Радиационная безопасность окружающей среды. Обзор

Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.

ФГБУ НПО «Тайфун», Обнинск

К настоящему времени достигнут существенный прогресс в создании научных основ радиационной безопасности окружающей среды. Разработаны международные базы данных по радиационным эффектам на биоту, включающие, наряду с зарубежными, уникальные результаты исследований отечественных специалистов. В обзоре рассмотрены ключевые публикации международных исследований по радиационной безопасности биоты, свидетельствующие об актуальности, научной и практической значимости рассматриваемой проблемы. Обсуждены релевантные российские нормативно-методические документы, включающие оценку радиоэкологического воздействия, расчёт контрольных концентраций радиоактивных веществ по экологическим критериям, определение радиационного фона. Выполнено научное обоснование концепции порогового действия ионизирующей радиации на биоту. Показаны экологическая значимость естественного радиационного фона, существенно более высокая радиотоксичность альфа-излучателей по сравнению с редкоионизирующим гамма-излучением, выявлена неоднородность альфа-излучателей по радиотоксичности, определена относительная биологическая эффективность изотопов плутония и америция, которая на порядок выше по сравнению с радием. Рассмотрены публикации по математическому моделированию радиационных эффектов в природной биоте, результаты сравнения этих моделей. Продемонстрированы увеличение популяционной уязвимости к ионизирующей радиации крупных животных, возможность построения количественной шкалы их проявления для разных видов. Показано, что экологические риски на территории ВУРС, чернобыльского аварийного следа, а также в районах расположения российских АЭС, радиохимических комбинатов и уранового производства не превышают в настоящее время значения, соответствующего возможным референтным детерминированным эффектам для биоты. Сформулированы актуальные задачи, требующие дальнейших исследований, включая необходимость введения коэффициентов качества для альфа-излучателей при расчётах доз на биоту, разработку более детальной шкалы «доза-эффект» для организмов разных групп с учётом особенностей их метаболизма, моделирование и экспериментальное изучение экологических процессов для оценок экономического ущерба и восстановления популяций при радиационном воздействии. Подчеркнута необходимость учёта как радиационно-гигиенических, так и экологических требований при реабилитации загрязнённых территорий.

Ключевые слова: радиационная безопасность, окружающая среда, ионизирующее излучение, биота, радиоэкологические эффекты, доза, модели, критерии радиационной безопасности, экологический риск, объекты использования атомной энергии.

Введение

В течение длительного времени общепринятой являлась антропоцентрическая концепция, согласно которой, если от радиационного воздействия защищён человек, значит, флора и фауна так же защищены. Однако эта концепция подвергалась критическому анализу в трудах Р.М. Алексахина и Г.Г. Поликарпова [1, 2], поскольку существуют ситуации (радиационные аварии, территории повышенного техногенного загрязнения вне зоны нахождения населения), когда дозы облучения объектов флоры и фауны значительно выше доз, которые могут получить люди [3]. С учётом результатов исследований и «растущего осознания уязвимости окружающей среды» в международных основных нормах безопасности МОНБ-2014 (п. 1.33) [4] сформулировано положение «о необходимости подтверждать (а не исходить из предположения), что окружающая среда защищена от воздействия промышленных загрязнителей, включая радионукли-

Крышев И.И.* – гл. научн. сотр., д.ф.-м.н., проф.; Сазыкина Т.Г. – гл. научн. сотр., д.ф.-м.н. ФГБУ «НПО «Тайфун».

*Контакты: 249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, д. 4. Тел.: +7 (484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

ды». Концепции антропоцентризма и экоцентризма дополняют друг друга, поэтому более корректно рассматривать эколого-антропоцентрический дуализм, в соответствии с которым при использовании ядерных технологий должна быть обеспечена «защита населения и окружающей среды от радиационных рисков» [4, п. 1.32]. В обзоре проводится анализ современного состояния радиозоологической безопасности, а также рассматривается практическое применение научных результатов.

Эволюция концепции радиационной защиты биоты

Международные проекты. В последние десятилетия для изучения защиты окружающей среды от ионизирующего излучения было инициировано выполнение ряда международных проектов Европейской Комиссии: EPIC (Environmental Protection from Ionising Contaminants) – защита окружающей среды от ионизирующих загрязнителей в Арктике (2000-2003 гг.); FASSET (Framework for assessment of environmental impact) – система для оценки экологического воздействия (2000-2004 гг.); ERICA (Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management) – риск для окружающей среды от ионизирующей радиации: оценки и менеджмент (2004-2007 гг.); PROTECT (Protection of the environment from ionising radiation in a regulatory context) – защита окружающей среды от ионизирующих излучений в контексте регулирования (2006-2008 гг.); МАГАТЭ: EMRAS, EMRAS II (Environmental Modelling for Radiation Safety); MODARIA и MODARIA II (Modelling and Data for Radiological Impact Assessments), а также национальных программ.

Исследования проводили по следующим направлениям:

- ✓ создание баз данных о влиянии ионизирующего излучения на флору и фауну;
- ✓ изучение радиационных эффектов, наблюдаемых в биоте;
- ✓ определение референтных (представительных) видов биоты для проведения радиозоологических исследований;
- ✓ усовершенствование методик расчёта доз облучения биоты;
- ✓ определение безопасных и опасных уровней облучения биоты для использования в качестве контрольных величин в регулирующих документах;
- ✓ создание программ оценки экологического риска.

Разработка научно-методических подходов к обеспечению радиационной безопасности биологических видов, отличных от человека, является сложной задачей из-за их многообразия, различной степени радиочувствительности и биологических характеристик.

Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) сформулировала важный принцип ступенчатого, поэтапного подхода к анализу радиозоологической ситуации для обеспечения экономически эффективной оценки радиационного воздействия на биоту [5]. На первом этапе проводится предварительный скрининговый анализ на основе стандартной простой процедуры, не требующей проведения детального обследования, в результате которого выявляются тривиальные ситуации, не требующие дальнейшего рассмотрения. Второй и третий этапы выполняются только в случаях превышения контрольных уровней облучения. На этих этапах проводится более детальный анализ с учётом местных особенностей радиоактивного загрязнения экосистем.

В последние годы в Европе создаются структурные объединения, координирующие исследования в области радиозоологии и радиационной безопасности окружающей среды [6-8].

Девять ведущих научных центров Европы сформировали Европейский радиоэкологический альянс – ALLIANCE (European Radioecology Alliance, www.er-alliance.eu), который в дальнейшем расширился до 27 организаций из 14 стран [7]. Одним из первых проектов в рамках ALLIANCE стал проект EC STAR (Strategic Network for Integrating Radioecology – Стратегическая сеть интегрирования радиоэкологии, www.radioecology-exchange.org), целью которого являлось создание сети обмена информацией по радиоэкологии, распространение знаний, обучение и ряд научных задач. В рамках ALLIANCE была разработана Стратегия исследований в области радиоэкологических исследований и радиационной безопасности окружающей среды на период до 2020 г. Проект EC COMET (Coordination and Implementation of a pan-European instrument for radioecology – Координация и внедрение пан-Европейской методологии в радиоэкологии, 2013-2017 гг.) наряду с научными задачами в рамках Стратегии радиоэкологических исследований продолжил активность по обмену знаниями, тренингам и координации исследований. В настоящее время осуществляется европейский проект EJP-CONCERT, 2015-2020 гг. (European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research – Европейская Объединённая Программа по интегрированию исследований по радиационной безопасности), направленный на развитие устойчивой структуры администрирования, планирования и определения приоритетных направлений исследований в области радиационной безопасности окружающей среды [8].

Состояние проблемы в России. Неоценимый вклад в создание отечественной радиоэкологии внесли В.И. Вернадский, Р.М. Алексахин, Д.И. Гусев, А.И. Ильенко, А.Е. Катков, Д.А. Криволюцкий, Н.В. Куликов, В.И. Маслов, И.Н. Рябов, А.И. Таскаев, Н.В. Тимофеев-Ресовский, Ф.А. Тихомиров, В.А. Шевченко, И.А. Шеханова и другие исследователи. Труды этих замечательных учёных во многом стали фундаментальной основой теории и практики радиационной защиты окружающей среды.

Требования к обеспечению радиационной защиты окружающей среды содержатся в Федеральном законе № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». В соответствии с этим законом (ст. 1, 23) допустимые уровни выброса и сброса радиоактивных веществ в окружающую среду не должны отрицательно влиять на устойчивость функционирования естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов, а также на сохранение биологического разнообразия. Методические подходы к обеспечению безопасности окружающей среды содержатся в документах Ростехнадзора [9, 10] и Росэнергоатома [11].

Проблемы радиационной безопасности окружающей среды неоднократно обсуждались на заседаниях Российской научной комиссии по радиологической защите (РНКРЗ). В заключении РНКРЗ от 25 декабря 2012 г. по докладу [12] отмечается, что в глобальном и долгосрочном контексте защита населения и охрана окружающей среды имеют важнейшее значение. Рекомендовано ускорить разработку критериев и методических рекомендаций в области радиационной безопасности окружающей среды с учётом требований федерального законодательства, новых международных норм радиационной безопасности и современного международного опыта в этой сфере.

На основе анализа отечественного и зарубежного опыта радиоэкологических исследований и рекомендаций МКРЗ специалисты НПО «Тайфун» разработали методические рекомендации для оценки радиационной безопасности окружающей среды (рис. 1), в том числе радиоэкологического воздействия на объекты природной среды, а также алгоритм расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах, пресной воде и почве, определение ра-

диационного фона по данным мониторинга радиационной обстановки [13-16]. Эти исследования выполнены в рамках целевой научно-технической программы Росгидромета.

Рис. 1. Методические рекомендации по оценке радиоэкологической обстановки.

Специалисты ИБРАЭ РАН, НПО «Тайфун», ВНИИРАЭ, МРНЦ Минздрава РФ, НТЦ ЯРБ «Ростехнадзора» в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» подготовили коллективные монографии [17, 18], в которых рассмотрели практические вопросы оценки текущего состояния и долгосрочного прогнозирования уровней радиационного воздействия предприятий атомной отрасли на человека и окружающую среду. В настоящее время в рамках ЯРБ-2 начата работа по подготовке к переизданию актуализированных монографий. В современных публикациях российских специалистов представлен широкий спектр различных аспектов радиоэкологической безопасности от теоретического анализа зависимости «доза-эффект» до научно-методических разработок практической направленности.

В обзоре [19] представлено современное состояние проблемы по изучению биологических эффектов малых доз ионизирующих излучений, включая биологическую значимость естественного радиационного фона, стимулирующее действие малых доз радиации на метаболические процессы растительных и животных организмов, повышение радиоустойчивости и радиочувствительности к малым дозам в различных условиях облучения. Отмечена противоречивость в интерпретации негативного и позитивного действия малых доз. Приведены собственные экспериментальные данные автора обзора по изучению действия малых доз облучения семян ольховника кустарникового, свидетельствующие о наличии порога в действии ионизирующего излучения. В экспериментальных исследованиях обнаружено, что содержание лабораторных животных, растений и микроорганизмов в условиях пониженного в несколько раз радиационного фона приводит к негативным последствиям (замедлению роста, потере веса и активности и др.), т.е. поддержание естественного радиационного фона совершенно необходимо для нормального течения жизненных процессов на нашей планете. Представлены результаты изучения возможности применения методологии оценки экологических рисков для расчёта критических уровней острого и хронического облучения на примере данных о воздействии ионизирующего излучения на показатели продуктивности и выживаемости сельскохозяйственных рас-

тений. Обсуждены пороговые и беспороговые модели дозовых зависимостей, стохастические и детерминированные эффекты с точки зрения развития системы радиационной защиты человека и биоты [20].

В работах [21-23] обсуждаются антропоцентрический и экоцентрический принципы в радиационной защите окружающей среды, проанализированы различия в гигиеническом и экологическом подходах. В международных и отечественных нормативно-правовых документах и научных публикациях [24-26] показана целесообразность применения экоцентрических принципов и экологического подхода при реабилитации объектов и территорий, загрязнённых в результате прошлой деятельности предприятий ядерного топливного цикла. В публикации [27] разработаны методы определения операционных критериев реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий размещения объектов использования атомной энергии, показана необходимость учёта как радиационно-гигиенических, так и экологических требований. В публикации [28] на основе существующих нормативных документов в области охраны окружающей среды разработана методология оценки экологического ущерба от радиационного воздействия на биоту, позволяющая оценить возможный экономический ущерб. Разработанная методология нашла практическое применение при обосновании отнесения радиоактивных отходов к «особым», и может быть использована при планировании природоохранных мероприятий в атомной отрасли, а также при реабилитации загрязнённых территорий.

Остановимся более детально на некоторых ключевых вопросах исследований в области радиационной безопасности окружающей среды.

Базы данных по радиационным эффектам на биоту

В рамках международных проектов были созданы базы данных по соотношениям «доза – радиационный эффект» для организмов, отличных от человека [29-31]. Электронная база данных FREDERICA – по радиационным эффектам в биоте – была создана на основе данных, собранных в рамках проектов EPIC, FASSET, ERICA (более 30000 записей).

Эффекты хронического пожизненного облучения организмов изучены значительно меньше, чем опасности острого облучения. В мировой литературе по радиационным эффектам у животных и растений преобладают данные по эффектам острого радиационного воздействия, преимущественно в высоких дозах, соответствующих воздействию ядерного оружия. В международной базе данных по радиационным эффектам FREDERICA около 2/3 записей относится к острому облучению и только 1/3 – к хроническому. Кроме того, подавляющая часть данных по радиационным эффектам относится к условиям лабораторного эксперимента, которые значительно отличаются от условий дикой природы.

Уникальная особенность радиобиологических данных, накопленных в России, – наличие долгосрочных наблюдений за радиационными эффектами в природных популяциях животных и растений, обитающих на загрязнённых территориях; коллекция этих данных была собрана в рамках проекта EPIC и внесена в международную базу FREDERICA. База данных FREDERICA доступна на английском языке в интернет-сайте: www.frederica-online.org. В базу данных, наряду с зарубежными, входят материалы публикаций на русском языке по радиационным эффектам на флору и фауну в районах кыштымской и чернобыльской аварий, районах, загрязнённых естественными радионуклидами или радиоактивными отходами экспериментальных работ.

Важным источником данных по радиационным эффектам хронического облучения на животных явились сводные Международные радиобиологические архивы долгосрочных экспери-

ментов на лабораторных животных (International Radiobiological Archives of Long-term Animal Studies, IRA). Международные радиобиологические архивы включают в себя Европейские радиобиологические архивы (European Radiobiology Archives), Национальные архивы США (US National Radiobiology Archives) и Японские радиобиологические архивы (Japanese Radiobiology Archives). Общее описание данных в архивах с аннотациями результатов экспериментов и библиографией размещено в свободном доступе в Интернете, а также приведено в публикациях [32, 33]. Международные архивы содержат описания радиобиологических исследований, выполненных в период с 1960-х по 1990-е годы.

Рассматривая экспериментальную информацию по радиобиологии теплокровных животных (радиочувствительная группа животных), нужно признать, что только несколько лабораторных видов были систематически изучены, а именно: мышь, крыса, кролик, собака, морская свинка и обезьяна. Для большинства видов животных радиобиологическая информация или полностью отсутствует, или недостаточна. В то же время очень немногие из крупномасштабных радиационных экспериментов на животных, вероятно, будут выполнены в будущем из-за финансовых и этических проблем, связанных с радиационным облучением позвоночных животных. В этой связи трудно ожидать в дальнейшем существенного увеличения информативности существующих баз данных по радиационным эффектам облучения биоты, особенно в отношении популяций дикой фауны.

Из всего многообразия радиационных эффектов для целей нормирования воздействия радиации на природную биоту МКРЗ были отобраны референтные типы детерминированных эффектов, которые важны для выживания и воспроизводства популяций организмов в условиях дикой природы: увеличение заболеваемости, снижение репродуктивности и снижение продолжительности жизни организмов (сокращение численности организмов в популяции) [5].

В связи с большим количеством видов организмов, обитающих в биосфере, оценки дозовых нагрузок производятся для небольшого типового набора референтных видов или объектов биоты [5, 13]. Для выбора референтных видов используются следующие критерии: экологическая значимость, доступность для радиоэкологического мониторинга, величина дозы облучения, радиочувствительность, способность к самовосстановлению.

Радиоэкологическое моделирование

Расчёт дозовых нагрузок на референтные организмы биоты. Для упрощения расчётов оценки мощности дозы, как правило, проводятся в предположении равномерного распределения радионуклидов по всему организму (для инкорпорированных излучателей). При оценках внешнего облучения организмов распределение радионуклидов в окружающей среде также предполагается равномерным. Несмотря на то, что организмы биоты имеют самую разнообразную форму, при расчётах дозовых нагрузок используются упрощённые дозиметрические модели, аппроксимирующие организм цилиндром, сферой или эллипсоидом. С учётом того, что природные организмы имеют жизненные циклы различной продолжительности, дозовые нагрузки рассчитываются в единицах мощности дозы в мГр/сут либо мкГр/ч.

Методы расчёта мощности дозы и факторы дозовой конверсии для различных типов референтных организмов и различных радионуклидов приведены в [5, 13, 34].

Учёт биологической эффективности ионизирующего излучения при расчёте доз на биоту. Среди проблемных вопросов в методологии оценки дозовых нагрузок на природную

биоту остаётся неясность в оценке относительной вредности плотно-ионизирующих излучений по сравнению с низкоионизирующими. В экспериментах по определению сравнительной радиотоксичности альфа-излучателей относительно гамма-облучения были получены величины коэффициента относительной биологической эффективности w_α в диапазоне от 5 до нескольких сотен в зависимости от вида эффекта, радионуклида и способа депонирования радионуклида животным [35-37].

В работе [38] для оценки пороговых уровней воздействия депонированных альфа-излучателей были проанализированы международные архивы радиобиологических данных о наличии/отсутствии радиационных эффектов у позвоночных животных при разных мощностях дозы хронического облучения альфа-излучателями методом непараметрической статистики (рис. 2).

Рис. 2. Распределение кумулятивной частоты обнаружения радиационных эффектов у позвоночных организмов при различных мощностях дозы хронического плотноионизирующего облучения на основе данных Международных радиобиологических архивов [38].

Для сравнения на этом же графике показано распределение кумулятивных частот встречаемости эффектов при воздействии редкоионизирующего облучения. Как видно из рисунка, имеет место существенная разница между радиотоксичностью альфа-излучателей и редкоионизирующего гамма-облучения. Так, радиационные эффекты от внутреннего альфа-облучения начинают проявляться на статистически достоверном уровне в диапазоне 10^{-6} - 10^{-5} Гр/сут пожизненного облучения, в то время как для гамма-облучения отсутствуют данные о каких-либо значимых радиационных эффектах вплоть до 10^{-4} Гр/сут. Результаты определения значения 5% нижнего порога появления радиационных эффектов от альфа-излучателей, депонированных в организм млекопитающих животных, приведены в табл. 1. Отношение границ радиотоксичности редкоионизирующих и плотноионизирующих излучателей даёт оценку относительной биологической эффективности альфа-облучения $w_\alpha=15$.

Таблица 1

Нижние 5% пороги обнаружения радиационных эффектов у млекопитающих животных при пожизненном облучении депонированными радионуклидами, определённые методами непараметрической порядковой статистики [38, 39]

Нуклид	Число записей в базе данных	5% порог, Гр/сут	95% доверительные интервалы, Гр/сут
Альфа-излучатели, все данные	256	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5} - 9,0 \cdot 10^{-5}$
²³⁹ Pu, ²³⁸ Pu	109	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-6} - 6,0 \cdot 10^{-5}$
²⁴¹ Am	44	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-5} - 9,0 \cdot 10^{-5} *$
²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra, ²²⁴ Ra	52	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4} - 4,6 \cdot 10^{-4} *$
Гамма- и бета-излучатели	202	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$

* – 75% доверительные интервалы.

Вместе с тем, на рис. 2 отчётливо видно, что изотопы плутония имеют значительно более низкий порог появления радиационных эффектов ($2 \cdot 10^{-5}$ Гр/сут) по сравнению с изотопами радия ($2,1 \cdot 10^{-4}$ Гр/сут), и это различие статистически значимо. Америций (²⁴¹Am) имеет практически тот же порог появления радиационных эффектов, как и плутоний. Таким образом, группа альфа-излучателей не является однородной по радиотоксичности, относительная биологическая эффективность изотопов плутония и америция ($w_\alpha=50$) на порядок выше по сравнению с радием ($w_\alpha=4,7$) [38].

Моделирование радиозэкологических эффектов облучения. С учётом ограниченности экспериментальных данных и необходимости прогнозных оценок возможного действия ионизирующего излучения на биоту важное значение в развитии методологии радиационной безопасности окружающей среды имеют методы радиозэкологического моделирования, по существу не имеющие альтернативы в таких ситуациях, как оценка экологических последствий радиационных аварий, захоронения радиоактивных отходов и др. С этой целью разработаны несколько моделей, описывающих механизмы радиационного повреждения в природных популяциях и экосистемах [40-44].

Первые попытки моделирования были направлены на оценки уровней хронического облучения, которые могут привести к снижению численности или вымиранию популяций. Сравнение моделей было выполнено в рамках Международной программы МАГАТЭ – EMRAS II по сценарию «Популяционные эффекты при хроническом облучении» для модельных популяций мышей, зайцев, волков и оленей при хроническом радиационном облучении в течение 5 лет с мощностью дозы в диапазоне 1-50 мГр/сут. Международной группой специалистов были проведены сравнительные расчёты по этому сценарию с использованием нескольких моделей. Были оценены критические мощности дозы, вызывающие популяционное исчезновение в течение 5 лет после начала облучения, уязвимость популяций к облучению повышалась в ряду от малых до больших организмов: мыши, зайцы, олени, волки [44, 45].

Методология и модель развития радиационных эффектов в модельных популяциях животных и экосистемах с лимитирующим ресурсом была представлена в публикациях [42, 43]. Динамическая математическая модель «популяция с самовосстановлением», описывающая эффекты ионизирующей радиации в популяции животных, включает экологический блок, который может работать автономно и при наличии радиационного стресса, а также радиационный блок, описывающий динамические процессы «повреждение-и-восстановление» биомассы популяции. Значения биологических параметров для различных видов животных были взяты из

биологической базы данных AnAge: <http://genomics.senescence.info/species>. Значения для параметров радиационного повреждения биологических тканей оценивали по данным острых радиационных воздействий. Для экстраполяции метаболических и радиационных параметров для различных видов использовали аллометрические соотношения, связывающие параметры метаболизма с массой тела. В работе [44] модель «популяция с самовосстановлением» была расширена для популяций с возрастной структурой; модели популяции с несколькими возрастными классами были также исследованы в работе [40].

С помощью моделирования были продемонстрированы следующие эффекты хронического действия ионизирующей радиации: общее увеличение популяционной уязвимости к ионизирующей радиации в популяциях крупных долгоживущих животных; возможность построения количественной шкалы появления популяционных эффектов радиационного облучения для разных видов животных [43-46]; восстановление повреждённых популяций за счёт миграций здоровых животных с соседних территорий [41]. Полученные на моделях эффекты ионизирующего облучения подтверждаются данными из радиоэкологической базы данных FREDERICA.

Критерии радиационной безопасности биоты

Один из первых критериев в регламентации хронического радиационного воздействия на биоту был предложен в работе [47], где для водной биоты полагалось, что мощность дозы хронического облучения, при которой обеспечивается радиационная безопасность, не превышает 10 мГр/сут. В дальнейшем в качестве безопасного (порогового) уровня радиационного воздействия на биоту предлагалось использовать значения мощности дозы в диапазоне 1-10 мГр/сут [5, 35, 36, 48]. Рекомендованные значения допустимого радиационного воздействия на биоту имели характер экспертных заключений, не основанных на статистическом анализе имеющихся эмпирических данных.

В рамках европейского проекта PROTECT величина безопасного порога облучения биоты была оценена статистическим методом построения «распределения чувствительности видов» (SSD – Species Sensitivity Distribution) [49]. С использованием метода «распределения чувствительности видов» и введением коэффициента запаса нижняя граница для облучения биоты (животные, растения беспозвоночные) была определена на уровне 10 мкГр/ч, или 0,24 мГр/сут. В силу особенностей SSD-метода, весьма значительное количество данных из радиобиологических архивов не было использовано в методе SSD, и часть реальных данных была заменена интерполяциями.

Метод непараметрической статистики был использован для статистического анализа частот распределения опубликованных научных данных о наличии/отсутствии радиационных эффектов у позвоночных животных при разных мощностях дозы хронического облучения [39]. Показано, что радиационные эффекты хронического гамма-облучения на заболеваемость появляются при мощности дозы выше 0,24 мГр/сут; эффекты на репродуктивную систему обнаруживают при облучении выше 0,6 мГр/сут; продолжительность жизни начинает сокращаться, начиная с 1 мГр/сут.

В соответствии с публикацией МКРЗ [5] в качестве границ допустимого радиационного воздействия на объекты биоты принимаются следующие значения мощности дозы хронического облучения: $D_{max}=1,0$ мГр/сут для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной; $D_{max}=10$ мГр/сут для растений (кроме сосны обыкновенной) и беспозвоночных животных.

С учётом возможной неопределённости в оценках мощности дозы облучения рекомендуется использовать коэффициент запаса 10 при проведении скрининговой оценки радиационного воздействия на объекты биоты [5, 13], т.е. использовать в этих целях следующие критерии: $D_{min}=0,1$ мГр/сут для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной; $D_{min}=1$ мГр/сут для растений (кроме сосны обыкновенной) и беспозвоночных животных.

Для значений мощности дозы облучения референтных объектов биоты ниже D_{min} отсутствуют сведения о статистически значимых детерминированных эффектах радиации на заболеваемость, репродукцию и продолжительность жизни биоты [5].

В случае, когда мощность дозы облучения объектов биоты превышает уровень D_{min} , но остаётся меньше уровня D_{max} , это не будет само по себе означать невыполнение требования обеспечения радиационной безопасности объектов биоты, однако рекомендуется проведение уточнённых оценок локальных дозовых нагрузок для снижения неопределённости в оценках мощности дозы облучения объектов биоты. При превышении уровня D_{max} необходимо проведение природоохранных мероприятий, направленных на сохранение благоприятной окружающей среды.

Величины допустимого радиационного воздействия могут быть выражены через производные параметры, такие как контрольные концентрации радионуклидов в компонентах природной среды, что удобно для практического применения при оценке радиэкологической обстановки по данным мониторинга [14, 15].

Анализ экологического риска

Следует отметить отличие концепции радиационного риска для человеческой популяции и риска для биоты [5, 50, 51]. Концепция риска для человека основана на предположении о стохастическом беспороговом действии ионизирующей радиации. Под радиационным риском понимается вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения. В отличие от радиационного риска для человека экологический риск для биоты представляет собой не стохастическую величину, а безразмерный коэффициент опасности, определяемый в соответствии с рекомендациями МКРЗ [5] как отношение мощности дозы облучения организмов к экологически безопасному уровню облучения (БУОБ).

Особенностью методологии анализа экологического риска является переход от множества параметров радиационной обстановки к единому интегральному показателю качества окружающей среды – уровню экологического риска. Это позволяет сравнивать на единой методической основе различные объекты использования атомной энергии, ранжировать загрязнённые территории, оптимизировать мониторинг радиационной обстановки [50, 51].

Сравнительные оценки экологических рисков на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, Чернобыльского аварийного следа и в районах расположения рассмотренных объектов использования атомной энергии, рассчитанные на основе данных мониторинга радиационной обстановки, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные оценки экологических рисков (отношение мощности дозы облучения организмов к БУОБ) [50, 51]

Территория/объект использования атомной энергии	Наземная биота	Водная биота
ВУРС (2017 г.)	0,001-1	0,007-0,7
Чернобыльский аварийный след (Брянская обл., 2014-2016 гг.)	0,008-0,3	0,01-0,2
Белоярская АЭС (2000-2016 гг.)	$2 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
Ленинградская АЭС (2000-2016 гг.)	$8 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-4}$
Нововоронежская АЭС (2000-2016 гг.)	$1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$
Сибирский химический комбинат 2000-2008 гг.	$1 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-1}$
2009-2016 гг.	$1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-4}$
Горно-химический комбинат 2000-2010 гг.	$1 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$
2011-2016 гг.	$1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
Приаргунское ПГХО (2000-2016 гг.)	$4 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1} - 6 \cdot 10^{-1}$

Согласно выполненным оценкам мощности дозы облучения организмов биоты и соответствующие им уровни экологических рисков на территории ВУРС, Чернобыльского аварийного следа, а также в районах расположения рассмотренных объектов использования атомной энергии (АЭС, радиохимических комбинатов, уранового производства) не превышают в настоящее время экологически безопасного уровня облучения и соответствующего ему значения экологического риска для биоты.

Заключение

К настоящему времени достигнут существенный прогресс в создании научных основ радиационной безопасности окружающей среды. Разработаны международные базы данных по радиационным эффектам на биоту, включающие, наряду с зарубежными, уникальные результаты исследований отечественных специалистов. Выполнено научное обоснование концепции порогового действия ионизирующей радиации на биоту. На основе анализа экспериментальных данных предложены критерии радиационной безопасности биоты. Разработаны типовые модели оценки мощности дозы для референтных организмов. Проводятся работы по моделированию радиоэкологических последствий облучения биоты, в рамках которых продемонстрирована возможность построения количественной шкалы появления популяционных эффектов радиационного облучения для разных видов животных. Разработана методология оценки экологического ущерба в денежном эквиваленте от радиационного воздействия на биоту. Показана существенно более высокая радиотоксичность альфа-излучателей по сравнению с редкоизирующим гамма-облучением, выявлена неоднородность альфа-излучателей по радиотоксичности. Разработана методология оценки экологического риска, апробированная в широком диапазоне ситуаций для территории ВУРС, Чернобыльского аварийного следа, а также в районах расположения российских АЭС, радиохимических комбинатов и уранового производства. Разработаны нормативно-методические документы, включающие оценку радиоэкологического воздействия, расчёт контрольных концентраций радиоактивных веществ по экологическим критериям, определение радиационного фона.

Вместе с тем, многие научные и методические вопросы требуют дальнейших исследований. В числе актуальных задач следует назвать такие, как: необходимость введения коэффициентов качества для альфа-излучателей при расчётах доз на биоту; разработка методов расчёта доз на покровные ткани организмов биоты; разработка более детальной шкалы «доза-эффект» для организмов разных групп с учётом особенностей их метаболизма; моделирование и экспериментальное изучение экологических процессов для оценок ущерба и восстановления популяций при радиационном воздействии (миграция, хищничество, паразитизм, конкуренция за ресурсы); исследование воздействия на биоту от факторов, сопутствующих радиации (продукты радиолиза воды и воздуха, возможные изменения электрических характеристик атмосферы, эффекты трансмутации от облучения ^{14}C и тритием, химическая токсичность урана и других долгоживущих нуклидов и др.).

Литература

1. **Алексахин Р.М.** Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
2. **Поликарпов Г.Г.** Радиационная экология как научная основа радиационной защиты биосферы и человека //Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Выпуск 8. Екатеринбург, 2000. С. 3-28.
3. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность биосферы: научные и нормативно-методические аспекты //Радиоэкологические чтения, посвящённые действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Ключевскому (3 декабря 2013 г.). Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2014. С. 31-76.
4. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 458 p.
5. ICRP, 2008. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. 251 p.
6. **Санжарова Н.И.** Перспективы развития радиоэкологических исследований – новые международные проекты //Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 2. С. 209-214.
7. **Thorne M.C.** Radioecology in Europe //J. Radiat. Prot. 2018. V. 38, N 1. P. E5-E9.
8. **Muikku M., Beresford N.A., Garnier-Laplace J., Real A., Sirkka L., Thorne M., Vanderhove H., Willrodt C.** Sustainability and integration in radioecology – position paper //J. Radiat. Prot. 2017. V. 38, N 1. P. 152-163.
9. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утв. приказом Ростехнадзора от 7 ноября 2012 г., № 639. М.: Ростехнадзор, 2012. 21 с.
10. Методика разработки нормативов допустимых сбросов радиоактивных веществ в водные объекты для водопользователей. Утв. приказом Ростехнадзора от 22 декабря 2016 г., № 551. М.: Ростехнадзор, 2016. 25 с.
11. Методика МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух. М.: АО «Концерн Росэнергоатом», 2016. 76 с.
12. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 //Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 1. С. 47-61.
13. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Утв. Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015 г. Обнинск, 2015. 60 с.
14. Рекомендации Р 52.18.852-2016. Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах. Утв. Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 г. //Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды: сб. рекомендаций. Обнинск, 2016. С. 3-28.
15. Рекомендации Р 52.18.853-2016. Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве. Утв. Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 г. //Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды: сб. рекомендаций. Обнинск, 2016. С. 29-55.
16. Рекомендации Р 52.18-863-2017. Методика определения радиационного фона по данным мониторинга радиационной обстановки. Утв. Росгидрометом Минприроды России 29.05.2017 г. Обнинск, 2017. 35 с.
17. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту /Под ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: «САМ полиграфист», 2015. 265 с.

18. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома /Под ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: «САМ полиграфист», 2015. 296 с.
19. **Журавская А.Н.** Биологические эффекты малых доз ионизирующих излучений (обзор) //Наука и образование. 2016. № 2. С. 94-102.
20. **Удалова А.А.** О выборе дозовой зависимости при экологическом нормировании радиационного воздействия //Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 5. С. 520-538.
21. **Алексахин Р.М.** Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики //Атомная энергия. 2013. Т. 114, вып. 5. С. 243-249.
22. **Алексахин Р.М., Фесенко С.В.** Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы //Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 1. С. 93-103.
23. **Казаков С.В., Линге И.И.** О гигиеническом и экологическом подходах в радиационной защите //Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 4. С. 482-492.
24. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Гераськин С.А., Переволоцкая Т.В., Гордиенко Е.В., Микаилова Р.А.** Анализ международных подходов к обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды при реабилитации объектов и территорий, загрязненных в результате прошлой деятельности предприятий ядерного топливного цикла //Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 3. С. 86-103.
25. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В., Наумов В.С.** Анализ национальной системы нормативного и правового обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды вблизи объектов и территорий, загрязнённых техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 2. С. 107-121.
26. **Абалкина И.Л., Панченко С.В., Савкин М.Н., Веденикова М.В., Крышев И.И.** Социально и экологически приемлемые критерии реабилитации загрязнённых территорий пунктов размещения особых радиоактивных отходов //Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3. С. 46-52.
27. **Крышев И.И., Крышев А.И., Панченко С.В., Ведерникова М.В.** Критерии реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий размещения объектов использования атомной энергии //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 1. С. 33-42.
28. **Крышев И.И., Курындина Л.А., Линге И.И.** Оценка ущерба окружающей среде при использовании атомной энергии //Атомная энергия. 2014. Т. 117, вып. 3. С. 159-164.
29. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** EPIC database on the effects of chronic radiation in fish: Russian/FSU data //J. Environ. Radioact. 2003. V. 68, N 1. P. 65-87.
30. **Sazykina T.G., Kryshev I.I.** Radiation effects in wild terrestrial vertebrates – the EPIC collection //J. Environ. Radioact. 2006. V. 88, N 1. P. 11-48.
31. **Copplestone D., Hingston J., Real A.** The development and purpose of the FREDERICA radiation effects database //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99, N 9. P. 1456-1463.
32. International radiobiology archives of long-term animal studies. Vol. 1. Description of participating institutions and studies. Washington, 1996. 486 p.
33. **Birschwilks M., Gruenberger M., Adelman C., Tapio S., Gerbe, G., Schofield P.N., Grosche B.** The European radiobiological archives: online access to data from radiobiological experiments //Radiat. Res. 2011. V. 175, N 4. P. 526-531.
34. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A.** New version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals //J. Environ. Radioact. 2016. V. 153. P. 141-148.
35. IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards. Technical Report. Series No 332. Vienna, 1992. 334 p.

36. US DOE. United States Department of Energy. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. DOE-STD-1153-2002.U.S.DOE. Washington DC, 2002. 234 p.
37. **Highley K.A., Kocher D.C., Real A.G., Chambers D.B.** Relative biological effectiveness and radiation weighting factors in the context of animals and plants //Ann. ICRP. 2012. V 41, N 3-4. P. 233-245.
38. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** Lower thresholds for lifetime health effects in animals from high-LET radiation – comparison with chronic low-LET radiation //J. Environ. Radioact. 2016. V. 165. P. 227-242.
39. **Sazykina T.G., Kryshev A.I., Sanina K.D.** Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures //Radiat. Environ. Biophys. 2009. V. 48, N 4. P. 391-404.
40. **Alonzo F., Hertel-Aas T., Real A., Lance E., Garcia-Sanchez L., Bradshaw C., Vives i Batlle J., Oughton D., Garnier-Laplace J.** Population modelling to compare chronic external radiotoxicity between individual and population endpoints in four taxonomic groups //J. Environ. Radioact. 2016. V. 152. P. 46-59.
41. **Kryshev A.I., Sazykina T.G.** Modelling the effects of ionizing radiation on survival of animal population: acute versus chronic exposure //Radiat. Environ. Biophys. 2015. V. 54, N 1. P. 103-109.
42. Modelling of biota dose effects. Report of working group 6 Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS II) Programme. IAEA-TECHDOC-1737. Vienna: IAEA, 2014.
43. **Monte L.** Predicting the effects of ionising radiation on biological populations: testing of a non-linear Leslie model applied to a small mammal population //J. Environ. Radioact. 2013. V. 122. P. 63-69.
44. **Sazykina T.G.** Population sensitivities of animals to chronic ionizing radiation – model predictions from mice to elephants //J. Environ. Radioact. 2018. V. 182. P. 177-182.
45. **Sazykina T.G., Kryshev, A.I.** Simulation of population response to ionizing radiation in ecosystem with a limiting resource – model and analytical solutions //J. Environ. Radioact. 2016. V. 151. P. 50-57.
46. **Vives i Batlle J., Sazykina T., Kryshev A., Monte L., Kawaguchi I.** Inter-comparison of population models for the calculation of radiation dose effects on wildlife //Radiat. Environ. Biophys. 2012. V. 51, N 4. P. 399-410.
47. NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements. Effects of ionizing radiation on aquatic organisms. NCRP Report N 109. Bethesda, Maryland, USA, 1991. 115 p.
48. UN, United Nations. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York: United Nations, 2011. 164 p.
49. **Garnier-Laplace J., Copplestone D., Gilbin R.** Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA integrated approach //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99. P. 1474-1483.
50. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И.** Опыт апробации радиозэкологических критериев безопасности окружающей среды для Восточно-Уральского радиоактивного следа и районов расположения объектов использования атомной энергии //Радиозэкологические чтения В.М. Ключковского (30 ноября 2017 г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2017. С. 29-58.
51. **Крышев И.И., Рязанцев Е.П.** Экологический риск радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония) //Атомная энергия. 2017. Т. 122, вып.1. С. 46-55.

Radiation protection of the natural environment. Review

Kryshev I. I., Sazykina T.G.

Research and Production Association "Typhoon", Obninsk

We witness expanding the scientific basis of radiation protection of the natural environment. International databases to collect radiobiological effects on the non-human biota studied in many laboratories around the world, including Russia, were developed. Unique results of long-term radiobiological effects on the biota in territories of Russia contaminated with radionuclides were added to the international database FREDERICA (www.frederica-online.org). Concept of threshold effect of ionizing radiation on the biota was scientifically proven. Criteria for radiation safety of the natural ecosystems were developed as a result of experimental data examination. Standard models for assessment of dose-rates to referent non-human species were developed. Research into modeling radioecological effects on the non-human biota is carried out. Methodology for assessment of economical loss due to exposure of the natural ecosystem to radiation was developed. Radiotoxicity of alpha-emitters was found to be higher as compared with gamma ray-emitters. The method for assessment of ecological risk was tested in wide range of specific areas, such as territories contaminated with radionuclides as a result of the Kyshtym and Chernobyl accidents, areas in which Russian NPPs, radiochemical plants, and uranium production facilities are located. Regulatory documents and guidelines of assessment of radioecological effects, estimation of reference concentration of radioactive substances according to ecological criteria and measurement of background were developed. Despite the advances in radiation protection, a lot of scientific questions, such as necessity to use alpha radiation quality factor for doses to non-human biota, development of more detailed "dose-effect" scale for natural species belonged to different groups by reference to specific features of their metabolism; simulation and experimental study of ecological processes for estimating economical loss and population recovery following exposure to radiation; research into biological effects of ecological stressors other than radiation, need to be studied.

Key words: radiation protection, environment, ionizing radiation, biota, radioecological effects, dose, models, criteria for radiation safety, ecological risk, nuclear energy installations.

References

1. **Aleksakhin R.M.** *Nuclear Energy and the Biosphere*. Moscow, Energoizdat, 1982. 216 p. (In Russian).
2. **Polikarpov G.G.** Radiation ecology as a basis for radiation protection of the biosphere and the mankind. *Problemy radioekologii i pograniichnykh distsiplin – Challenges in Radioecology and Allied Disciplines*, Issue 8. Ekaterinburg, 2000, pp. 3-28. (In Russian).
3. **Kryshev I.I., Sazykina T.G.** Radiation safety of the biosphere: scientific and normative-methodical aspects. *Radioecological Readings dedicated to Academician V.M. Klechkovsky, 3 December, 2013*. Obninsk, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 2014, pp. 31-76. (In Russian).
4. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. 458 p.
5. ICRP, 2009. ICRP Publication 108. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 38, no. 4-6, 251 p.
6. **Sanzharova N.I.** Future development of radioecological investigations – new international projects. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 209-214. (In Russian).
7. **Thorne M.C.** Radioecology in Europe. *J. Radiat. Prot.*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. E5-E9.
8. **Muikku M., Beresford N.A., Garnier-Laplace J., Real A., Sirkka L., Thorne M., Vanderhove H., Willrodt C.** Sustainability and integration in radioecology – position paper. *J. Radiat. Prot.*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 152-163.

Kryshev I.I.* – Chief Researcher, D. Sc., Phys.-Math., Prof.; Sazykina T.G. – Chief Researcher, D. Sc., Phys.-Math. RPA "Typhoon".
*Contacts: 4 Pobedy str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249038. Tel.: +7 (484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

9. Guiding principles on the development and establishment of standards for maximum permissible air emissions of radioactive substances. Approved by Rostekhnadzor 7.11.2012, N 639. Moscow, Rostekhnadzor, 2012. 21 p. (In Russian).
10. Guidance for developing the standards of maximum permissible releases of radionuclides in water bodies by water users. Approved by Rostekhnadzor 22.12.2016, N 551. Moscow, Rostekhnadzor, 2016. 25 p. (In Russian).
11. Guidance MT 1.2.1.15.1176-2016. Development and approval of the standards for maximum permissible air emissions of radioactive substances by nuclear power plants. Moscow, AO «Concern Rosenergoatom», 2016. 76 p. (In Russian).
12. **Kryshev I.I., Sazykina T.G.** Radiation safety of the environment: request for harmonization of Russian and international regulation documents with consideration of Federal laws and new International Basic Safety Standards. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 47-61. (In Russian).
13. Recommendations R 52.18.820-2015. Assessment of radiation and environmental impacts on natural environment based on radiation monitoring data. Approved by the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet 17.04.2015. Obninsk, 2015. 60 p. (In Russian).
14. Recommendations R 52.18.852-2016. Estimation procedure for control levels of radionuclide content in marine waters. Approved by the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet, 17.08.2016. *Procedures for estimating the radionuclide control levels in environmental objects*. Obninsk, 2016, pp. 3-28. (In Russian).
15. Recommendations R 52.18.853-2016. Estimation procedure for control levels of radionuclide content in fresh water and soils. Approved by the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet, 17.08.2016. *Procedures for estimating the radionuclide control levels in environmental objects*. Obninsk, 2016, pp. 29-55. (In Russian).
16. Recommendations R 52.18-863-2017. Guidance for estimating the radiation background levels based on radiation monitoring data. Approved by the Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet, 29.05.2017. Obninsk, 2017. 35 p. (In Russian).
17. Practical recommendations on the issues of radiation impact assessment for humans and biota. Eds.: I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, SAM poligrafist, 2015. 265 p. (In Russian).
18. Radioecological situation in the regions of ROSATOM facilities. Eds.: I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, SAM poligrafist, 2015. 296 p. (In Russian).
19. **Zhuravskaya A.N.** Biological effects of small doses of ionizing radiation (review). *Nauka i obrazovaniye – Science and Education*, 2016, no. 2, pp. 94-102. (In Russian).
20. **Udalova A.A.** About dose-effect relationship in the environment radiation protection. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2015, vol. 55, no. 5, pp. 520-538. (In Russian).
21. **Aleksakhin R.M.** Topical ecological problems of nuclear energy. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2013, vol. 114, no. 5, pp. 243-249. (In Russian).
22. **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).
23. **Kazakov S.V., Linge I.I.** On hygienic and ecological approaches in radiation protection. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*. 2004, vol. 44, no. 4, pp. 482-492. (In Russian).
24. **Panov A.V., Sanzharova N.I., Geraskin S.A., Perevolotskaya T.V., Gordienko E.V., Mikhailova R.A.** Survey of international approaches to ensuring radiation safety of the public and environment during remediation of radioactively contaminated sites of former nuclear fuel cycle facilities. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 86-103. (In Russian).
25. **Panov A.V., Sanzharova N.I., Perevolotski A.N., Perevolotskaya T.V., Naumov V.S.** Analysis of the current national system of radiation safety of public and radiation protection of environment nearby facilities and

- sites outside the facilities, contaminated with artificial and natural radionuclides due to their past operation. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 107-121. (In Russian).
26. **Abalkina I.L., Panchenko S.V., Savkin M.N., Vedernikova M.V., Kryshev I.I.** Socially and ecologically acceptable criteria for rehabilitation of contaminated territories at disposal sites of special radioactive wastes. *Problemy radiatsionnoj bezopasnosti – Problems of Radiation Safety*, 2017, no. 3, pp. 46-52. (In Russian).
 27. **Kryshev I.I., Kryshev A.I., Panchenko S.V., Vedernikova M.V.** Remediation criteria for radioactively contaminated nuclear sites. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 1, pp. 33-42. (In Russian).
 28. **Kryshev I.I., Kuryndina L.A., Linge I.I.** Evaluation of environmental damage due to nuclear power. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2014, vol. 117, no. 3, pp. 159-164. (In Russian).
 29. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** EPIC database on the effects of chronic radiation in fish: Russian/FSU data. *J. Environ. Radioact.*, 2003, vol. 68, no. 1, pp. 65-87.
 30. **Sazykina T.G., Kryshev I.I.** Radiation effects in wild terrestrial vertebrates – the EPIC collection. *J. Environ. Radioact.*, 2006, vol. 88, no. 1, pp. 11-48.
 31. **Copplestone D., Hingston J., Real A.** The development and purpose of the FREDERICA radiation effects database. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 1456-1463.
 32. International radiobiology archives of long-term animal studies. Vol. 1. Description of participating institutions and studies. Washington, 1996. 486 p.
 33. **Birschwilks M., Gruenberger M., Adelmann C., Tapio S., Gerber G., Schofield P.N., Grosche B.** The European radiobiological archives: online access to data from radiobiological experiments. *Radiat. Res.*, 2011, vol. 175, no. 4, pp. 526-531.
 34. **Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Hosseini A.** New version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 153, pp. 141-148.
 35. IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards. Technical Report. Series No 332. Vienna, 1992. 334 p.
 36. US DOE. United States Department of Energy. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota. DOE-STD-1153-2002.U.S.DOE. Washington DC, 2002. 234 p.
 37. **Highley K.A., Kocher D.C., Real A.G., Chambers D.B.** Relative biological effectiveness and radiation weighting factors in the context of animals and plants. *Ann. ICRP*, 2012, vol. 41, no. 3-4, pp. 233-245.
 38. **Sazykina T.G., Kryshev A.I.** Lower thresholds for lifetime health effects in animals from high-LET radiation – comparison with chronic low-LET radiation. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 165, pp. 227-242.
 39. **Sazykina T.G., Kryshev A.I., Sanina K.D.** Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2009, vol. 48, pp. 391-404.
 40. **Alonzo F., Hertel-Aas T., Real A., Lance E., Garcia-Sanchez L., Bradshaw C., Vives i Batlle J., Oughton D., Garnier-Laplace J.** Population modelling to compare chronic external radiotoxicity between individual and population endpoints in four taxonomic groups. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 152, pp. 46-59.
 41. **Kryshev A.I., Sazykina T.G.** Modelling the effects of ionizing radiation on survival of animal population: acute versus chronic exposure. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2015, vol. 54, no. 1, pp. 103-109.
 42. Modelling of biota dose effects. Report of working group 6 Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS II) Programme. IAEA-TECHDOC-1737. Vienna, IAEA, 2014.
 43. **Monte L.** Predicting the effects of ionising radiation on biological populations: testing of a non-linear Leslie model applied to a small mammal population. *J. Environ. Radioact.*, 2013, vol. 122, pp. 63-69.
 44. **Sazykina T.G.** Population sensitivities of animals to chronic ionizing radiation – model predictions from mice to elephants. *J. Environ. Radioact.*, 2018, vol. 182, pp. 177-182.
 45. **Sazykina T.G., Kryshev, A.I.** Simulation of population response to ionizing radiation in ecosystem with a limiting resource – model and analytical solutions. *J. Environ. Radioact.*, 2016, vol. 151, pp. 50-57.

46. **Vives i Batlle J., Sazykina T., Kryshev A., Monte L., Kawaguchi I.** Inter-comparison of population models for the calculation of radiation dose effects on wildlife. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2012, vol. 51, no. 4, pp. 399-410.
47. NCRP, National Council on Radiation Protection and Measurements. Effects of ionizing radiation on aquatic organisms. NCRP Report N 109. Bethesda, Maryland, USA, 1991. 115 p.
48. UN, United Nations. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York, United Nations, 2011. 164 p.
49. **Garnier-Laplace J., Copplestone D., Gilbin R.** Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA integrated approach. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, pp. 1474-1483.
50. **Kryshev I.I., Sazykina T.G., Kryshev A.I.** Testing the radioecological criteria for environmental protection on the areas of South-Ural radioactive trace and locations of nuclear energy facilities. *Radioecological Readings dedicated to Academician V.M. Klechkovsky (30 November, 2017)*. Obninsk, Russian Institute of Radiology and Agroecology, 2017, pp. 29-58. (In Russian).
51. **Kryshev I.I., Ryazantsev E.P.** Environmental risk of the radiological accidents at Chernobyl and Fukushima (Japan) NPPs. *Atomnaya energiya – Atomic Energy*, 2017, vol. 122, no. 1, pp. 46-55. (In Russian).