиационного воздействия на биоту определяются в результате сопоставления рассчитанных доз с референтными значениями дозовых нагрузок [5, 6].

Цель работы, результаты которой представлены в настоящей статье, – анализ влияния вариабельности дозовых нагрузок и установленных в настоящее время предельных мощностей доз [5, 6] на результат количественной оценки радиационного воздействия на биоту в районах расположения ОИАЭ с различными реакторными установками.

Методические аспекты

Для характеристики воздействия радиационного фактора на сообщества живых организмов, находящихся на радиоактивно загрязнённых территориях, рассчитываются радиоэкологические показатели, различающиеся уровнем детализации оценок.

При наличии данных, позволяющих восстановить распределение дозовой нагрузки на сообщество живых организмов, можно оценить радиоэкологический риск – вероятность превышения предельной (пороговой) дозовой нагрузки. Этот показатель применялся при оценке последствий для биоты в результате постулируемых аварийных и существующих (согласно классификации МАГАТЭ) ситуаций [10, 11].

Для плановых радиоэкологических ситуаций с низкими уровнями загрязнения представляется достаточным подход, который можно определить как детерминистский. В этом случае рассчитывается индекс радиационного воздействия (RIF) как отношение «точечного» значения дозовой нагрузки к пороговому значению [7]. При расчётах целесообразно выполнять консервативную оценку RIF на основе максимальной дозовой нагрузки. Такую оценку можно рассматривать в ряде ситуаций как скрининговую, с последующей идентификацией распределений дозовых нагрузок и расчётом вероятностей превышения предельных дозовых нагрузок.

Таким образом, базовые показатели, необходимые для оценки индексов радиационного воздействия на биоту (в общем случае, радиоэкологических рисков), – предельные дозовые нагрузки. Существующие в настоящее время представления об этих показателях изложены в публикациях МКРЗ [5, 6], носящих рекомендательный характер.

В документах [5, 6] представлены результаты обобщения накопленных к настоящему времени эмпирических данных, характеризующих зависимости «доза-эффект» для совокупности референтных организмов биоты. Референтные организмы представляют собой «гипотетические объекты, имеющие базовые характеристики определённого типа животного или растения, описанные согласно таксономическому уровню семейства, с заданными анатомическими, физиологическими и поведенческими характеристиками». Эти объекты используются «в целях установления связи между облучением и дозой, а также дозой и эффектами для данного типа живого организма».

В указанных выше документах определены диапазоны дозовых нагрузок, в пределах которых существует вероятность проявления негативных радиационных эффектов у референтных организмов. К источникам неопределённости этих данных можно отнести, прежде всего, различную радиоустойчивость отдельных особей в составе сообществ живых организмов, а также влияние факторов нерадиационной природы.

Результаты и обсуждение

Дозовые нагрузки на наземную биоту. В работах [12, 13] представлены результаты расчётов доз облучения совокупности наземных референтных организмов от атмосферных выбросов реакторных установок различных типов: водо-водяного реактора на тепловых нейтронах ВВЭР-1200, реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем БН-600 и БН-800, а также исследовательского реактора бассейнового типа ИВВ-2М, расположенного на территории Института реакторных материалов (ИРМ).

В рамках консервативной оценки определены максимальные суммарные мощности дозы с учётом всех путей облучения рассматриваемых организмов. Расчёты выполнялись на основе программного средства Erica Assessment Tool (версия 1.3), позволяющего оценить дозу внешнего облучения от радионуклидов в почве и дозу внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов [8]. Дозовые нагрузки от радиоактивного облака рассчитывались с использованием коэффициентов дозового преобразования для радиоактивных благородных газов [12, 13].

Вариабельность дозовых нагрузок для каждого представителя биоты, превышающая в некоторых случаях математический порядок, представляется существенной (рис. 1). Основным условием выполнения полновесных оценок доз облучения биоты (как и населения) является наличие исходных данных, учитывающих все основные дозообразующие радионуклиды [14]. Для территории, прилегающей к АЭС с ВВЭР-1200, подавляющий вклад в облучение наземных референтных организмов вносят ^{14}C и ^3H , а в регионе расположения АЭС с БН-600 и БН-800 основным вкладчиком, формирующим более 95% суммарной дозы, является ^3H [12, 13].

Следует отметить, что для биоты не установлены нормативы на дозовую нагрузку от радионуклидов «станционного происхождения», аналогичные квотам на облучение населения [15]. В этой связи целесообразно рассматривать «станционную дозу» как компонент суммарной дозы от всех источников облучения.

Рис. 1. Дозовые нагрузки на референтные организмы биоты от атмосферных выбросов различных реакторных установок.

1 – аннелиды; 2 – насекомые; 3 – мелкие млекопитающие; 4 – крупные млекопитающие; 5 – травы; 6 – хвойные деревья.

На основе данных фоновой радиоэкологической обсервации территории расположения планируемой Балтийской АЭС с ВВЭР-1200 рассчитаны дозовые нагрузки на референтную наземную биоту от естественных и техногенных радионуклидов [13]. Величина годовой дозы от космического излучения взята из монографии [16]. Сравнительный анализ дозовых нагрузок, формируемых различными источниками, показал, что вклад АЭС в облучение представительных организмов меньше 1% от суммарного радиационного воздействия (рис. 2).

На основе выполненных оценок можно сделать вывод о том, что вариабельность дозовой нагрузки от радионуклидов в составе атмосферных выбросов АЭС (рис. 1) не окажет существенного влияния на величину суммарной дозы облучения референтных организмов биоты. Поскольку для расчёта количественных показателей радиационного воздействия на представителей биоты в районах расположения ОИАЭ необходимо сопоставить дозовую нагрузку с предельным значением, важным вопросом является определение этого понятия и его количественная оценка.

Рис. 2. Вклады различных источников в суммарную дозовую нагрузку на референтный организм биоты (мелкие млекопитающие) для территории, прилегающей к АЭС с двумя реакторами ВВЭР-1200.

Неопределённость предельных дозовых нагрузок. В течение последних десятилетий рядом международных организаций предлагались пределы допустимого облучения представителей биоты, носящие рекомендательный характер [17-19]. Пределы варьируют для отдельных живых организмов в широких диапазонах, превышающих математический порядок величины, что обусловлено различием подходов к их обоснованию. Так, этот показатель для растений, установленный НКДАР ООН, в 1996 г. составил 400, а в 2008 г. – 100 мкГр/ч [17, 18]. В то же время, согласно данным проекта ERICA, выполняемого под эгидой ЕС, в качестве предельного уровня облучения организмов всех видов, в том числе и растений, рекомендовано использовать 10 мкГр/ч [9].

В последних публикациях МКРЗ, касающихся рассматриваемой проблематики [5, 6], обобщена накопленная к моменту подготовки документов экспериментальная информация по зависимостям «доза-эффект». Для каждого референтного организма данные сгруппированы в рамках диапазонов мощностей доз хронического облучения. Следует подчеркнуть, что эти данные включают дозовую нагрузку от радиационного фона, поскольку при изучении радиационных эффектов исключить «фоновое» облучение живых организмов не представляется возможным.

Систематизированная экспериментальная информация была использована для установления крайних диапазонов мощностей доз облучения, в пределах которых существует вероятность негативных эффектов у отдельных особей в составе общностей «референтные организмы биоты» (DRCL – Derived Consideration Reference Levels). Анализ значений DRCL и исходных данных «доза-эффект» для наземных организмов (табл. 1) позволяет обратить внимание на специфические особенности этого показателя.

Таблица 1

Характеристика крайних (предельных) диапазонов мощностей доз хронического облучения и значений DRCL для наземных референтных организмов

Референтный организм	Предельные диапазоны согласно эмпирическим данным [5, 6])		Характеристика DRCL [6]	
	Мощность дозы, мГр/сут	Эффекты	DRCL, мГр/сут	Соответствующие эффекты
Аннелиды	10-100	Чрезвычайно низкая вероятность эффектов	10-100	Чрезвычайно низкая вероятность эффектов
Насекомые	100-1000	Возможное уменьшение репродуктивной способности и смертность в стадии куколки	10-100	Информация отсутствует
Мелкие млекопитающие	0,1-1	Очень низкая вероятность эффектов	0,1-1	Очень низкая вероятность эффектов
Крупные млекопитающие	0,1-1	Очень низкая вероятность эффектов	0,1-1	Очень низкая вероятность эффектов
Травянистые растения	10-100	Уменьшение репродуктивной способности	1-10	Информация отсутствует
Древесные (хвойные) растения	1-10	Анатомические и морфологические нарушения; уменьшение репродуктивной способности при длительном облучении	0,1-1	Информация отсутствует

Во-первых, поскольку DRCL установлены на основе суммарных дозовых нагрузок, для сопоставления с DRCL необходимо оценивать также суммарные дозы, формируемые не только ОИАЭ, но и радиационным фоном (естественным и техногенным) в регионе расположения объекта.

Во-вторых, DRCL для некоторых референтных организмов (древесные и травянистые растения, насекомые) смещены с крайних диапазонов фактических данных на дозовые интервалы, для которых информация по эффектам отсутствует. Такая корректировка, причина которой – недостаток эмпирических данных, выполнена, очевидно, на основе общих представлений о

радиочувствительности различных референтных растений и животных. Например, для древесных растений крайний (предельный) диапазон, согласно экспериментальным данным, составляет 1-10 мГр/сут, а референтный уровень DRCL установлен в пределах от 0,1 до 1 мГр/сут.

В-третьих, анализируя понятие DRCL, следует отметить, что общность «референтный организм» включает отдельные живые организмы определённого типа, устойчивость которых к воздействию радиационного фактора существенным образом варьирует. По этой причине каждый дозовый диапазон, представляющий DRCL, можно определить как «интервал неопределённости». Любое значение мощности дозы облучения в указанных пределах можно считать предельным с некоторой вероятностью.

Анализ чувствительности. С целью оценки влияния на итоговый показатель *RIF* variability доз облучения представительных организмов биоты от реакторных установок различного типа и неопределённости предельных дозовых нагрузок (DRCL) выполнен анализ чувствительности. Рассчитан индекс чувствительности (*SI*) [20], представляющий разницу между значениями *RIF* при максимальном (P_{max}) и минимальном (P_{min}) значениях каждого входного показателя (рассчитанные и предельные дозовые нагрузки):

$$SI = \frac{|RIF_{P_{max}} - RIF_{P_{min}}|}{RIF_{P_{max}}}$$

Расчёты *SI* выполнены для двух вариантов данных по дозам облучения референтных организмов биоты. В первом варианте учитывали дозовые нагрузки только от радионуклидов в составе атмосферных выбросов реакторных установок (рис. 3). Расчёты в рамках второго варианта проводились с учётом суммарных дозовых нагрузок, включающих облучение от естественного фона и техногенных радионуклидов «не станционного происхождения» (рис. 4).

Рис. 3. Индекс чувствительности *RIF* к вариабельности дозовых нагрузок на биоту (1-6), оценённых по данным выбросов реакторных установок, и к неопределённости DRCL (7).

1 – аннелиды, 2 – насекомые, 3 – мелкие млекопитающие, 4 – крупные млекопитающие, 5 – травы, 6 – хвойные деревья.

В первом варианте расчётов (рис. 3) неопределённость оценки *RIF* зависит практически в равной степени от вариабельности дозовых нагрузок и значений DRCL. Индекс чувствительности *RIF* к мощности доз облучения варьирует в диапазоне 0,92-0,98, а значение этого индекса для DRCL составляет 0,9. Следует подчеркнуть, что оценка показателя, характеризующего радиационное воздействие на биоту на основе дозовых нагрузок, формируемых только ОИАЭ, является некорректной. Как отмечено выше, DRCL устанавливались на основе данных

по радиационным эффектам у биотических компонентов природных экосистем с учётом облучения от радиационного фона.

Рис. 4. Индекс чувствительности RIF к вариабельности суммарных дозовых нагрузок на биоту (1-6), оценённых с учётом фонового облучения, и к неопределённости DRCL (7).
1 – аннелиды, 2 – насекомые, 3 – мелкие млекопитающие, 4 – крупные млекопитающие, 5 – травы, 6 – хвойные деревья.

Чувствительность RIF к вариабельности суммарных дозовых нагрузок, рассчитанных с учётом фонового облучения, не превышает для всех рассматриваемых представителей наземной биоты значения 0,1 (рис. 4). Это означает, что основным источником неопределённости результатов оценки радиационного воздействия на биоту в районах расположения ОИАЭ являются рекомендованные в настоящее время предельные значения мощности дозы. Таким образом, уменьшением неопределённости этих показателей можно достичь снижения неопределённости итогового показателя RIF.

При идентификации предельных мощностей доз облучения представителей биоты целесообразно проанализировать накопленную информацию по радиационным эффектам на различных уровнях [21]. Привлечение дополнительных данных позволит снизить «субъективную неопределённость» в оценке референтных мощностей доз, необходимых для количественной оценки индексов радиационного воздействия или радиоэкологических рисков для природных сообществ. В то же время, нельзя избежать «объективной вариабельности» этого показателя, обусловленной различной радиоустойчивостью входящих в сообщество организмов.

Предельная дозовая нагрузка, как случайная величина, может быть описана вероятностным распределением при наличии необходимой информации [22]. Следует отметить, что для практических расчётов используется, как правило, детерминистский подход, в рамках которого задаются «точечные» значения предельных дозовых нагрузок. Такой подход, в силу его простоты, представляется рациональным при анализе плановых радиоэкологических ситуаций.

Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать ряд выводов, касающихся оценки воздействия радиационного фактора на биоту в рамках радиоэкологического обоснования работы атомных станций и других ядерно-энергетических объектов.

Для корректного сопоставления с установленными диапазонами предельных мощностей доз (DRCL) необходимо оценивать суммарную дозовую нагрузку на референтные организмы биоты с учётом воздействия как рассматриваемого объекта, так и естественного фона, а также техногенных радионуклидов не «станционного» происхождения.

Основным источником неопределённости рассчитанных индексов радиационного воздействия на референтную биоту в районах расположения ОИАЭ является неопределённость установленных в настоящее время предельных дозовых нагрузок. Вариабельность доз облучения сообществ живых организмов от различных реакторных установок влияет на величину RIF в гораздо меньшей степени. Таким образом, для практических оценок плановых ситуаций вопросы, касающиеся предельных дозовых нагрузок, имеют первостепенное значение.

Для снижения высокой неопределённости этого показателя (табл. 1), целесообразно проведение дальнейших исследований действия радиационного фактора на представителей биоты. Следует подчеркнуть, что вследствие различной радиорезистентности входящих в природные сообщества организмов нельзя избежать «объективной вариабельности» дозовых нагрузок, формирующих радиационные эффекты. Это относится и к значениям предельных мощностей доз.

В рамках радиоэкологического обоснования ядерно-энергетических объектов необходимо выполнять оценку не только плановых, но и аварийных ситуаций (постулируемые проектные и запроектные аварии). В этой связи при расчётах, касающихся биоты, важно акцентировать внимание на двух аспектах («вероятностном» и «временном»).

Диапазоны мощностей доз хронического облучения, представленные в документах [5, 6], нельзя использовать при оценке последствий острого облучения природных сообществ. Для расчёта радиоэкологических рисков в этих случаях необходимы дозовые критерии, установленные на основе данных по острому облучению. При обосновании этих критериев можно опираться на вероятностные представления, поскольку в составе сообществ присутствуют организмы с различной радиоустойчивостью. Подход, в рамках которого рассматриваются распределения не только оценённых дозовых нагрузок, но и их предельных значений, является «информационно затратным» и нацеленным на выполнение наиболее детализированной оценки [22].

Сложность установления дозовых критериев для аварийных ситуаций связана также с тем, что острое облучение сменяется хроническим радиационным воздействием [23]. Можно говорить о наложении «острых и хронических» радиационных эффектов для представителей биоты с длительным временем жизни (например, древесные растения). Кроме того, при оценках на длительный период необходимо учитывать вторичные экологические эффекты, обусловленные поражением наиболее радиочувствительных биологических видов и рассогласованием связей между компонентами экосистемы [24, 25]. Вторичные эффекты выражаются в изменении влияния экологических факторов на функционирование природных сообществ, в том числе на их способность к восстановлению после радиационного воздействия.

Литература

1. **Алексахин Р.М.** Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики //Атомная энергия. 2013. Т. 114, вып. 5. С. 243-249.
2. **Алексахин Р.М., Фесенко С.В.** Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и эко-центрический принципы //Радиац. биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 1. С. 93-103.
3. **Pentreath R.J.** Ethics, genetics and dynamics: an emerging systematic approach to radiation protection of the environment //J. Environ. Radioact. 2004. V. 74, N 1-3. P. 19-30.
4. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
5. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. P. 1-251.
6. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situation. ICRP Publication 124 //Ann. ICRP. 2014. V. 43, N 1. P. 1-58.
7. **Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I., Spirin E.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strand P.** Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant //J. Environ. Radioact. 2005. V. 80, N 1. P. 1-25.
8. **Brown J., Alfonso B., Avila R., Beresford N., Copplestone D., Pröhl G., Ulanovsky A.** The ERICA tool //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99, N 1. P. 1371-1383.
9. **Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В., Спиридонов С.И.** Программное средство для оценки доз облучения референтных организмов при хронических радиоактивных выпадениях //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 3. С. 75-89.
10. **Спиридонов С.И., Микаилова Р.А.** Сравнительная радиоэкологическая оценка сценариев тяжёлых аварий на АЭС на основе риска для природного сообщества //Атомная энергия. 2018. Т. 125, вып. 3. С. 175-180.
11. **Spiridonov S.I., Tetenkin V.L., Mukusheva M.K., Epifanova I.E.** Regulatory radiation risks for the population and natural objects within the Semipalatinsk Test Site //Radioprotection. 2009. V. 44, N 5. P. 251-257.
12. **Нуштаева В.Э., Микаилова Р.А., Спиридонов С.И., Карпенко Е.И., Нуштаев С.Н., Кречетников В.В.** Оценка и прогнозирование воздействия атмосферных выбросов Белоярской АЭС на референтные организмы биоты //АгроЭкоИнфо. 2019. № 3. С. 1-9.
13. **Нуштаева В.Э., Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Карпенко Е.И., Нуштаев С.Н., Ныгыманова А.С.** Оценка дозы облучения представительных организмов биоты в районе размещения АЭС с ВВЭР-1200 //Атомная энергия. 2020. Т. 128, № 4. С. 232-238.
14. **Спиридонов С.И., Кузнецов В.К., Панов А.В., Титов И.К.** К вопросу об оптимизации радиоэкологического мониторинга в регионах размещения предприятий ядерного топливного цикла //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 4. С. 44-53.
15. СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ Г.Г. Онищенко от 28.04.2003 г. № 69). М.: Минздрав России, 2003. 36 с.
16. **Крышев И.И., Рязанцев Е.П.** Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2010. 496 с.
17. Effects of ionizing radiation on the environment. Annex to Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. New York: United Nations, 1996. 86 p.
18. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York: United Nations, 2011. 313 p.
19. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., Copplestone D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B., Howe P., Oughton D., Wells C., Whitehouse P.** Deliverable 5: Numerical Benchmarks for

- Protecting Biota from Radiation in the Environment: Proposed Levels, Underlying Reasoning and Recommendations. Report for the PROTECT Project. EC Contract Number: 036425 (FI6R). Lancaster: Centre for Ecology & Hydrology-Lancaster, 2008.
20. **Спиридонов С.И., Карпенко Е.И., Шарпан Л.А.** Ранжирование радионуклидов и путей облучения по вкладу в дозовую нагрузку на население, формирующуюся в результате атмосферных выбросов атомных электростанций //Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т. 53, № 4. С. 401-410.
  21. **Geras'kin S.A.** Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation //J. Environ. Radioact. 2016. V. 162-163. P. 347-357.
  22. **Спиридонов С.И., Тетенькин В.Л., Соломатин В.М., Карпенко Е.И.** Оценка последствий радиоактивного загрязнения наземных экосистем на основе концепции радиоэкологических рисков. Проблемы радиологии и агроэкологии: докл. научно-практ. конф., посвященной 40-летию основания ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, Обнинск, 5-6 сентября 2011 г. /под ред. Р.М. Алексахина. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2012. С. 90-97.
  23. **Микаилова Р.А., Спиридонов С.И.** Доза облучения древесного яруса хвойного леса, обусловленная аварийным выбросом АЭС //Атомная энергия. 2017. Т. 123, вып. 3. С. 165-170.
  24. **Alexakhin R.M., Karaban R.T., Prister B.S., Spirin D.A., Romanov G.N., Mishenkov N.N., Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Fyodorov Ye.A., Tikhomirov F.A.** The effects of acute irradiation on a forest biogeocenosis: experimental data, model and practical application for accidental cases //J. Sci. Total Environ. 1994. V. 157. P. 357-369.
  25. **Спиридонов С.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спирин Д.А.** Математическое моделирование последствий острого лучевого воздействия на древесный ярус лесного биогеоценоза //Радиобиология. 1989. Т. 29, вып. 4. С. 544-549.

Uncertainties in the assessment of the radiation impact on biota in the vicinity of nuclear facilities

Spiridonov S.I., Nushtaeva V.E.

Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

Evaluation of radiation impact on biota inhabiting near nuclear facilities of radioactive release to atmosphere from reactors of different types (WWER-1200, BN-600, BN-800, UVV-2M) is considered in the paper. Radiation dose rates to reference groups of terrestrial biota species (annelids, insects, large and small mammals, grasses and conifers) vary from 0.01 to 0.2 $\mu\text{Gy/day}$. The impact of the NPP using up-to-date reactor WWER-1200 is shown to be not exceeding 1% of the total radiation impact. To compare correctly radiation impacts on the biota species from radioactive release and from exposure to established radiation dose rate limits, it is necessary to take into account contribution of all constituents of radiation background. Impacts on biota species from the total exposure to radioactive release or the exposure to established radiation dose rate limits were evaluated. Estimated radiation impact from exposure to the radioactive release did not exceed 0.1; the impact from the established dose rate limits was 0.9. Obtained information allows making the following conclusion: uncertainty of quantitative evaluation of radiation impact on biota in planned radiation situations is mainly caused by uncertainty of established dose rate limits. There is a need to establish dose criteria for emergency, it will allow creating "weighty" radioecologic justification of "nuclear power plants with account for potential emergency conditions.

Key words: *biota, nuclear power plants, reactor facilities, dose rate, radiation effects, radiation impact factor, derived consideration reference levels, variability, sensitivity analysis, radioecological risks.*

Spiridonov S.I.* – Chief Scientist, D. Sc., Biol., Prof.; **Nushtaeva V.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.

References

1. **Aleksakhin R.M.** Topical environmental problems of nuclear power. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2013, vol. 114, no. 5, pp. 243-249. (In Russian).
2. **Aleksakhin R.M., Fesenko S.V.** Radiation protection of the environment: anthropocentric and ecocentric principles. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2004, vol. 44, no. 1, pp. 93-103. (In Russian).
3. **Pentreath R.J.** Ethics, genetics and dynamics: an emerging systematic approach to radiation protection of the environment. *J. Environ. Radioact.*, 2004, vol. 74, no. 1-3, pp. 19-30.
4. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. 436 p.
5. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use for reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, pp. 1-251.
6. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situation. ICRP Publication 124. *Ann. ICRP*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 1-58.
7. **Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I., Spirin E.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strand P.** Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *J. Environ. Radioact.*, 2005, vol. 80, no. 1, pp. 1-25.
8. **Brown J., Alfonso B., Avila R., Beresford N., Copplestone D., Pröhl G., Ulanovsky A.** The ERICA tool. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 1371-1383.
9. **Perevolotskiy A.N., Perevolotskaya T.V., Spiridonov S.I.** A software tool for assessing the radiation doses to reference organisms in chronic radioactive fallout. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 75-89. (In Russian).
10. **Spiridonov S.I., Mikailova R.A.** Comparative radioecological assessment of serious-accident scenarios in NPP on the basis of the risk for natural communities. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2018, vol. 125, no. 3, pp. 198-203. (In Russian).
11. **Spiridonov S.I., Tetenkin V.L., Mukusheva M.K., Epifanova I.E.** Regulatory radiation risks for the population and natural objects within the Semipalatinsk Test Site. *Radioprotection*, 2009, vol. 44, no. 5, pp. 251-257.
12. **Nushtaeva V.E., Mikailova R.A., Spiridonov S.I., Karpenko E.I., Nushtaev S.N., Krechetnikov V.V.** Assessment and prediction of the impact of atmospheric emissions from the Beloyarsk NPP to reference organisms of biota. *AgroEkoInfo – AgroEcolInfo*, 2019, no. 3, pp. 1-9. (In Russian).
13. **Nushtaeva V.E., Spiridonov S.I., Mikailova R.A., Karpenko E.I., Nushtaev S.N., Nygymanova A.S.** Radiation Dose Assessment for Representative Biota Organisms in the Locale of NPP with VVER-1200. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2020, vol. 128, no. 4, pp. 232-238. (In Russian).
14. **Spiridonov S.I., Kuznetsov V.K., Panov A.V., Titov I.K.** To the question about optimisation of radioecological monitoring in the vicinity of nuclear fuel cycle enterprises. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 4, pp. 44-53. (In Russian).
15. SanPin 2.6.1.24-03. Sanitary rules for the design and operation of nuclear power plants (SP AS-03) (approved by the decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation G.G. Onishchenko dated April 28, 2003, No. 69). Moscow, Ministry of Health of Russia, 2003. 36 p. (In Russian).
16. **Kryshev I.I., Ryazantsev E.P.** Environmental safety of Russian nuclear power complex. Moscow, IzdAt Publ., 2010. 496 p. (In Russian).
17. Effects of ionizing radiation on the environment. Annex to Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. New York, United Nations, 1996. 86 p.
18. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York, United Nations, 2011. 313 p.

19. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., Copplestone, D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B; Howe P., Oughton D., Wells C., Whitehouse P.** Deliverable 5: Numerical Benchmarks for Protecting Biota from Radiation in the Environment: Proposed Levels, Underlying Reasoning and Recommendations. Report for the PROTECT Project. EC Contract Number: 036425 (FI6R)., Lancaster, Centre for Ecology & Hydrology-Lancaster, 2008.
20. **Spiridonov S.I., Karpenko E.I., Sharpan L.A.** Ranking of radionuclides and pathways according to their contribution to the dose burden to the population resulting from NPP releases. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2013, vol. 53, no. 4, pp. 401-410. (In Russian).
21. **Geras'kin S.A.** Ecological effects of exposure to enhanced levels of ionizing radiation. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 162-163, pp. 347-357.
22. **Spiridonov S.I., Teten'kin V.L., Solomatin V.M., Karpenko E.I.** Assessment of the consequences of radioactive contamination of terrestrial ecosystems based on the concept of radioecological risks. Problems of radiology and agroecology: Reports of the scientific-practical conference dedicated to the 40th anniversary of the foundation of the RIARAE Russian Agricultural Academy, Obninsk, September 5-6, 2011. Ed.: R.M. Aleksakhin. Obninsk, RIARAE, 2012, pp. 90-97. (In Russian).
23. **Mikhailova R.A., Spiridonov S.I.** Irradiation dose of the woody tier of a coniferous forest due to accidental emissions from NPP. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2017, vol. 123, no. 3, pp. 165-170. (In Russian).
24. **Alexakhin R.M., Karaban R.T., Prister B.S., Spirin D.A., Romanov G.N., Mishenkov N.N., Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Fyodorov Ye.A., Tikhomirov F.A.** The effects of acute irradiation on a forest biogeocenosis: experimental data, model and practical application for accidental cases. *J. Sci. Total Environ.*, 1994, vol. 157, pp. 357-369.
25. **Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Aleksakhin R.M., Spirin D.A.** Mathematical modeling of the consequences of acute radiation exposure on the tree layer of the forest biogeocenosis. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation biology. Radioecology*, 1989, vol. 29, no. 4, pp. 544-549. (In Russian).