На правах рукописи

Карпенко Евгений Игоревич

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ЧЕЛОВЕКА

03.01.01 – радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
доктора биологических наук

Обнинск – 2020

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Научный консультант −	доктор биологических наук, профессор, **Фесенко Сергей Викторович**
Официальные оппоненты:	**Сынзыныс Борис Иванович** - доктор биологических наук, профессор, Обнинский институт атомной энергетики – филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», профессор отделения ядерной физики и технологий
	Воронов Сергей Иванович - доктор биологических наук, профессор, ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка», Врио директора
	Мамихин Сергей Витальевич - доктор биологических наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, ведущий научный сотрудник кафедры радиоэкологии и экотоксикологии
Ведущая организация −	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун» Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета

Защита состоится “12” мая 2020 г. в _____часов на заседании диссертационного совета Д 006.068.01 при ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» по адресу: 248032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км, ФГБНУ ВНИИРАЭ. Телефон: +7 (484) 396-48-02

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ ВНИИРАЭ, адрес сайта: www.ds.rirae.ru

Автореферат разослан “___”_____2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета О.А. Шубина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Развитие ядерной энергетики как энергетической отрасли ставится мировой общественностью в прямую зависимость от решения экологических проблем. В настоящее время ядерная энергетика и атомная индустрия, в соответствии с принятыми критериями допустимого воздействия на окружающую среду, по общему мнению, принадлежат к числу сравнительно благополучных относительно других отраслей хозяйственной деятельности. Вместе с тем, как и в любой другой отрасли, для развития ядерной энергетики характерны проблемы, связанные с крупномасштабным воздействием на окружающую среду и человека. Корректная оценка этого воздействия позволит снизить социально – психологическую обеспокоенность населения, связанную с развитием ядерного энергетического комплекса, обеспечить население и средства массовой информации объективной информацией о состоянии экологической безопасности и способствовать решению экологических проблем.

В основе существующего в Российской Федерации регулирования радиационного воздействия на человека и окружающую среду, в настоящее время, лежит антропоцентрический подход, в основу которого положен принцип ограничения дозы на человека. При этом, объекты внешней среды рассматриваются как источники внешнего или внутреннего облучения человека, а содержание радионуклидов в них нормируется на основе дозовых пределов облучения человека (НРБ-99/2009). Предполагается, что при адекватной защите от действий ионизирующего излучения человека, защищена и окружающая его природная среда (Алексахин Р.М., Фесенко С.В., 2004). Это положение, впервые сформулированное явным образом в Публикации 26 Международной Комиссии по Радиологической Защите, звучит следующим образом «*Комиссия считает, что нормы контроля окружающей среды, необходимые для защиты человека в той мере, которая в данное время признается желательной, обеспечат безопасность и других биологических видов, хотя случайно их отдельным особям может быть причинен вред, но не до такой степени, которая представляла бы опасность для всего вида или нарушала бы баланс между видами*».

В последние 20-25 лет, наряду с антропоцентрический подходом, активно развивается и экоцентрический подход к радиационной защите человека и

окружающей среды. Это стало следствием осознания того, что выживание и качество жизни человека зависят от сохранения среды его обитания. Если антропоцентрический принцип во главу угла ставит охрану здоровья человека, то экоцентрический предполагает оценку воздействия ионизирующего излучения на наиболее чувствительные или подвергающиеся наибольшему воздействию, в силу образа жизни, элементы живой природы. При экологическом подходе в систему радиационной безопасности включается и человек, как неотъемлемый элемент биосферы. Поэтому экологический или интегрированный подход является более общим, включающим в себя антропоцентрический как свою составную часть. В такой трактовке экологический подход отражает современные тенденции в развитии научных и философских взглядов на эволюцию общества, науки и биосферы.

Смещение акцента с системы радиологической защиты, направленной исключительно на человека, на подход к безопасности ядерных технологий, органически включающий человека и природную среду, служит стимулом для развития регулирования в области обращения с ядерной энергией и исследований, направленных на оценку воздействия предприятий ядерного комплекса на человека и биоту (IAEA Safety Standards, 2014; ICRP Publication 103, 2007; Алексахин Р.М., Фесенко С.В., 2004). В то же время, отмеченные выше положения не отражены в полной мере в Российской национальной системе обращения с ядерными материалами и установками, что определяет высокую актуальность исследований, направленных на разработку научных и практических аспектов использования интегрированного подхода для оценки воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и окружающую среду.

Степень разработанности проблемы. Принципы и нормы ограничения радиационного воздействия на человека являются итогом более чем 100-летнего периода исследований и анализа результатов практического использования источников ионизирующих излучений. Основы радиационной защиты биоты, также как и научные основы использования экоцентрического подхода, разработаны существенно менее полно. Это касается и сути, и задач радиационной защиты живых организмов, а также критериев возможного

нормирования радиационного действия на биоту. Первоначальное предположение, сформулированное Международной Комиссией по радиологической Защите (ICRP Publication 60, 1990), заключалось в том, что биота, как правило, будет защищена, если адекватно будет защищен человек. Это предположение, однако, не имеет явных научных доказательств (UNSCEAR 2000). Более того, это противоречит руководящим принципам защиты окружающей среды от нерадиологических загрязнителей, где воздействие на биоту оценивается на основе оценки прямого воздействия (Bréchignac F. et al., 2003). Защищённость окружающей среды должна быть чётко продемонстрирована, независимо от присутствия или отсутствия людей (Pentreath R.J., 1999; Алексахин Р.М., Фесенко С.В., 2004).

Для оценки воздействия радиоактивного загрязнения на биоту должны рассматриваться разнообразные сценарии. Существуют примеры таких оценок в контексте реабилитации загрязнённых территорий (Whicker F.W. et al., 2004), захоронения радиоактивных отходов (Thorne M.C. et al., 2002) или аварий на атомных электростанциях (Fesenko S.V. et al., 2005, Warner F., Harrison R.M, 1993). В то же время сравнительный анализ защищённости человека и биоты до настоящего времени проводился для ограниченного круга ситуаций, что сдерживает дальнейшее развитие регулирования работы предприятий ядерной энергетики на основе интегрального подхода, учитывающего воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса и на человека, и на биоту.

Научная новизна. Впервые дана радиоэкологическая оценка воздействия различных предприятий ядерного энергетического комплекса, включая предприятие по добыче и обогащению урановой руды, атомные электростанции с разными видами реакторов, предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива на человека и окружающую среду на основе экосистемного подхода. Показано, что экологическая безопасность длительного функционирования предприятий в штатном режиме зависит от характеристик их выбросов и сбросов, а также климатических, почвенных и ландшафтных параметров территории их размещения. Выявлены «критические» референтные виды биоты, основные дозообразующие радионуклиды для предприятий разного типа и дана оценка вклада предприятий в их облучение. Проведено сравнение

облучения населения и биоты с природным естественным радиоактивным фоном. Оценена «неэквидозность» воздействия на человека и биоту в зонах предприятий по добыче и обогащению урановой руды, атомных электростанций с различными видами реакторов, предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива. Дано радиоэкологическое обоснование, основной парадигмы радиационной защиты биоты о защищенности биоты, когда защищен человек и оценены ситуации, когда эта концепция может быть использована в практической деятельности.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты исследований являются экспериментальной и теоретической основой для оценки последствий воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса, включая предприятия по добыче и обогащению урановой руды, атомные электростанции с разными видами реакторов, предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива на человека и окружающую среду на основе экосистемного подхода. Материалы исследований и разработанные методы использовались для экологической экспертизы строительства и расширения Белоярской АЭС, Балтийской АЭС, АО «Сибирский химический комбинат», а полученные результаты вошли составной частью в Технико-экономическое обоснование строительства (расширения) этих предприятий. Результаты выполненной работы вошли в основу разработанного Атласа радиоэкологической обстановки в 30-ти км зоне АО «Сибирский химический комбинат» (Адамов Е.О. и др., 2019). Площадка Сибирского химического комбинате является местом реализации проекта «Прорыв», выполняемого Госкорпорацией «Росатом». Проект «Прорыв» является основой создания в России замкнутого ядерного топливного цикла. В этой связи, работа автора диссертации имеет важное значение для экологического обоснования дальнейшего безопасного развития новой ядерной энергетики.

Цель диссертационной работы: оценка радиационного воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса (ЯЭК), включая предприятие по добыче урановой руды, атомные электростанции с разными типами

реакторов, предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива, на окружающую среду и человека.

Задачи исследования:

1. Усовершенствовать методологический подход к оценке воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на окружающую среду и человека на основе экоцентрического принципа радиационной защиты человека и окружающей среды.
2. Обосновать применение экоцентрической концепции радиационной защиты окружающей среды при оценке воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса и оценить границы (особенности) ее применения для оценки радиационного воздействия предприятия ЯЭК.
3. На примере типичных для различных этапов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) радиационно-опасных объектов, включая предприятие по добыче урановой руды, атомные электростанции с разными типами реакторов, предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива, оценить воздействие предприятий ЯТЦ на окружающую среду и человека, а также дать оценку существующей радиоэкологической ситуации на этих объектах.
4. Оценить природные и техногенные факторы, определяющие последствия долгосрочного функционирования предприятий ядерной энергетики для природной среды и человека.
5. Оценить «неэквидозность» радиационного воздействия на человека и биоту и границы применимости существующей парадигмы радиационной защиты окружающей среды о защищенности биоты, когда защищен человек.
6. Выявить «критические» виды биоты в районах расположения типичных предприятий ядерной энергетики, оценить значимость путей облучения человека и биоты в районах размещения типичных предприятий ядерной энергетики.

Методология и методы исследования: Диссертационные исследования проводились на основе комплексного подхода к оценке влияния предприятий ядерной энергетики на окружающую среду и человека. В качестве объектов исследования выбраны четыре предприятия, охватывающие основные стадии

ядерного топливного цикла, а именно: предприятие по добыче и обогащению урановой руды (ЛПО «Алмаз»), атомные электростанции с разными видами реакторов (Белоярская и Балтийская АЭС), предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива на человека (АО «Сибирский химический комбинат»). Несмотря на определенную уникальность каждого такого объекта, в работе предполагалось, что рассматриваемые предприятия являются типичными с точки зрения формирования радиоэкологической обстановки, и сделанные в настоящей работе оценки являются достаточно общими для выделенных типов предприятий. Полевые исследования и камеральные работы выполнялись в соответствии с действующими международными и национальными документами и стандартами. Для расчета доз облучения населения и биоты в зоне влияния предприятий ЯТЦ в работе широко использовались программные средства, разработанные ведущими международными организациями (МАГАТЭ, МКРЗ, ЕВРАТОМ).

Положения, выносимые на защиту:

1. Методология интегральной оценки радиационного воздействия предприятий по добыче урановой руды, атомных электростанций с разными типами реакторов, предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива, на окружающую среду и человека на основе экосистемного подхода.
2. Концепция радиационной защиты окружающей среды о том, что «если адекватно защищен человек, то биота, как правило, тоже защищена», применима при оценке воздействия на окружающую среду современных предприятий и может не соблюдаться при оценке воздействия предприятий более раннего поколения, и радиоэкологических ситуаций, связанных с наличием «радиационного наследия».
3. На территориях, прилегающих к предприятию по добыче урана (ЛПО «Алмаз») дозы на население определяются ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb и ^{210}Po. Для Белоярской АЭС (с реактором на быстрых нейтронах) к дозообразующим радионуклидам относятся ^{41}Ar, ^{14}C, ^{60}Co, ^{137}Cs, а для Балтийской АЭС (с водо-водяным энергетическим реактором) – ^{14}C, ^{3}H, ^{88}Kr.

4. Факторы, определяющие последствия функционирования предприятий ядерного энергетического комплекса можно разделить на природные (почвенно-климатическая зона) и техногенные (состав и количество радионуклидов в выбросе). При этом необходимо учитывать существующее облучение на площадке предприятия и наличие объектов «радиационного наследия».
5. Воздействие предприятий на человека и биоту является «неэквидозным». Дозы облучения биоты в большинстве случаев существенно выше доз облучения человека. В то же время, дозы облучения отдельных видов биоты могут быть ниже доз на человека, что позволяет обосновано сократить программу экологического мониторинга.
6. В зонах, где воздействие предприятий ЯЭК наиболее велико, к «критическим» видам биоты относятся водоплавающие птицы, крупные и мелкие млекопитающие, радиочувствительность которых, близка к радиочувствительности человека.
7. Вклад техногенных радионуклидов в облучение населения (за исключением ЛПО «Алмаз») находится в пределах вариабельности природного радиационного фона. При наличии на площадках объектов «радиационного наследия», облучение критических видов биоты в 5 и более раз может превышать естественный радиационный фон (ЕРФ).

Достоверность результатов. Полевые исследования и камеральные работы выполнялись аккредитованными лабораториями ФГБНУ ВНИИРАЭ. Достоверность результатов определяется применением современных методик и нормативных документов при проведении радиоэкологических исследований в районах размещения радиационно-опасных объектов. Для оценки воздействия радиации на биоту использовали международные руководящие и нормативные документы, такие как: Международные Стандарты Безопасности МАГАТЭ, Публикации Международной Комиссии Радиологической Защите, а также международные модели и программные средства. Анализ результатов выполнен с применением пакетов статистического анализа (MS Excel, Statistica), моделирования и аппроксимации экспериментальных данных.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 03.01.01 «Радиобиология», охватывающей проблемы радиочувствительности видов (п. 5), принципы и методы радиационного мониторинга, проблемы радиационной безопасности (п. 10), хроническое действие радиации (п. 11), в диссертационном исследовании представлены результаты по оценке воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и окружающую среду по данным выполненных радиоэкологических исследований и на основе нормализованных выбросов при длительном функционировании предприятий в штатном режиме. В диссертационном исследовании представлены результаты по оценке хронического воздействия радиации на биоту и человека с определением «критических» референтных видов биоты и основных дозообразующих радионуклидов в районах расположения предприятий разного типа.

Апробация работы. Основные результаты исследований были доложены на: V региональной научной конференции «Техногенные системы и экологические риск» (Обнинск, 2008 г.); IV всероссийской научно-практической конференции «Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий» (Сочи, 2008 г.); XI международной молодежной научной конференции «Полярное сияние 2008. Ядерное будущее: технологии, безопасность и экология» (Санкт-Петербург, 2008 г.); VII региональной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2010 г.); международной конференции «Чернобыль: опыт международного сотрудничества при ликвидации последствий аварии» (Обнинск, 2011 г.); международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены». (Санкт-Петербург, 2012 г.); II научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию атомной отрасли России «Экологическая безопасность АЭС» (Калининград, 2015 г.); международной научно-практической конференции «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления». (Обнинск, 2016 г.); молодежной конференции с международным участием, посвященной 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ (Обнинск, 2016 г.); третьей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая

безопасность АЭС» (Калининград, 2016 г.); I международной (XIV региональной) научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2017 г.); IV научно-практической конференции с международным участием «Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики» (Калининград, 2017 г.); международных XLVI Радиоэкологических чтениях им. В.М. Клечковского молодежный круглый стол «Современные проблемы радиобиологии и радиоэкологии», (Обнинск, 2017 г.); международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018» (Севастополь, 2018 г.); чтениях памяти академика Г.Г. Поликарпова (Севастополь, 2019 г.).

Личный вклад диссертанта в работу. Автор принимал непосредственное участие в получении исходных данных, организации и выполнении полевых работ в районах исследуемых объектов, получении и обработке экспериментальных данных, формулировке целей и задач исследований. Автором диссертационной работы самостоятельно выполнена статистическая обработка данных и проведен их анализ. Сформулированы основные положения работы и выводы, осуществлена подготовка публикаций по выполненной работе.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 68 печатных работ, в том числе 15 статей в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, выводов и списка использованной литературы, включающего 196 источников, из которых 104 на иностранном языке. Диссертация изложена на 317 страницах, содержит 61 таблицу и 109 рисунков.

Хочу выразить искреннюю и глубокую благодарность за помощь в подготовке диссертации научному консультанту, доктору биологических наук, профессору Фесенко С.В., а также доктору биологических наук, профессору Санжаровой Н.И., доктору биологических наук, профессору Спиридонову С.И., доктору биологических наук Панову А.В., доктору биологических наук Кузнецову В.К., кандидату биологических наук Исамову Н.Н., Нуштаевой В.Э, Микаиловой Р.А., Ратниковой Л.И. за помощь в проведении полевых и камеральных работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Воздействие предприятий ядерной энергетики на окружающую среду и человека

Выполнен анализ существующих данных о состоянии окружающей среды в районах расположения предприятий Госкорпорации РОСАТОМ, а также выбросов и сбросов этих предприятий. Показано, что наиболее существенное воздействия этих предприятий на окружающую среду и человека отмечается в районах размещения предприятий по добыче урановой руды ЛПО «Алмаз» и Приаргунского производственного горно-химического объединения, а также предприятий по переработке отработавшего ядерного топлива и производства оружейного плутония: ПО «Маяк», Сибирский химический комбинат и Красноярский горно-химический комбинат (ГХК). Выбросы радионуклидов на АЭС не превышают 3 % допустимых выбросов (ДВ) для АЭС с уран-графитовыми реакторами и 0,3 % − для АЭС с реакторами ВВЭР и реакторами на быстрых нейтронах.

На основе этого анализа выбраны четыре предприятия, включая предприятие по добыче и обогащению урановой руды (ЛПО «Алмаз»), атомные электростанции с разными видами реакторов (Белоярская и Балтийская АЭС) и предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива на человека (Сибирский химкомбинат).

В основе существующего в Российской Федерации регулирования радиационного воздействия на человека и окружающую среду в настоящее время лежит антропоцентрический подход, в основу которого положен принцип ограничения дозы на человека. При этом объекты внешней среды рассматриваются как источники внешнего или внутреннего облучения человека, а содержание радионуклидов в них нормируется по санитарно-гигиеническому принципу. В последние годы Международными организациями, отвечающими за безопасность ядерных установок и технологий (МАГАТЭ) развивается и экоцентрический или экологический подход к радиационной защите человека и окружающей среды. Многие элементы этого подхода уже включены в Стандарты безопасности МАГАТЭ. При экологическом подходе в систему радиационной

безопасности включается и человек как неотъемлемый элемент биосферы. В такой трактовке экологический подход отражает современные тенденции в развитии научных и философских взглядов на эволюцию общества, науки и биосферы.

Поскольку невозможно оценить воздействие радиоактивного загрязнения на популяции всех видов флоры и фауны, оценки выполняются для некоторых эталонных или референтных организмов, выбранных в качестве репрезентативных для рассматриваемой территории. В этом плане референтные организмы являются аналогом эталонного человека, используемого в радиационной защите. В частности, для оценки радиационного воздействия на биоту был предложен дифференциальный подход, учитывающий наиболее современную информацию, полученную при обобщении международных баз данных по эффектам на биоту.

В рамках диссертационной работы предложен методологической подход, включающий: основные положения, критерии оценки влияния предприятий Минатома на человека; критерии оценки влияния на окружающую среду; методы сравнительной оценки радиационного воздействия на человека и окружающую среду; этапы оценки влияния предприятий на человека и биоту и особенности организации радиоэкологических исследований в районах размещения объектов ядерной энергетики.

В рамках предложенного методологического подхода предполагается прямая оценка воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на биоту и человека для одинаковых сценариев выбросов и сбросов, и одинаковых баз данных, отражающих радиоэкологическую обстановку в районе размещения предприятий; использование концепций референтного человека и референтных растений и животных для оценки радиационного воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса; оценка воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на биоту и человека на основе данных, полученных для объектов, типичных для основных стадий ядерного топливного цикла; использование единых международно-признанных методик и программных средств для оценки воздействия выбросов и сбросов всех объектов ядерного энергетического комплекса на биоту и человека; использование дозовых

пределов, рекомендуемых международными организациями, в качестве критерия оценки воздействия на биоту и человека; использование величины естественного радиационного фона в качестве дополнительного критерия для оценки воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на биоту и человека. Для сравнительной оценки воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и биоту использован подход, основанный на анализе отношения доз облучения человека (D_h) и других биологических видов (D_b), к критическим дозам или дозовым пределам.

Глава 2. Проведение радиоэкологических исследований в районе размещения предприятий ядерного энергетического комплекса

В районах размещения каждого из исследуемых предприятий выполнялись: сбор, анализ и систематизация данных о радиационной обстановке в зоне наблюдения предприятия; создание базы радиоэкологических данных; выбор и описание пробных площадок для детальных исследований; отбор проб приземного слоя воздуха, компонентов наземных и водных экосистем, рациона кормления животных, а также производимой сельскохозяйственной продукции; подготовка и анализ отобранных проб на содержание радионуклидов. Данная программа радиоэкологических исследований адаптировалась, и конкретизировалась с учетом радиоэкологических особенностей территорий, подвергающихся воздействию.

В зоне влияния Лермонтовского производственного объединения «Алмаз» (ЛПО «Алмаз») в 2008 г. исследовались территории в районе размещения бывших рудников для добычи урановой руды (Рисунок 1). Пробы почв были взяты на отвалах штолен, были измерены плотности потоков β- и α-излучения, а также мощность дозы фотонного излучения. Отбор проб воды производился из водоемов, которые используются для орошения посевов и водопоя сельскохозяйственных животных. Взяты пробы молока и воды в реках Золотушка и Подкумок. Пробы донных отложений были взяты в районе штолен, в реке Золотушка и в роднике хвостохранилища, расположенного на территории предприятия.

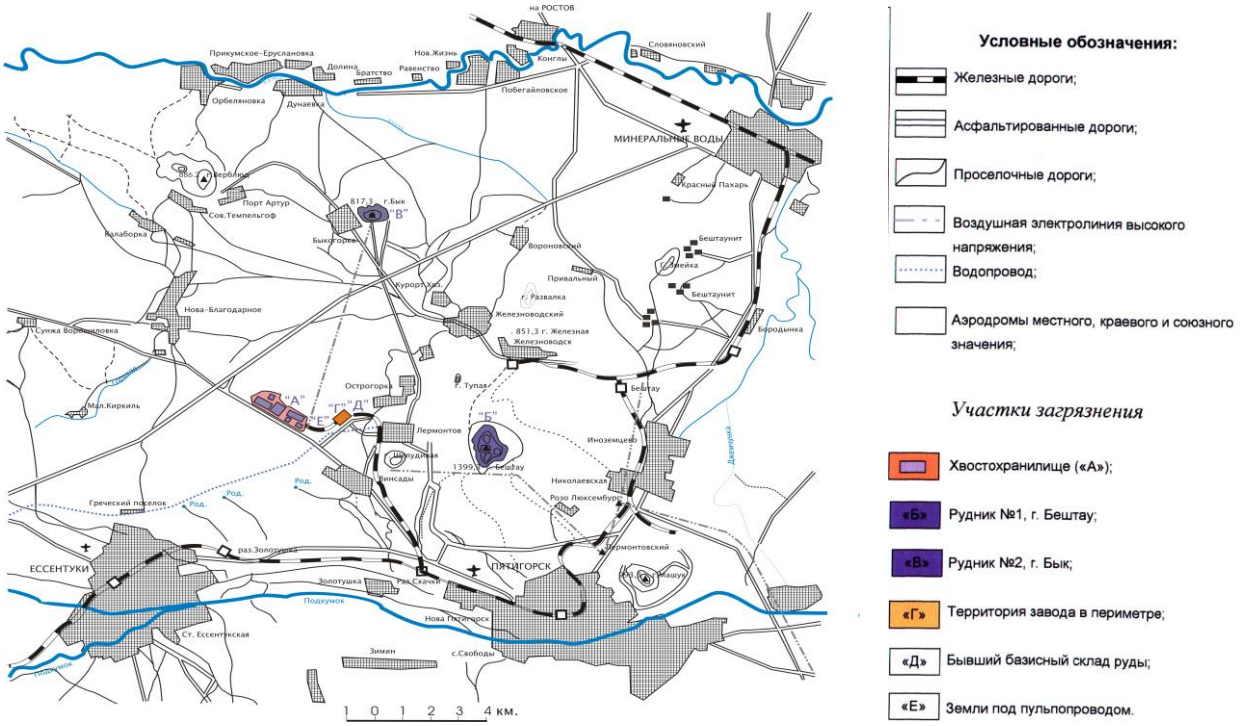

Рисунок 1 – Схема расположения предприятия ЛПО «Алмаз»

Радиоэкологические исследования в районе расположения Белоярской АЭС были проведены в 2013 году (рисунок 2).

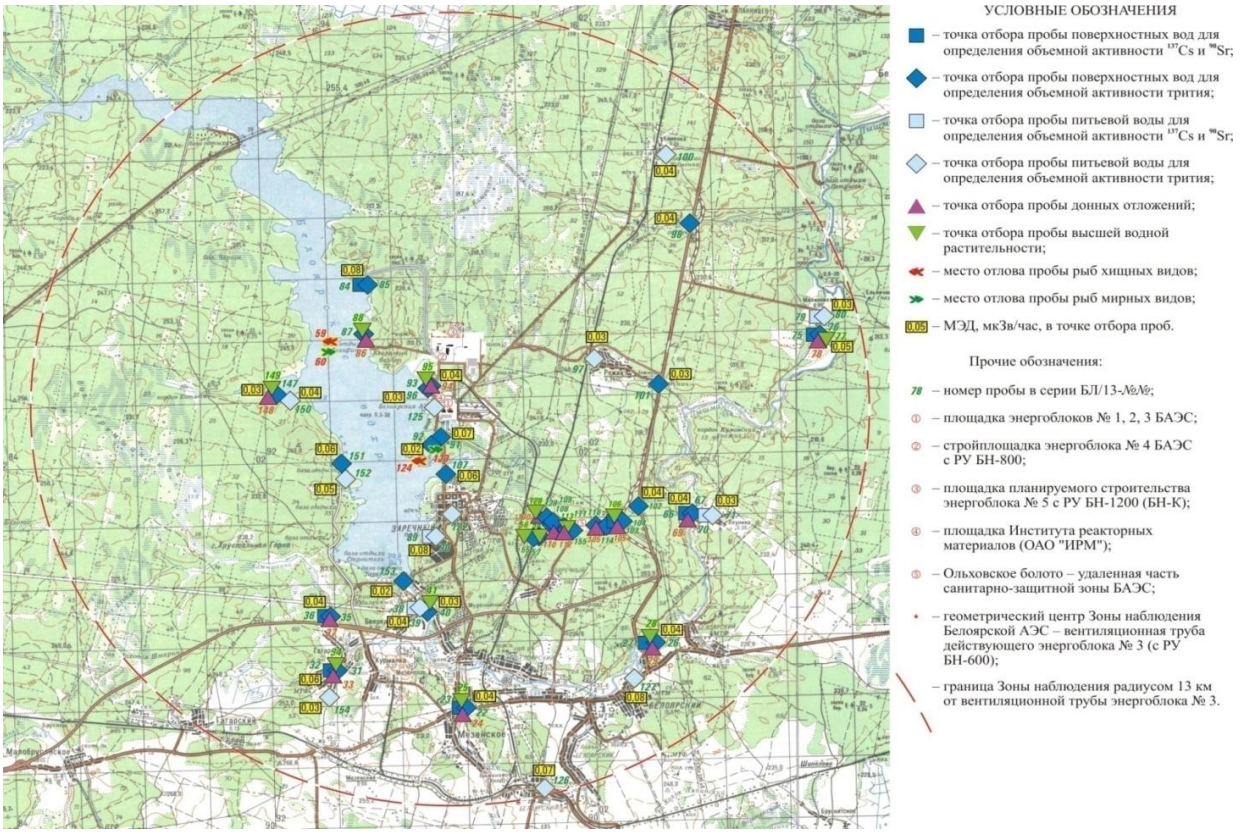

Рисунок 2 – Точки отбора проб компонентов водной экосистемы в Зоне наблюдения Белоярской АЭС.

В результате исследований были отобраны пробы аэрозолей приземного слоя атмосферы, пробы воды в поверхностном слое водоема, пробы рыбы, донных отложений и водной растительности. Отбор проб донных отложений производился путем отбора колонки отложений в местах их накопления, то есть в застойных прибрежных зонах.

Исследования, проведенные в 2014-2016 гг. в районе размещения Балтийской АЭС были направлены на оценку воздействия ядерного предприятия нового поколения на окружающую среду (рисунок 3). Для определения активности радиоизотопов цезия и стронция было отобрано пять проб поверхностных вод и пять проб питьевых вод объемом по 60 л каждая, а также одна проба поверхностных вод из р. Неман на содержание $^{239,\,240}$Pu. Во время экспедиционных работ в 13 точках были отобраны пробы донных отложений из рек и водоемов 30-ти км зоны Балтийской АЭС. Отбор проб рыбы осуществлялся в р. Неман. В р. Шешупе были отобраны пробы высшей водной растительности в том же месте, где осуществлялся отбор проб воды и донных отложений. Обследование 30-км зоны размещения Балтийской АЭС проводилось на основе картографического материала (рисунок 3). Отбор проб компонентов рациона кормления сельскохозяйственных животных осуществлялся на территориях агропредприятий и у частных лиц.

Площадка Сибирского химического комбината является местом реализации проекта «Прорыв», который является основой создания в России замкнутого ядерного топливного цикла. В результате предшествующей деятельности АО «СХК» в окружающей среде сохраняется остаточное количество радионуклидов. Точки отбора проб почвы, растений, поверхностных вод и донных отложений в результате проведенного в 2017 г. радиоэкологического исследования в 30-ти км зоне АО «СХК» представлены на рисунке 4. Всего было отобрано 50 проб поверхностных вод и донных отложений из рек и водоемов 30-ти км зоны АО «СХК». Также проведен отбор проб

компонентов наземных (природных и аграрных) экосистем, а также производимой в регионе сельскохозяйственной продукции и кормов.

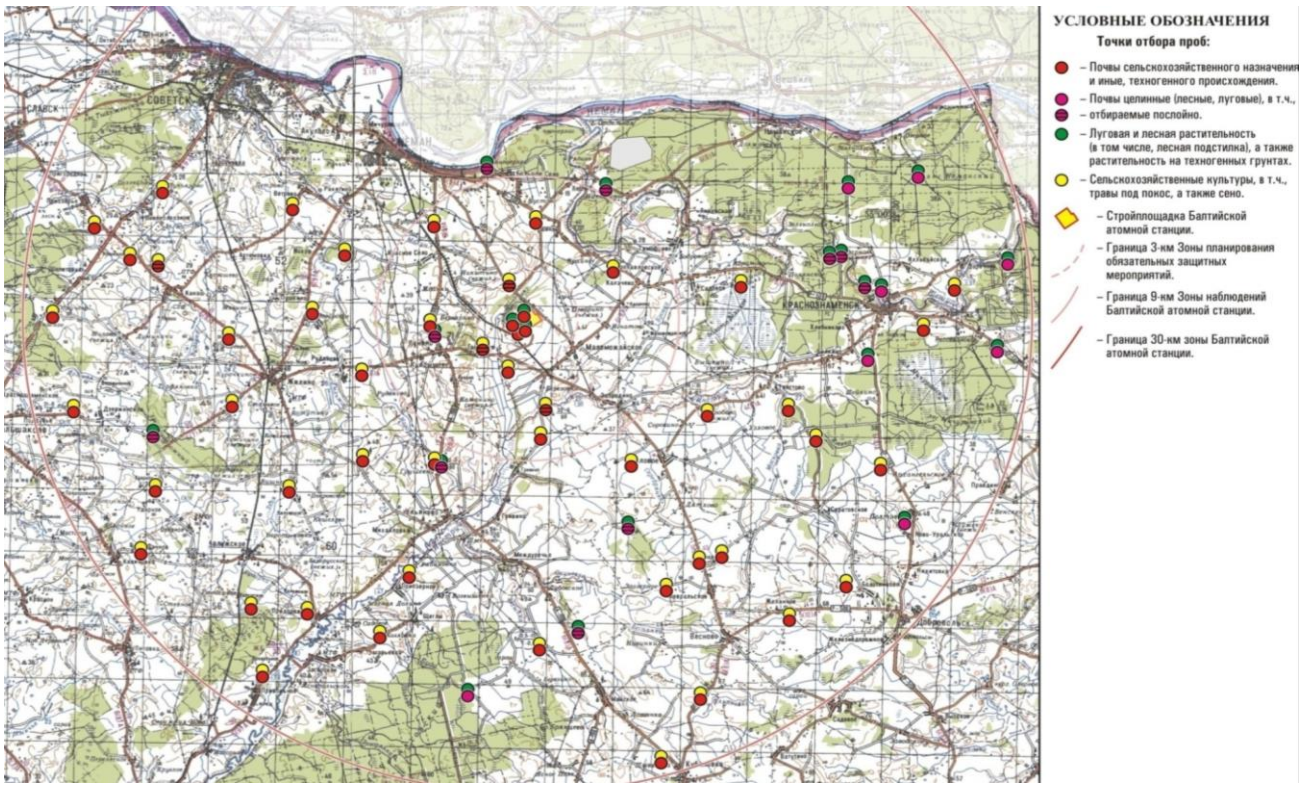

Рисунок 3 – Карта-схема отбора проб в 30-км зоне Балтийской АЭС

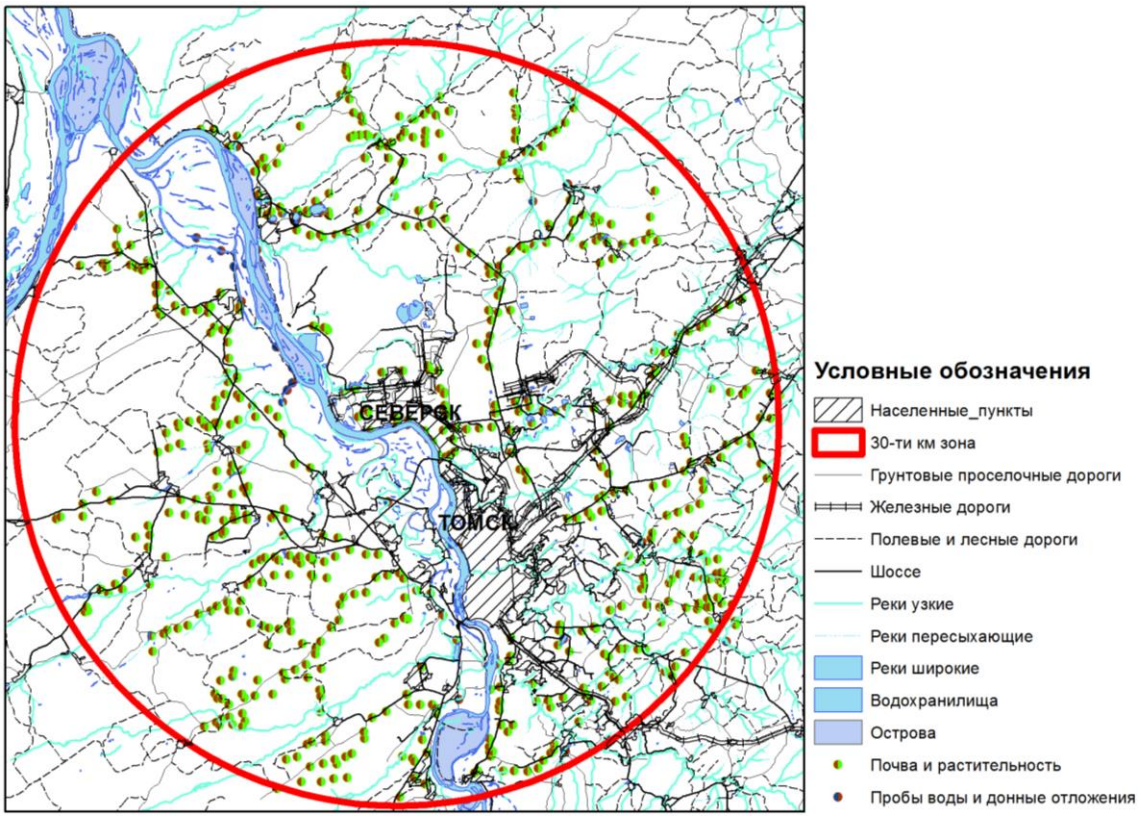

Рисунок 4 – Карта-схема отбора проб в 30-ти км зоне АО «СХК»

Глава 3. Методы и средства оценки доз облучения населения и биоты в результате функционирования предприятий ЯТЦ

Оценка дозовой нагрузки на население в результате радиоактивных выбросов в условиях нормальной эксплуатации и при аварийных ситуациях является комплексной задачей. Совокупность миграционных и дозиметрических моделей может быть представлена в виде единого программного пакета с интерфейсом пользователя или методических рекомендаций. К настоящему времени разработан ряд программных пакетов, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на человека и биоту. В рамках диссертационной работы выполнен анализ современных методов, моделей и программных средств, предназначенных для оценок облучения человека и биоты и дано обоснование программ, использованных для этих целей в диссертационной работе.

Принципиально важно, что территории, где размещаются предприятия ядерной энергетики и промышленности, существенно различаются по природно-климатическим условиям, что определяет различные радиологические ситуации и особенности в формировании доз на человека и биоту.

Программный пакет CROM, разработанный на основе стандарта МАГАТЭ SRS 19 (IAEA, 2001) позволяет выполнить оценку дозовых нагрузок на критические группы населения в рамках различных сценариев. В рамках возможных сценариев данного программного средства предусматриваются выбросы радионуклидов в атмосферу и радиоактивные сбросы в водные объекты (реки, эстуарии, морские береговые воды и озера или водохранилища). В последней версии программы возможность оценки доз на основании данных содержания радионуклидов в окружающей среде исключена. Поэтому для оценки годовой эффективной дозы (СГЭД) на население в данной работе использовали модель расчёта, представленную в МР 2.6.1.0063-12. 2.6.1.

Главной целью проекта ERICA (Экологический Риск от Ионизирующих Загрязнителей: Оценка и Управление) являлось создание методов для решения проблем, связанных с воздействием радиации на биоту. Подход базируется на принципах, разработанных в течение реализации предыдущих проектов – FASSET (Основные положения для Оценки Воздействия на Окружающую Среду) и EPIC (Экологические Риски от Ионизирующих Загрязнителей в

Арктике). Ввиду значительных объемов данных, используемых для оценок, был разработан вспомогательный расчётный инструмент – компьютерная среда (ERICA Tool). Эта программа представляет собой систему с гибким программным обеспечением, структура которой основана на комплексном подходе, используемого при оценке радиологического риска для биоты. Система предоставляет пользователям указания относительно порядка проведения оценки, записи информации, принятия решений, а также выполнения необходимых расчетов при определении рисков для конкретных животных и растений.

Глава 4. Описание объектов исследования: характеристики предприятий ядерной энергетики Российской Федерации

Уранодобывающее предприятие ЛПО «Алмаз» начало свою деятельность в 1950 г. как рудодобывающее, а с 1954 г. как рудоперерабатывающее предприятие. В состав Лермонтовского производственного объединения (ЛПО) «Алмаз» входили: два урановых рудника, гидрометаллургический завод, хвостохранилище. В результате производственной деятельности предприятия сформировались следующие объекты, содержащие радиоактивные отходы: отвалы рудника № 1 (Бештау); отвалы рудника № 2 (Бык); хвостохранилище. Хвостохранилище с проектным объемом 17 млн. м^3 заполнено отходами объемом 12 млн. м^3 (на 01.07.2000 г.). Объем отвалов добычи руд на г. Бештау достигает 2107,2 тыс. м^3, или 4425,1 тыс. т, а площадь, занятая отвалами составляет 360,9 тыс. м^2. Объем отвалов добычи руд на г. Бык достигает 1800,4 тыс. м^3, или 3961 тыс. т, площадь, занятая отвалами, − 184,1 тыс. м^2. Работы по рекультивации отвалов рудника №2 (гора Бык) проводились в период 1977-1999 гг.

Белоярская АЭС получила мировую известность в связи с многолетней успешной эксплуатацией быстрых реакторов. Белоярская АЭС рассматривается как АЭС прошлого поколения, на площадке которой находятся дополнительные радиационно-опасные объекты. Белоярская АЭС (БАЭС) расположена в 42 км к востоку от г. Екатеринбурга на восточном берегу Белоярского водохранилища, созданного на р. Пышме в качестве водоема-охладителя, и в 3 км к северу от г.

Заречный. На Белоярской АЭС эксплуатируются два энергоблока: энергоблок № 3 (вторая очередь) мощностью 600 МВт с реактором на быстрых нейтронах корпусного типа БН-600 с жидкометаллическим теплоносителем (введен в эксплуатацию в апреле 1980 г.) и энергоблок № 4 с реактором БН-800, который введен в промышленную эксплуатацию 31 октября 2016 г. В г. Заречном расположен АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) − бывший СФ НИКИЭТ, который имеет исследовательский реактор бассейного типа ИВВ-2М мощностью 15 МВт (эксплуатируется с 1966 г.). К источникам техногенного загрязнения района расположения Белоярской АЭС относятся не только выбросы АЭС, но и выбросы Института реакторных материалов.

Анализ воздействия **Балтийской АЭС** на окружающую среду и человека представляет интерес с точки зрения оценки воздействия нового водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1200 на окружающую среду, модернизированного с учётом опыта эксплуатации серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, наработавших более 130 реакторо-лет. Работы в рамках проекта создания нового реактора получили название проект «АЭС-2006». АЭС-2006 - проект российской атомной станции нового поколения «3+» с улучшенными технико-экономическими показателями. Площадка строительства Балтийской АЭС расположена на территории Неманского района Калининградской области в 120 км к востоку от г. Калининград, в 60 км от побережья Куршского залива, в 12 км к юго-востоку от г. Неман и государственной границы России с Литовской Республикой.

В таблице 1 представлен состав годового выброса радиоактивных газов и аэрозолей ОАО «ИРМ» с исследовательским реактором бассейного типа ИВВ-2М, Белоярской АЭС с реактором БН-800 и Балтийской АЭС с реактором ВВЭР-1200 (Отчеты по экологической безопасности, 2015-218 гг.).

Таблица 1 − Состав годового выброса радиоактивных газов и аэрозолей с радиационно-опасных объектов (Бк/год)

Радионуклид	ОАО «ИРМ»	Белоярская АЭС	Балтийская АЭС
ИРГ	$2{,}80 \cdot 10^{14}$	$6{,}07 \cdot 10^{12}$	$4{,}47 \cdot 10^{13}$
^{3}H	$1{,}20 \cdot 10^{8}$	$1{,}70 \cdot 10^{14}$	$3{,}90 \cdot 10^{12}$
^{14}C	$4{,}10 \cdot 10^{11}$	–	$3{,}00 \cdot 10^{11}$

Радионуклид	ОАО «ИРМ»	Белоярская АЭС	Балтийская АЭС
^{60}Co	$3,40 \cdot 10^{8}$	$6,20 \cdot 10^{5}$	$3,10 \cdot 10^{4}$
^{90}Sr	$2,90 \cdot 10^{6}$	$5,60 \cdot 10^{6}$	$6,00 \cdot 10^{2}$
^{131}I	$3,20 \cdot 10^{7}$	$2,60 \cdot 10^{7}$	$7,30 \cdot 10^{7}$
^{134}Cs	–	$3,40 \cdot 10^{5}$	$2,00 \cdot 10^{7}$
^{137}Cs	$3,10 \cdot 10^{8}$	$1,80 \cdot 10^{7}$	$3,00 \cdot 10^{7}$
^{239}Pu	$6,80 \cdot 10^{4}$	–	–
Сумма	$2,80 \cdot 10^{14}$	$1,76 \cdot 10^{14}$	$4,89 \cdot 10^{13}$

Выбросы ОАО «ИРМ», Белоярской АЭС и Балтийской АЭС характеризуются разным составом радионуклидов и их активностью. Максимально содержание в выбросах ОАО «ИРМ» приходится на ^{41}Ar, а в выбросах Белоярской АЭС и Балтийской АЭС – ^{3}H и ^{133}Xe соответственно. Суммарная активность выбросов в атмосферу от ОАО «ИРМ» в полтора раза больше, чем от Белоярской АЭС. Сравнивая атмосферные выбросы Белоярской АЭС с реактором БН-800 и Балтийской АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1200, можно сделать вывод о том, что суммарный выброс радионуклидов больше у Белоярской АЭС в 3 раза. Данная разница характеризуется в основном ^{3}H. Данный радионуклид при работе реактора БН-800 является преобладающим в атмосферных выбросах. Содержание ^{3}H в атмосферных выбросах при работе реактора БН-800 (Белоярская АЭС) на два порядка превышает его содержание в выбросах при работе реактора ВВЭР-1200 (Балтийская АЭС).

Основной задачей **Сибирского химического комбината** на протяжении многих лет, было получение обогащенного ^{235}U и ^{239}Pu для решения оборонных задач, изготовление компонентов ядерных зарядов, разборка и переработка компонентов зарядов, снятых с вооружения, в топливо для АЭС, регенерация отработанного на АЭС топлива, выработка для народного хозяйства электрической и тепловой энергии и производство различных товаров народного потребления. АО «Сибирский химический комбинат» является предприятием Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом». Сибирский химический комбинат обладает производством по обогащению урана, основанном на высокоэффективной и надежной газоцентрифужной технологии.

АО «СХК» является единственным предприятием в отрасли, где производится гексафторид урана для обогащения.

Глава 5. Радиоактивное загрязнение природных сред в районах расположения изучаемых предприятий ядерной энергетики

Основной целью полевых исследований, выполненных в 2013-2017 гг., являлось оценка радиоэкологической обстановки в районе размещения радиационно-опасных объектов и получение для оценки доз на человека и биоту информации учитывающей специфику предприятий и особенностей природной среды, влияющие на перенос радионуклидов в окружающей среде.

Особенностью радиоэкологической ситуации в зоне влияния **уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз»** является то, что формирование дозовых нагрузок на человека и биоту определяется естественными тяжёлыми радионуклидами. Вследствие достаточно быстрого поступления тяжёлых естественных радионуклидов (ТЕРН) в живые организмы, широкого их распространения в окружающей среде и нахождения в доступных для усвоения растениями и животными формах, тяжелые естественные радионуклиды могут представлять существенную опасность для биоты.

Анализ результатов наших исследований на территории, прилегающей к бывшему предприятию ЛПО «Алмаз», позволил выделить объекты, в непосредственной близости от которых наблюдается повышенное содержание радионуклидов в компонентах природных экосистем. Шахтная вода, вытекающая из некоторых штолен (концентрация ^{238}U в воде составляла около 90 Бк/кг), используется для водопоя крупного рогатого скота (КРС), а растительность на отвалах (концентрация ^{226}Ra − 18 Бк/кг) является частью рациона кормления рогатого скота. Шахтные воды применяются для полива садовых участков, в результате чего содержание ^{238}U в почве достигало 140 Бк/кг. Наиболее загрязнённая радионуклидами территория расположена в непосредственной близости от штольни, шахтная вода которой используется для полива садовых участков и содержит ^{238}U с концентрацией, достигающей 1300 Бк/кг. Содержание ^{238}U в районе этой штольни в высохшем и зарастающем растительностью пруде отстойнике, достигало $2{,}2 \cdot 10^5$ Бк/кг. В состав луговой

экосистемы, формирующейся на месте высохшего пруда, входят травянистые растения, почвенные организмы, наземные пресмыкающиеся и различные по видовому составу мелкие грызуны.

Содержание радионуклидов в компонентах окружающей среды в районе расположения **Белоярской** и **Балтийской** АЭС представлено в таблице 2. Сравнивая содержание радионуклидов в компонентах окружающей среды в районе расположения Балтийской и Белоярской АЭС, можно сделать вывод о том, что среднее значение содержания естественных радионуклидов сохраняется на уровне фоновых значений.

В то же время содержание искусственных радионуклидов в окружающей среде района расположения Балтийской АЭС ниже, чем на территории Белоярской АЭС.

Таблица 2 − Содержание радионуклидов в компонентах окружающей среды в районе расположения Белоярской АЭС и Балтийской АЭС

Радионуклид	Белоярская АЭС	Балтийская АЭС	Отношение средних значений Белоярская АЭС/Балтийская АЭС
	Активность		
Воздух, Бк/м^3			
^{7}Be	$1{,}4\cdot10^{-3}$	$2{,}9\cdot10^{-3}$	$4{,}8\cdot10^{-1}$
^{40}K	$1{,}0\cdot10^{-4}$	$5{,}1\cdot10^{-5}$	1,9
^{90}Sr	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$3{,}3\cdot10^{-7}$	$5{,}1\cdot10^{-1}$
^{137}Cs	$1{,}0\cdot10^{-6}$	$8{,}9\cdot10^{-7}$	1,1
^{226}Ra	$2{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-5}$	$2{,}0\cdot10^{-1}$
^{228}Ra	$3{,}0\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{-5}$	$3{,}0\cdot10^{-1}$
^{239}Pu	$3{,}9\cdot10^{-8}$	$1{,}6\cdot10^{-8}$	2,4
Сумма	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$7{,}0\cdot10^{-2}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$
Удельная активность радионуклидов в почве, Бк/кг сухого веса			
^{137}Cs	$4{,}60\cdot10^{1}$	$1{,}90\cdot10^{1}$	2,4
^{40}K	$3{,}10\cdot10^{2}$	$5{,}40\cdot10^{2}$	$5{,}74\cdot10^{-1}$
^{226}Ra	$2{,}10\cdot10^{1}$	$2{,}20\cdot10^{1}$	$9{,}55\cdot10^{-1}$
^{232}Th	$3{,}70\cdot10^{1}$	$2{,}20\cdot10^{1}$	1,7
Поверхностная вода, Бк/м^3			
^{90}Sr	6,4	3,8	1,7
^{137}Cs	$2{,}20\cdot10^{1}$	3,5	6,3
^{3}H	$5{,}70\cdot10^{1}$	$1{,}80\cdot10^{3}$	$3{,}17\cdot10^{-2}$

Радионуклид	Белоярская АЭС	Балтийская АЭС	Отношение средних значений Белоярская АЭС/Балтийская АЭС
	Активность		
Удельная активность радионуклидов в донных отложениях, Бк/кг сухого веса			
^{137}Cs	$4{,}10 \cdot 10^{2}$	1,6	$2{,}56 \cdot 10^{2}$
^{226}Ra	$1{,}30 \cdot 10^{1}$	$1{,}40 \cdot 10^{1}$	$9{,}29 \cdot 10^{-1}$
^{228}Ra	$1{,}50 \cdot 10^{1}$	$2{,}00 \cdot 10^{1}$	$7{,}50 \cdot 10^{-1}$
^{40}K	$2{,}60 \cdot 10^{2}$	$4{,}50 \cdot 10^{2}$	$5{,}78 \cdot 10^{-1}$

Так, например, в воздухе и воде зоны наблюдения Балтийской АЭС среднее содержание ^{137}Cs на порядок ниже, чем на исследуемой территории Белоярской АЭС. Среднее содержание ^{137}Cs в почве в районе Балтийской АЭС ниже в два раза, чем в почве 30-км зоны Белоярской АЭС. В продуктах питания активность искусственных радионуклидов также ниже в районе Балтийской АЭС по сравнению с Белоярской АЭС.

Содержание естественных радионуклидов в районе расположения **Сибирского химического комбината**, соответствует обычному радионуклидному составу поверхностных слоев почв. Среднее содержание ^{137}Cs в почвах 30 км зоны АО «СХК» составляло 13 Бк/кг, а максимальное содержание - 255 Бк/кг.

Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениях находилось в диапазоне от <0,2 Бк/кг до 58,5 Бк/кг и 1,0 до 18,1 Бк/кг соответственно. Содержание $^{239,240}Pu$ в растительности находилось в диапазоне от $0{,}6 \cdot 10^{-2}$ до 0,14 Бк/кг. Максимальное содержание ^{137}Cs было обнаружено в грибах и составляло 41,3 Бк/кг, а ^{90}Sr в шиповнике – 1,14 Бк/кг. Максимальное значение содержания ^{137}Cs в поверхностных водах зарегистрировано в р. Томь, а ^{90}Sr в оз. Мальцево – 0,5 и 0,15 Бк/дм^3 соответственно. Значения объёмной активности $^{239,240}Pu$ в поверхностных водах по данным исследований находились в диапазоне от $4{,}4 \cdot 10^{-6}$ до $126 \cdot 10^{-6}$ Бк/дм^3.

Значения объёмной активности трития в поверхностных водах 30-ти км зоны АО «СХК» по данным исследований находились в диапазоне от 1,2 до 2,6 Бк/дм^3. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях водоёмов 30-ти км зоны АО «СХК» в среднем составляло 37 Бк/кг. Уровень активности ^{90}Sr и $^{239,240}Pu$ в

донных отложениях варьировало в диапазоне от ≤1,12 Бк/кг до 76,72 Бк/кг и от 0,15 до 10,31 Бк/кг соответственно.

Проведённые исследования в районах размещения предприятий ядерного энергетического комплекса позволили оценить **различия в миграционной способности радионуклидов**. Сравнение миграционных показателей для всего многообразия растительности является отдельной важной и интересной научной проблемой. Вследствие этого, в настоящей работе на основе данных главы 4 были выбраны реперные виды растений, которые присутствовали на большинстве рассматриваемых предприятий. К ним были отнесены: пшеница (как представитель сельскохозяйственных растений), злаковое разнотравье (как представитель полуприродных экосистем) и папоротник (как представитель природных экосистем)

В качестве критерия сравнения миграционной способности были выбраны коэффициенты накопления растений, которые рассчитывались как отношение концентрации радионуклида в растениях к концентрации этого радионуклида в корневой зоне почвы. Сравнение проводилось по коэффициентам накопления ^{40}K, ^{90}Sr и ^{137}Cs, во многом определяющих дозы облучения населения и природных организмов в районах воздействия рассматриваемых предприятий (таблица 3).

Таблица 3 − Средние значения коэффициентов перехода в реперные виды растительности в районах, прилегающих к рассматриваемым объектам

Радионуклиды	ЛПО «Алмаз»	Белоярская АЭС	Балтийская АЭС	АО «Сибирский химкомбинат»
Злаковый травостой				
^{40}K	1,1±1,2	0,50±0,1	0,73±0,57	1,11±0,51
^{90}Sr	0,19±0,12	0,3±0,07	0,62±0,41	1,9±1,2
^{137}Cs	0,08±0,04	0,15±0,05	0,23±0,08	0,44±1,95
Пшеница				
^{40}K			0,38±0,26	0,47±0,25
^{90}Sr	0,04±0,02	0,3±0,2	0,5±0,3	0,4±0,3
^{137}Cs	0,01±0,005	0,1±0,06	0,2±0,2	0,16±0,26
Папоротник				
^{40}K		2,46±2,41	1,8±1,5	1,6±0,56
^{90}Sr		1,1±0,2	2,7±2,3	4,1±3,4
^{137}Cs		0,3±0,2	1,43±1,4	0,48±0,54

Анализ данных таблицы 3 по коэффициентам накопления в соответствии с почвенно-географическим районированием территорий показала, что в целом соблюдается тенденция снижения коэффициентов накопления при движении с севера на юг и с востока на запад, что обусловлено сменой малоплодородных почв более легкого механического состава на более плодородные тяжелые почвы. В большинстве случаев более высокие значения коэффициентов накопления техногенных радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs сельскохозяйственными и полуприродными растениями отмечались на площадке АО «Сибирский химкомбинат», а минимальные значения характерных для территорий, прилегающих к предприятию по добыче урана ЛПО «Алмаз». Коэффициенты накопления растениями в районе Балтийской АЭС несколько выше, чем коэффициенты накопления, измеренные для района Белоярской АЭС. Это связано с более тяжелым механическим составом почв, характерных для зоны Белоярской АЭС.

В целом проведённый анализ показывает, что в зависимости от региона размещения предприятия ядерного энергетического комплекса миграционная способность радионуклидов в системе почва-растения может в 3-5 раз отличаться. Это определяет различный вклад в облучение биоты как естественных, так и техногенных радионуклидов.

Глава 6. Сравнительный анализ воздействия предприятий ядерной энергетики на окружающую среду и человека

Для оценки воздействия ядерных предприятий на окружающую среду и человека важную роль играют пути облучения населения и биоты, регион размещения предприятия, количество и состав радионуклидов, характерных для конкретных предприятий атомной отрасли. В рамках настоящих исследований оценка воздействия рассматриваемых предприятий на человека и биоту выполнялась как на основе результатов проведённого радиоэкологического обследования, так и на основе данных о существующих и планируемых выбросов атомных электростанций. Для оценки доз облучения человека использовались программа CROM и МР 2.6.1.0063-12. 2.6.1., а для оценки доз облучения

референтных организмов биоты программа ERICA, описанные в третьей главе диссертации.

Для оценки воздействия рассматриваемых предприятий на человека и биоту использовался подход на основе сравнения индексов радиационного воздействия, то есть отношения доз облучения человека или референтных организмов биоты к дозовым пределам. Данные, полученные в результате проведённых исследований представлены в таблицах 4 и 5.

Дозы облучения референтного человека, рассчитанные по данным обследования для региона размещения предприятий, варьируют от 0,028 до 6,7 мЗв в год. Дозы на «критические» виды биоты на этих площадках колебались от 0,23 до $2{,}6 \cdot 10^4$ мГр/год, при этом дозы рассчитаны на основе данных радиоэкологического обследования были не всегда связаны с современной деятельностью собственно предприятия.

Дозы потенциального облучения населения (доза на референтного человека) на территории, непосредственно прилегающей к ЛПО «Алмаз», достигает без учёта фона 6,7 мЗв в год. Эта величина значительно превышает нормативные пределы и выше пределов колебания ЕРФ в этом регионе.

Таблица 4 − Дозы облучения населения в зонах наблюдения рассматриваемых предприятий

Предприятие	Доза, мЗв/год	RIF	Дозообразуюшие радионуклиды
По данным радиоэкологического обследования			
ЛПО «Алмаз»	6,7	6,7	^{226}Ra,^{230}Th,^{210}Pb и ^{210}Po
Белоярская АЭС	0,13	0,13	^{137}Cs
Балтийская АЭС	0,032	0,032	^{137}Cs
АО «СХК»	0,028	0,028	^{137}Cs
По данным выбросов и сбросов			
Белоярская АЭС	0,015	0,015	^{3}H
ИРМ	0,11	0,11	^{41}Ar, ^{14}C, ^{60}Co, ^{137}Cs
Балтийская АЭС	0,002	0,002	^{14}C, ^{3}H, ^{88}Kr

Таблица 5 − Дозы облучения критических видов биоты, в зонах наблюдения рассматриваемых предприятий

Предприятие	Доза, мГр/год	RIF	Критический организм	Дозообразуюшие радионуклиды
По данным радиоэкологического обследования				
ЛПО «Алмаз»	$1{,}7\cdot10^{3}$	$1{,}0\cdot10^{2}$	Водоплав. птицы	^{226}Ra,^{210}Po,^{230}Th и ^{238}U
Белоярская АЭС	2,54	$13{,}9\cdot10^{-2}$	Млекопитающие	^{137}Cs и ^{90}Sr
Балтийская АЭС	0,23	$1{,}24\cdot10^{-2}$	Млекопитающие	^{137}Cs и ^{90}Sr
АО «СХК»	8,1	0,44	Водоплав. птицы	^{137}Cs и ^{90}Sr
По данным выбросов и сбросов				
Белоярская АЭС	0,036	$2{,}0\cdot10^{-3}$	Млекопитающие	^{3}H
ИРМ	0,057	$3{,}2\cdot10^{-3}$	Млекопитающие	^{41}Ar, ^{14}C, ^{60}Co, ^{137}Cs
Балтийская АЭС	0,0057	$3{,}2\cdot10^{-4}$	Млекопитающие	^{14}C, ^{3}H,^{88}Kr

Наибольшие дозовые нагрузки на биоту отмечены в непосредственной близости от ЛПО «Алмаз». Дозы на травянистую растительность могут достигать 7,6 Гр/год, дозы на водные растения могут превысить 26 Гр/год, а дозы на водоплавающих птиц 1,7 Гр/год. В то же время, наибольшему радиационному воздействию подвергаются водоплавающие птицы, радиочувствительность которых выше, чем у рассматриваемых видов.

Доза облучения сельского и городского населения в районе расположения Белоярской АЭС, оценённая по данным содержания техногенных радионуклидов в компонентах окружающей среды, полученных в ходе радиоэкологического обследования, составляет 0,13 и 0,09 мЗв/год соответственно. Дозовая нагрузка от естественного радиационного фона существенно выше − 2,1 мЗв/год для сельского населения и 1,9 мЗв/год для городского населения. Таким образом, вклад в дозу техногенных радионуклидов составляет около 15 %. В то же время годовая эффективная доза облучения населения от выбросов Белоярской АЭС составляет 15 мкЗв, а вклад в дозу Института реакторных материалов составляет 109 мкЗв/год. Суммарно, эта величина достаточно близка (несколько меньше) дозы облучения, оценённой по данным радиоэкологического обследования, что подтверждает корректность выполненных оценок.

В существующих условиях наибольшие дозы получают придонные виды рыб и водные растения, которые составляют 33,0 и 26,2 мГр/год. Дозы на крупных млекопитающих составляют 2,5 мГр/год. В то же время, индекс радиационного воздействия, рассчитанные для референтных видов биоты, находится в диапазоне от $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ – $5{,}2 \cdot 10^{-3}$, то есть в диапазоне величин существенно ниже критических значений. В районе расположения Белоярской АЭС наибольшие значения фактора радиационного воздействия характерны для крупных млекопитающих.

Существующие дозы облучения населения в районе Балтийской АЭС от техногенных радионуклидов находятся на уровне около 0,032 мЗв/год, при этом в случае ввода в эксплуатацию Балтийской АЭС эта величина может достигнуть 0,034-0,035 мЗв/год. В работе показано, что увеличение техногенного фона в случае ввода Балтийской АЭС в эксплуатацию будет в 5-10 раз ниже годовой дозы от выбросов Белоярской АЭС, что связана как с повышением эффективности новых ядерных установок, так и с более эффективной очисткой выбросов и сбросов, поступающих в окружающую среду.

Дозы на референтные виды биоты варьируют от $7{,}0 \cdot 10^{-3}$ (на водные растения) до 0,25 мГр/год (на амфибии), при этом ввод в эксплуатацию АЭС не изменит этих значений. Дозы на млекопитающих (наиболее радиочувствительный вид) (0,25 мГр/год) будут также достаточно низки, подтверждая, что природные виды будут адекватно защищены от воздействия предприятия.

Суммарная доза от внутреннего и внешнего облучения населения, проживающего в районе расположения АО «Сибирский химический комбинат», от радионуклидов техногенного происхождения, значительно ниже установленного НРБ-99/2009 дозового предела облучения населения 1 мЗв/год, и составляют 0,029 мЗв/год. Дозы на референтные виды биоты в зоне расположения АО «Сибирский химкомбинат» варьируют в широких пределах от 0,49 мГр/год для насекомых до 12,3 мГр/год для амфибий. В целом, дозы на водные организмы существенно выше доз на наземные виды. Так дозы, на водоплавающую птицу составили 8,1 мГр/год, а на рыбу 3-5 мГр/год в зависимости от условий обитания. Учитывая, довольно высокую

радиочувствительность водоплавающей птицы, она была отнесена к критическим видам региона Сибирского химкомбината. Достаточно большие дозы облучения наземных видов биоты отмечены для крупных млекопитающих 3,1 мГр/год, несколько меньшие дозы характерны для мелких млекопитающих 2,2 мГр/год.

При оценке последствий радиоактивного загрязнения важное значение имеет «неэквидозность» воздействия на человека и биоту. Как правило, природные организмы получают существенно большие дозы по сравнению с человеком при одинаковом загрязнении окружающей среды (рисунок 5).

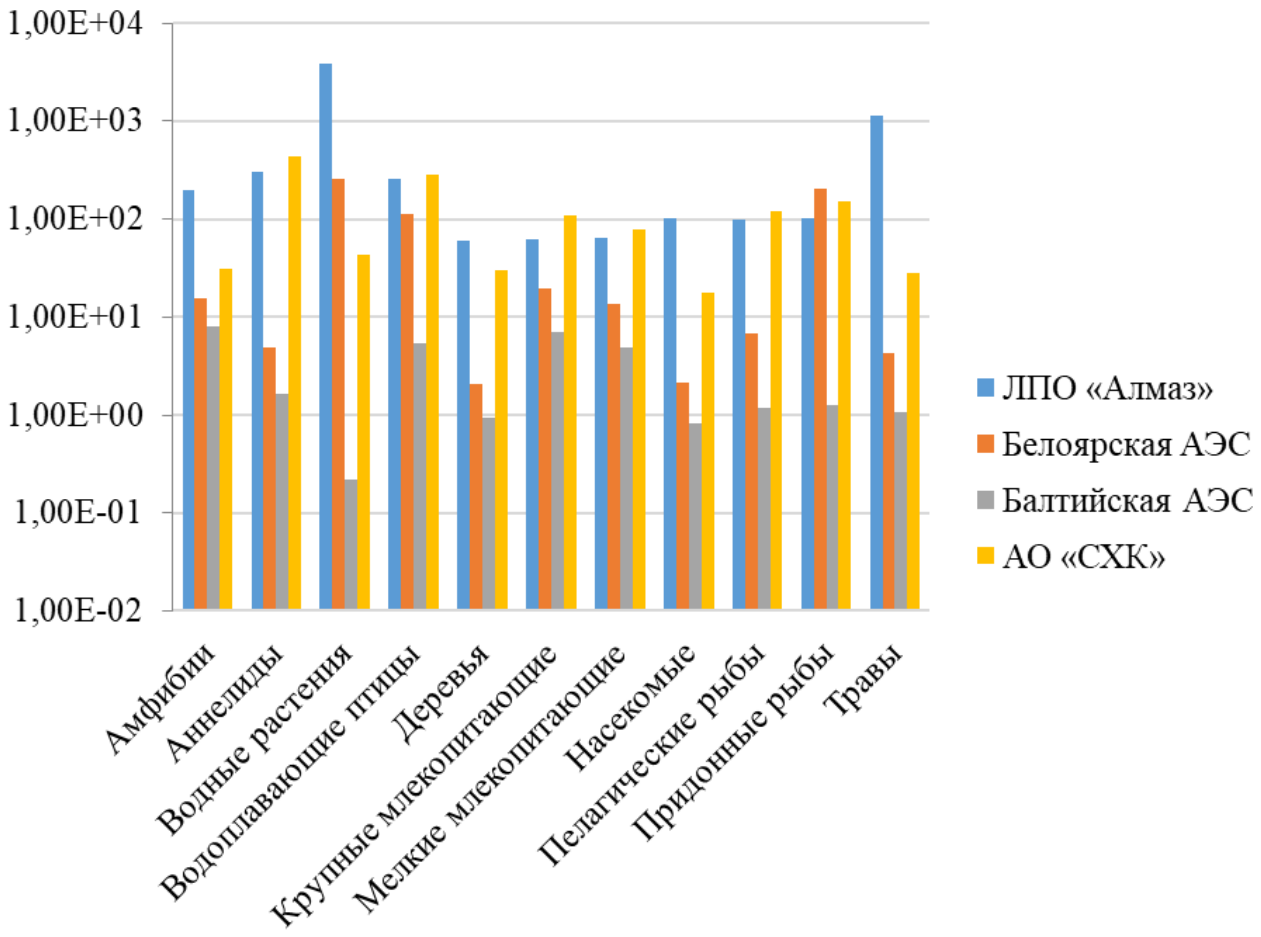

Рисунок 5 – Отношения доз облучения референтных видов биоты к дозам облучения референтного человека

На рисунке 5 представлены отношения доз облучения референтных видов биоты к дозам облучения референтного человека, рассчитанные на основе данных, полученных в результате исследований. Видно, что для большинство

рассмотренных радиоэкологических ситуаций дозы на биоту существенно выше доз на человека.

Исключением является Балтийская АЭС, где рассчитанные дозы на референтного человека в отдельных случаях больше, чем дозы на биоту. В первую очередь, это может быть объяснено чрезмерным консерватизмом, используемым при оценке доз на человека в ситуации планового облучения.

Наибольшие значения этого отношения отмечаются для территорий, прилегающих к ЛПО «Алмаз». В меньшей степени это отмечается для АО «Сибирский химкомбинат» и площадки Белоярской АЭС. Таким образом, существенное нарушение «эквидозности» характерно для радиоэкологических ситуаций, связанных с «радиационным наследием», тогда как для современных ядерно-физических установок дозы, рассчитанные на человека, практически во всех случаях меньше, чем дозы на биоту.

Важным аспектом является и сравнительный анализ индексов радиационного воздействия для человека и биоты, рассчитанных для различных радиоэкологических ситуаций (рисунок 6).

Данные, представленные на рисунке 6, показывают, что за исключением площадки по добыче урановой руды − ЛПО «Алмаз», для одних и тех-же радиологических ситуаций, индексы радиационного воздействия, рассчитанные для человека, превышают индексы радиационного воздействия для многих референтных видов биоты.

Следует отметить, что для другого предприятия ядерного цикла − Сибирского химического комбината, индексы, рассчитанные для некоторых видов биоты, таких как водоплавающая птица, мелкие и крупные млекопитающие также превышают индексы радиационного воздействия, рассчитанные для человека. Это позволяет сделать вывод о том, что тезис о защищённости биоты в ситуациях, когда защищён человек имеет радиоэкологическое обоснование и может использоваться для стадии генерирования «ядерной» энергии. В то же время этот принцип может нарушаться для других этапов ядерного топливного цикла и соответствующие оценки должны проводиться как для человека, так и для биоты.

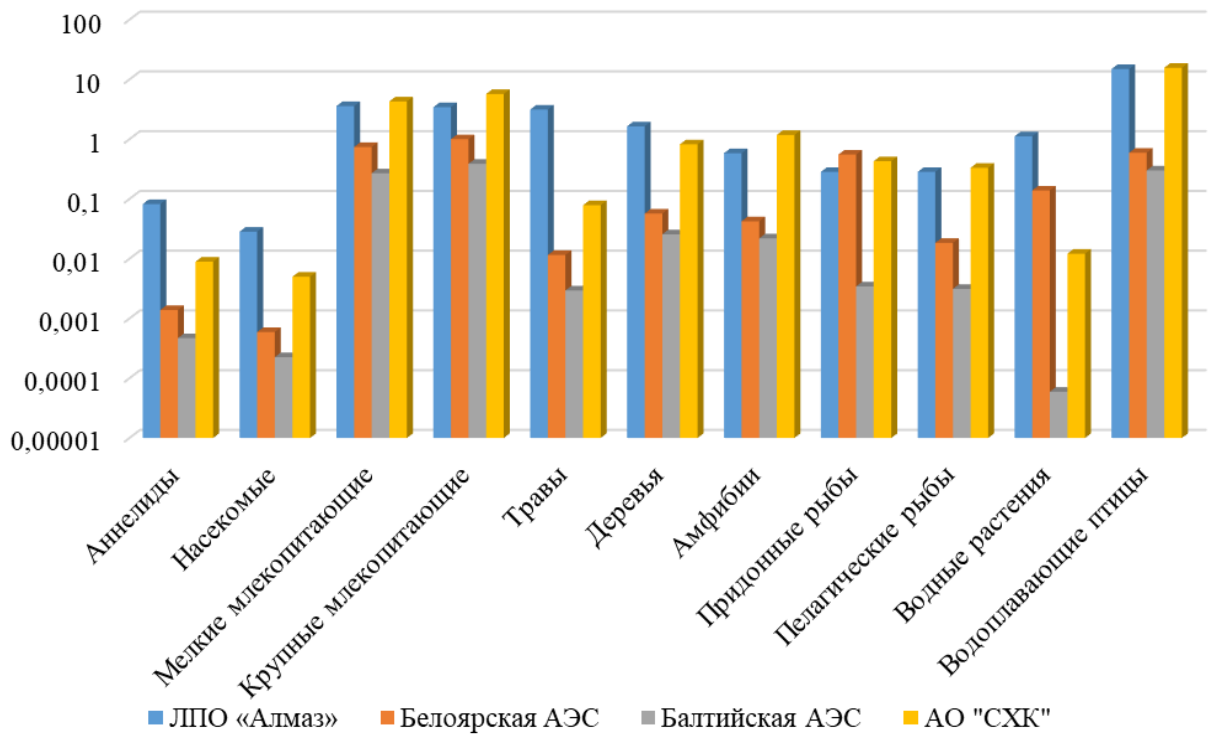

Рисунок 6 – Отношения индексов радиационного воздействия для референтных видов биоты к индексам радиационного воздействия для референтного человека

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основу современного подхода к обеспечению радиационной безопасности окружающей среды положен принцип ограничения дозовых нагрузок на человека. При этом компоненты экосистем рассматриваются как источники внешнего или внутреннего облучения населения, а содержание радионуклидов в них нормируется по санитарно-гигиеническому принципу. Принципы и нормы ограничения радиационного воздействия на человека являются итогом длительного периода исследований и обобщения результатов применения ядерно-физических установок и других источников ионизирующих излучений. Основные принципы радиационной защиты человека и биоты изложены в материалах Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) и использованы при разработке международных и национальных документов, регулирующих радиационную защиту человека в большинстве стран мира.

В настоящей работе оценка воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и биоту выполнялась как на основе

результатов радиоэкологического обследования, так и на основании существующих и планируемых выбросов атомных электростанций. Такой подход позволяет оценить воздействие на человека и биоту для широкого круга радиоэкологических ситуаций, а также сравнить воздействие на человека и биоту в условиях существующего планового облучения (на примере Балтийской АЭС).

Для районов размещения исследуемых объектов ядерного энергетического комплекса (предприятие по добыче и обогащению урановой руды, атомные электростанции с разными видами реакторов – реактор на быстрых нейтронах и водо-водяной энергетический реактор, предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива) выявлены «критические» виды референтных организмов. К ним были отнесены водоплавающие птицы, крупные и мелкие млекопитающие. В первую очередь это связано с высокой радиочувствительностью этих организмов, которая сравнима с радиочувствительностью человека, а также особенностями питания и поведения отмеченных видов.

Дозообразующие радионуклиды (радионуклиды, которые вносили определяющий вклад в облучение человека и биоты) существенно отличались для изучаемых объектов и рассматриваемых радиоэкологических сценариев. Для предприятия по добыче и обогащению урановой руды (ЛПО «Алмаз») основной вклад в облучение населения вносили продукты деления ^{238}U, в частности ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb и ^{210}Po. В результате технологических операций равновесие между дочерними продуктами было смещено, и дозы от образовавшейся смеси продуктов деления на единицу активности ^{238}U отличались от доз, характерных для природной смеси продуктов деления этого радионуклида. Для площадок Белоярской и Балтийской АЭС, дозообразующие радионуклиды, оценённые для ситуации существующего облучения (^{137}Cs и ^{90}Sr), отличались от дозообразующих радионуклидов, связанных с существующими и планируемыми выбросами и сбросами. Так, для Белоярской АЭС (реактор на быстрых нейтронах) к ним были отнесены ^{41}Ar, ^{14}C, ^{60}Co, ^{137}Cs, а для Балтийской АЭС (водо-водяной энергетический реактор) - ^{14}C, ^{3}H, ^{88}Kr.

Вклад предприятий в облучение населения (за исключением ЛПО «Алмаз») находится в пределах вариабельности природного радиационного

фона. Так, вклад техногенных радионуклидов в районах размещения атомных электростанций с разными типами ядерных установок варьировался от 1 до 5%. При этом вклад собственно предприятий составлял от 0,08% (планируемые выбросы Балтийской АЭС) до 4% (ИРМ, расположенном на площадке Белоярской АЭС). Для предприятия по добыче и обогащению урановой руды вклад в дозу на население от прошлой деятельности предприятия может превышать естественный радиационный фон (ЕРФ) в 2,5 раза. Существенно превышал ЕРФ вклад техногенных радионуклидов в облучение «критических» видов биоты, достигая наибольших значений более 5 раз, в ситуациях формируемых «радиационным наследием». В то же время вклад предприятий в облучение биоты (за исключением ЛПО «Алмаз») был менее 5%.

Суммарная доза облучения населения, проживающего в районе расположения АО «Сибирский химический комбинат», за счет радионуклидов техногенного происхождения, составляет 0,029 мЗв/год. Дозы на референтные виды биоты в зоне расположения АО «Сибирский химкомбинат» варьируются в широких пределах от 0,49 мГр/год до 12,3 мГр/год. Основными дозообразующими радионуклидами являются ^{137}Cs, ^{90}Sr.

Отмечена существенная «неэквидозность» облучения человека и биоты в одинаковых радиоэкологических ситуациях. «Неэквидозность» определялась как характеристиками выбросов, так и особенностями существующего загрязнения территорий, прилегающих к объектам. Для территорий, прилегающих к исследуемым объектам, дозы облучения биоты были от 8 (Балтийская АЭС) до 4000 (ЛПО «Алмаз» и АО «Сибирский химический комбинат») раз выше доз облучения человека. При этом различия в дозах облучения критических видов биоты и человека за счет собственно выбросов предприятий были существенно меньше, а дозы облучения критических видов биоты были только до трех раз больше доз облучения человека, что может быть объяснено избыточным консерватизмом, используемым при оценке доз в ситуации планового облучения.

За исключением площадки предприятия по добыче и обогащению урановой руды, индексы радиационного воздействия, рассчитанные для одних и тех же радиологических ситуаций, для человека превышают индексы

радиационного воздействия для всех референтных видов биоты, что подтверждает обоснованность тезиса о защищённости биоты в ситуациях, когда защищён человек. В то же время, показано существование радиоэкологических ситуаций, когда эта парадигма не выполняется. В основном такие ситуации связаны с неадекватным обращением с радиоактивными отходами и отмечаются для референтных организмов, радиочувствительность которых близка к человеку.

Результаты настоящей работы показывают, что воздействие предприятий ядерной энергетики в ряде случаев может быть достаточно существенным и требует проведения экологического мониторинга и корректной оценки последствий их длительного функционирования. В первую очередь, к таким объектам относятся предприятия по добыче и обогащению урановой руды, а также предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива. Необходимость проведения таких исследований связана и с определёнными изменениями в международном регулировании обращения с ядерной энергией, определяющего необходимость прямой демонстрации отсутствия эффектов радиационного воздействия на популяции природных организмов.

ВЫВОДЫ

1. Экоцентрический подход к радиационной защите окружающей среды, органически включающий человека и природную среду, позволяет получить более полную и корректную оценку воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса, включающих предприятия по добыче и обогащению урановой руды, атомные электростанции с разными видами реакторов, предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива, без существенного увеличения необходимых ресурсов.
2. Применение экоцентрического подхода к оценке воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса показывает, что воздействие на «критические» виды биоты в зонах предприятий по добыче урановой руды и переработке ядерного топлива превышают (индексы радиационного воздействия $1{,}0 \cdot 10^2$ и 0,44) воздействие на человека (индексы радиационного воздействия 6,7 и 0,028). Таким образом, в рассматриваемой

радиоэкологической ситуации при значении индекса радиационного воздействия для человека равного единице, индекс радиационного воздействия для биоты был бы равен $1{,}5 \cdot 10^1$ и $1{,}6 \cdot 10^1$, то есть принцип о защищенности биоты в ситуациях, когда защищена окружающая среда нарушается.

3. При оценке воздействия выбросов и сбросов предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и биоту необходимо учитывать существующее облучение (т. е. облучение, существующее на площадке до начала строительства или расширения объекта) и наличие объектов «радиационного наследия».
4. К основным дозообразующим радионуклидам на территориях, прилегающих к предприятию по добыче и переработке урановой руды (ЛПО «Алмаз») относятся продукты деления ^{238}U, в частности ^{226}Ra, ^{230}Th, ^{210}Pb и ^{210}Po. При этом равновесие между дочерними продуктами было смещено, а дозы от образовавшейся смеси продуктов деления на единицу активности ^{238}U отличаются от доз характерных для природной смеси продуктов деления этого радионуклида. Для АЭС с реактором на быстрых нейтронах к ним относятся ^{41}Ar, ^{14}C, ^{60}Co, ^{137}Cs, а для Балтийской АЭС (водо-водяной энергетический реактор) - ^{14}C, ^{3}H, ^{88}Kr.
5. Основной вклад в дозу облучения населения от атмосферных выбросов в районе Белоярской АЭС вносит внутреннее облучение (99 % от суммарной дозы), в районе Балтийской АЭС (82 % от суммарной дозы), в районе института реакторных материалов вносит внешнее облучение (57 % от суммарной дозы). «Критическими» продуктами питания для населения являются мясо и молоко.
6. К числу основных факторов, определяющих степень радиационного воздействия предприятий ядерного энергетического комплекса на человека и биоту, относятся как природные факторы (климатические характеристики, почвенные параметры, ландшафтные и экосистемные особенности территорий), так и техногенные факторы (радионуклидный состав, характеристики выбросов и сбросов). При этом роль техногенных факторов выше, чем природных.

7. Существенное нарушение «эквидозности» характерно для радиоэкологических ситуаций, связанных с «радиационным наследием», тогда как для современных ядерно-физических установок дозы, рассчитанные на человека, практически во всех случаях меньше, чем дозы на биоту.
8. К «критическим» видам биоты, для которых отмечалось наибольшее отношение доз облучения к дозовым пределам, относятся водоплавающие птицы (предприятия по добыче урановой руды и переработке ядерного топлива), а также крупные и мелкие млекопитающие (для исследуемых АЭС).
9. Дозы облучения «критических» видов биоты в районах воздействия выбросов рассматриваемых предприятий в большинстве случаев были существенно выше доз облучения человека. В то же время, дозы облучения отдельных видов биоты (насекомые, почвенные организмы), формируемые непосредственно выбросами предприятий, были ниже доз на человека в силу особенностей поведения этих организмов в окружающей среде.
10. Вклад техногенных радионуклидов в облучение населения (за исключением ЛПО «Алмаз») находится в пределах вариабельности естественного (природного) радиационного фона (ЕРФ) и варьирует от 1 до 5%. При этом вклад собственно предприятий составлял от 0,08% (планируемые выбросы Балтийской АЭС) до 4% (ИРМ, расположенном на площадке Белоярской АЭС и АО «Сибирский химический комбинат»).
11. В радиоэкологических ситуациях, связанных с наличием на площадках объектов «радиационного наследия» (предприятие по добыче урановой руды - ЛПО «Алмаз»), вклад радионуклидов в облучение «критических» видов биоты более чем в 5 раз превышает естественный радиационный фон, что определяет необходимость оценок воздействия на природную среду отдельно от предприятия и объекта радиационного наследия.
12. Полученные в процессе исследований результаты относятся к конкретным предприятиям Госкорпорации Росатом, которые в настоящей работе были выбраны в качестве представительных для отрасли, с точки зрения формирования радиоэкологических последствий. В то же время,

полученные результаты носят общий характер и могут быть эффективно использованы для обоснования радиоэкологической безопасности и оптимизации системы экологического мониторинга и на других предприятиях ядерного энергетического комплекса.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

В изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. Fesenko S. Radionuclide transfer to freshwater biota species: Review of Russian language studies / S. Fesenko, J. Fesenko, N. Sanzharova, **E. Karpenko** and I. Titov // Journal of Environmental Radioactivity. – 2011, No. 102. – P. 8-25. WOS: 000285174200002
2. Fesenko S. Radionuclide transfer to marine biota species: Review of Russian language studies / S. Fesenko, J. Fesenko, I. Titov, **E. Karpenko**, N. Sanzharova, A.M. Gondin Fonseca, J. and Brown // Journal of Radiation and Environmental Biophysics. – 2010, No. 49. – P. 531-547. WOS:000283504900003
3. **Karpenko E.I.** Evaluation of the effect of radiation on the biota within the regions of the Leningradskaya and Beloyarskaya NPPS / **E.I. Karpenko**, S.I. Spiridonov, V.E. Kurtmulaeva, N.I. Sanzharova, A.V. Panov, P.N. Tsygvintsev // Atomic Energy. – 2016, Vol. 119, No. 3. – P. 213-217. WOS: 000367090300009
4. **Karpenko E.I.** Radioecological survey of terrestrial and aquatic ecosystems in the area of the Siberian group of chemical enterprises / **E.I. Karpenko**, V.K. Kuznetsov, N.N. Isamov, V.M. Solomatin, A.V. Thomson, L.I. Ratnikova // Radiation and Risk. – 2019, Vol. 28, No. 3. – P. 63-71. DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-3-63-74
5. **Karpenko E.I.** Estimated radiation doses to the population from exposure to routine atmospheric releases during long-term operation of the Leningrad NPP-2 / **E.I. Karpenko**, S.I. Spiridonov, V.E. Kurtmulaeva // Radiation and Risk. – 2018, Vol. 27, No. 2. – P. 20-27. DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-2-20-27
6. Mikailova R.A. Estimation and Prediction of the Population Irradiation Dose in the Vicinity of NPP with VVER-1200 / R.A. Mikailova, V.E. Nushtaeva, S.I. Spiridonov, **E.I. Karpenko**, V.V. Krechetnikov // Atomic Energy. – 2019, Vol. 127, № 1. – P. 56-59. DOI: 10.1007/s10512-019-00584-4
7. Sanzharova N.I. Complex radioecological monitoring in the vicinity of radiation hazardous facilities as an integral part of the unified system of state environmental monitoring / N.I. Sanzharova, A.V. Panov, V.K. Kuznetsov, N.N. Isamov, **E.I. Karpenko**, E.V. Gordienko, R.A. Mikailova // Izvestiya Wysshikh Uchebnykh Zawedeniy, Yadernaya Energetika. – 2019, № 1. – P.131-142. DOI: 10.26583/npe.2019.1.12
8. Sharpan L.A. Estimation of the radiation dose to the public due to atmospheric emissions from the Rostov NPP / L.A. Sharpan, **E.I. Karpenko**, S.I. Spiridonov // Atomic Energy. – 2011, Vol. 115, № 3. – P. 197-200. WOS: 000329224400009
9. Spiridonov S.I. Ranking of radionuclides and pathways according to their contribution

to the dose burden to the population resulting from NPP releases / S.I. Spiridonov, **E.I. Karpenko**, L.A. Sharpan // Radiatsionnaia biologiia, radioecologiia. – 2013, Vol. 53, № 4, P. 401-410.

10. Spiridonov S.I. The dose estimation of woody plants in the long-term after the Chernobyl NPP accident / S.I. Spiridonov, S.V. Fesenko, S.A. Geras'kin, V.M. Solomatin, **E.I. Karpenko** // Radiatsionnaia biologiia, radioecologiia. – 2008, Vol. 48, № 4, P. 432-438.
11. Tetenkin V.L. Estimation of radiation non-regulatory stochastic risks for meadow plants of the Semipalatinsk test site / V.L. Tetenkin, S.I. Spiridonov, M.K. Mukusheva, **E.I. Karpenko** // J. Radioprotection. – 2009, Vol. 44, No. 5. – P. 259-264. DOI: 10.1051/radiopro/20095050

В других изданиях, входящих в перечень ВАК

12. **Карпенко Е.И.** Радиоэкологическая обстановка в районе размещения бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз» / **Е.И. Карпенко**, Н.И. Санжарова, С.И. Спиридонов, И.С. Серебряков // Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра «Радиация и риск». – 2009, Т. 18, №4. – С. 73-82.
13. **Карпенко Е.И.** Расчет дозовых нагрузок на биоту в районе расположения уранодобывающего предприятия на основе комплекса дозиметрических моделей / **Е.И. Карпенко**, С.И. Спиридонов // Вестник РАЕН. – 2012, № 4. – С. 52-59.
14. **Карпенко Е.И.** Оценка доз облучения населения и природных объектов на территории, прилегающей к предприятию по добыче и переработке урановых руд / **Е.И. Карпенко**, С.И. Спиридонов, Н.И. Санжарова // Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра «Радиация и риск». – 2012, Т. 21, №2. – С. 46-53.
15. Нуштаева В.Э. Оценка и прогнозирование воздействия атмосферных выбросов Белоярской АЭС на референтные организмы биоты / В.Э. Нуштаева, Р.А. Микаилова, С.И. Спиридонов, **Е.И. Карпенко**, С.Н. Нуштаев, В.В. Кречетников // АгроЭкоИнфо. – 2019, №3. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/3/st_332.doc.

В сборниках статей и материалах конференций:

1. Sanzharova N.I. Engineering and environmental survey and environmental monitoring in the areas of NPP construction and operation: work experience in Russia and abroad / Sanzharova N.I., Panov A.V., Isamov N.N., **Karpenko E.I.**, Mikailova R.A., Kurtmulaeva V.E. // BOOK OF ABSTRACTS – The ninth international conference Modern problems of nuclear physics and nuclear technologies (Uzbekistan, Tashkent, September 24-27, 2019). Institute of Nuclear Physics, Academy of Sciences of Uzbekistan, 2019. – P. 392.
2. Spiridonov S.I. Dose Estimation to Meadow Ecosystem Plants in the Vicinity of a Facility for Uranium Ore Mining / Spiridonov S.I., **Karpenko E.I.**, Solomatin V.M., Sanzharova N.I. // Book of Abstracts – IX Radiation Physics and Protection Conference (Egypt, Cairo, November 15-19, 2008). National Network of Radiation Physics, Egyptian Atomic Energy Authority, 2008. – P. 46-47.
3. Адамов Е.О., Алексахин Р.М., Иванов В.К., Спирин Е.В., Соломатин В.М., Сорокин И.Б., Живаго А.И., Орлова Т.Н., Полянская Н.В., Пронина Л.И., Рыжова

Л.И., Марадудин И.И., Раздайводин А.Н., Радин А.И., Ромашкин Д.Ю., Рябинков А.П., Белов А.А., Санжарова Н.И., **Карпенко Е.И.** [и др.]. Атлас радиоэкологической обстановки в 30-ти км зоне АО "СХК". - М.: АО "Прорыв", 2019. – С. 120.

4. Алексахин Р.М. Агроэкологический мониторинг, технологии и информационно-методическое обеспечение сельскохозяйственного производства на техногенно загрязненных территориях / Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Быданова В.В., Грудин Н.С., Грудина Н.В., Жигарева Т.Л., Иванов В.В., Исамов Н.Н., **Карпенко Е.И.** [и др.]. // Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2013. – С. 208.
5. Андреева Н.В. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем в районе расположения Балтийской АЭС / Андреева Н.В., **Карпенко Е.И.**, Кузнецов В.К., Нуштаев С.Н. // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем – 2019. – Т. 30, № 1-2. – С. 105-120.
6. **Карпенко Е. И.** Сравнительная оценка доз облучения биоты в районе расположения предприятий ядерного топливного цикла / **Карпенко Е. И.**, Куртмулаева В. Э., Спиридонов С. И. // Сборник трудов третьей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая безопасность АЭС» (Калининград, 19–20 октября 2016 г.). Калининград: Изд-во Аксиос, 2016. – С. 94-97.
7. **Карпенко Е.И.** Оценка доз облучения природных объектов в районе расположения предприятия по добыче и переработке урановых руд / **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И., Санжарова Н.И. // Материалы Международной конференции (Бишкек, 6-9 июня 2011 г.). Иссык-Куль: Изд-во Аврора, 2011. – С. 75-77.
8. **Карпенко Е.И.** Сравнительная оценка доз на биоту в районах расположения Ленинградской и Белоярской АЭС / **Карпенко Е.И.**, Куртмулаева В.Э., Спиридонов С.И. // Сборник докладов молодежной конференции с международным участием, посвященной 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ – Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий (Обнинск, 7-8 сентября 2016 г.). Обнинск: Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. – С. 110-116.
9. **Карпенко Е.И.** Оценка дозовых нагрузок на водные экосистемы в районе расположения Белоярской АЭС / **Карпенко Е.И.**, Нуштаева В.Э., Спиридонов С.И. // Материалы чтений памяти академика Г.Г. Поликарпова: Радиохемоэкология: успехи и перспективы (Севастополь, 14-16 августа 2019 г.). Севастополь: Изд-во ФИЦ ИнБЮМ, 2019. – С. 92.
10. **Карпенко Е.И.** Содержание радионуклидов в различных компонентах наземных экосистем в районе расположения Балтийской АЭС / **Карпенко Е.И.**, Панов А.В., Нуштаев С.Н., Фомина Л.Н. // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления» (Обнинск, 19-21 апреля 2016 г.). Обнинск: Изд-во ФГБНУ «НПО «Тайфун», 2016. – С. 51.
11. **Карпенко Е.И.** Результаты радиоэкологического обследования территории в 30 км зоне Смоленской АЭС-2 / **Карпенко Е.И.**, Ратникова Л.И., Нуштаев С.Н. // Сборник трудов IV научно-практической конференции с международным участием «Экологическая и радиационная безопасность объектов атомной энергетики» (Калининград, 18-19 октября 2017 г.). Калининград: Изд-во Аксиос, 2017. – С. 36-38.

12. **Карпенко Е.И.** Результаты радиоэкологического мониторинга в районе расположения Балтийской АЭС / **Карпенко Е.И.**, Санжарова Н.И. // Сборник трудов II научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию атомной отрасли России «Экологическая безопасность АЭС» (Калининград, 20-21 октября 2015). Калининград: Изд-во ИЦАЭ. 2015. – С. 74-77.
13. **Карпенко Е.И.** Радиоэкологическая обстановка в районе размещения Смоленской АЭС-2 / **Карпенко Е.И.**, Санжарова Н.И., Томсон А.В. // Международные XLVI Радиоэкологические чтения им. В.М. Клечковского молодежный круглый стол «Современные проблемы радиобиологии и радиоэкологии» (Обнинск, 1 декабря 2017 г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2017. – С. 50-55.
14. **Карпенко Е.И.** Дозовые нагрузки на почвенную мезофауну в районе расположения уранодобывающего предприятия. Матер / **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М., Спиридонов С.И. // VII Региональной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск». (Обнинск, 22 апреля 2010). Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 60-63.
15. **Карпенко Е.И.** Дозы облучения растительности в районе расположения предприятия по добыче и переработке урановых руд / **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М., Спиридонов С.И. // Тезисы докладов V Региональной научной конференции – Техногенные системы и экологические риск (Обнинск, 17 августа 2008 г.). Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ Под общ. Ред. члена-корреспондента РАЕН Г.В. Козьмина, 2008. – С.194-197.
16. **Карпенко Е.И.** Математическая модель для расчета доз облучения компонентов луговых экосистем на радиоактивно загрязненных территориях / **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М., Спиридонов С.И. // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий» (Сочи, 13-18 мая 2008 г.). Сочи, 2018. – С. 14–15.
17. **Карпенко Е.И.** Обзор международных программных пакетов ERICA и RESRAD-BIOTA / **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М. [и др.] // Тезисы докладов Международной конференции «Чернобыль: опыт международного сотрудничества при ликвидации последствий аварии» (Москва-Обнинск, 23-25 ноября 2011 г.). Обнинск, 2011. – С. 144-146.
18. **Карпенко Е.И.** Оценка доз облучения растений на территории, загрязненной тяжелыми естественными радионуклидами / **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.С. // Сборник тезисов докладов – Одиннадцатая международная молодежная научная конференция «Полярное сияние 2008. Ядерное будущее: технологии, безопасность и экология» (Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2018 г.). М.: Отв. редактор А.С. Краснобаев; ред. коллегия: Д.Н. Светличная, Н.Н. Кальницкая, 2008. – С. 280.
19. **Карпенко Е.И.** Оценка доз облучения населения в районе расположения предприятия по добыче и переработке урановых руд / **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И. // Сборник тезисов международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены» (Санкт-Петербург, 1-3 октября 2012 г.). СПб, 2012. – С. 72-75.
20. **Карпенко Е.И.** Анализ современных программных средств для оценки доз облучения биоты / **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э. //

Тезисы докладов I международной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 20-21 апреля 2017 г.). Обнинск, 2017. – С. 255-257.

21. **Карпенко Е.И.** Радиоэкологическая обстановка в районе размещения АО «СХК» / **Карпенко Е.И.**, Томсон А.В., Соломатин В.М. // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018». (Севастополь, 24-27 сентября 2018 г.). Севастополь: СевГУ под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой, 2018. – С. 513-516.
22. Колядич Л.Н. База данных радиоэкологического мониторинга района расположения Балтийской АЭС / Колядич Л.Н., Томсон А.В., **Карпенко Е.И.** // Сборник докладов молодежной конференции с международным участием, посвященной 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ – Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий (Обнинск, 7-8 сентября 2016 г.). Обнинск: Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. – С. 126-127.
23. Кузнецов В.К. Результаты радиоэкологического мониторинга наземных экосистем в зоне строительства Балтийской АЭС / Кузнецов В.К., **Карпенко Е.И.**, Исамов Н.Н., Гешель И.В., Андреева Н.В, Новикова Н.В. // Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск. 1. Актуальные вопросы радиоэкологии / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018.– С. 170.
24. Куртмулаева В.Э. Оценка дозовых нагрузок на водные экосистемы в районе расположения Ленинградской АЭС / Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.**, Нуштаев С.Н., Спиридонов С.И. // Тезисы докладов международной научно-практической конференции «Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления» (Обнинск, 19-21 апреля 2016 г.). Обнинск: ФГБНУ «НПО «Тайфун», 2016. – С. 67.
25. Куртмулаева В.Э. Сравнительная оценка дозовых нагрузок на биоту в районах расположения предприятий ЯТЦ / Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.** // Техногенные системы и экологический риск - Тезисы докладов XI региональной научной конференции (Обнинск, 24-25 апреля 2014 г.). Изд-во НИЯУ "МИФИ" 2014. – С. 103-104.
26. Куртмулаева В.Э. Оценка дозовых нагрузок на водные экосистемы в районе расположения Ленинградской АЭС / Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.**, Нуштаев С.Н., Спиридонов С.И. // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления - Тезисы докладов международной научно-практической конференции (Обнинск, 19-21 апреля 2016 г.). Изд-во ФГБНУ «НПО «Тайфун» 2016. – С. 67.
27. Куртмулаева В.Э. Современная радиационная обстановка в районе размещения Ленинградской АЭС-2 / Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И. // Техногенные системы и экологический риск - Тезисы докладов XII региональной научной конференции (Обнинск, 23-24 апреля 2015 г.). Изд-во НИЯУ "МИФИ" 2015. – С. 53.
28. Куртмулаева В.Э. Оценка доз облучения населения от атмосферных выбросов радиационно-опасных объектов в районе расположения Ленинградской АЭС / Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И., Микаилова Р.А., Курбаков Д.Н. // Техногенные системы и экологический риск - Тезисы докладов II Международной (XV Региональной) научной конференции (Обнинск, 19-20

апреля 2018 г.). Изд-во НИЯУ "МИФИ" 2018. – С. 450.
29. Куртмулаева В.Э. Долгосрочный прогноз дозы внешнего облучения населения от штатных атмосферных выбросов Ленинградской АЭС-2 / Куртмулаева В.Э., Микаилова Р.А., Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.**, Нуштаев С.Н. // Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий - Сборник докладов молодежной конференции с международным участием, посвященной 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ (Обнинск, 7-8 сентября 2016 г.). Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ 2016. – С. 163.
30. Куртмулаева В.Э. Результаты радиационно-гигиенического мониторинга компонентов агроэкосистем и продуктов питания, производимых в регионе размещения Ленинградской АЭС / Куртмулаева В.Э., Цыгвинцев П.Н., **Карпенко Е.И.**, Нуштаев С.Н. // Чернобыль – 30 лет спустя. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на ЧАЭС - Сборник тезисов международной научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 14 апреля 2016 г.). Изд-во ФГУН НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева 2016. – С. 104.
31. Колядич Л.Н. База данных радиоэкологического мониторинга района расположения Балтийской АЭС / Колядич Л.Н., Томсон А.В., **Карпенко Е.И.** // Взгляд молодых ученых на современные проблемы развития радиобиологии, радиоэкологии и радиационных технологий - Сборник докладов молодежной конференции с международным участием, посвященной 45-летию образования ФГБНУ ВНИИРАЭ (Обнинск, 7-8 сентября 2016 г.). Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ 2016. – С. 126-127.
32. Нуштаев С.Н. База данных радиоэкологического мониторинга в районе расположения АО «СХК» / Нуштаев С.Н., **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М. // Техногенные системы и экологический риск - Тезисы докладов II Международной (XV Региональной) научной конференции (Обнинск, 19-20 апреля 2018 г.). Изд-во НИЯУ "МИФИ" 2018. – С. 130-132.
33. Нуштаев С.Н. Создание базы данных мониторинга с применением картографической информации / Нуштаев С.Н., **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И. // Техногенные системы и экологический риск - Тезисы докладов X региональной научной конференции (Обнинск, 11-12 апреля 2013 г.). Изд-во НИЯУ "МИФИ" 2013. – С. 154.
34. Нуштаева В.Э. Оценка воздействия атмосферных выбросов Белоярской АЭС на референтные организмы биоты / Нуштаева В.Э., Микаилова Р.А., Нуштаев С.Н., **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И. // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии - Сборник докладов международной молодежной конференции (Обнинск, 3-4 октября 2019 г.). Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. – С. 174-176.
35. Нуштаева В.Э. Прогноз доз облучения биоты в результате газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов Балтийской АЭС / Нуштаева В.Э., Нуштаев С.Н., **Карпенко Е.И.**, Спиридонов С.И. // Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии - Сборник докладов международной молодежной конференции (Обнинск, 3-4 октября 2019 г.). Изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. – С. 176-178.
36. Панов А.В. Опыт создания системы радиационно-экологического мониторинга атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем в регионе размещения АЭС «Руппур» / Панов А.В., Санжарова Н.И., Кузнецов В.К., Курбаков Д.Н.,

Карпенко Е.И., Кочетков И.В. // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной гигиены», 2018. – С. 212-215.

37. Санжарова Н.И. Ответственный за выпуск – Панов А.В. Радиационно-экологическая обстановка и социально-экономическое состояние региона Ростовской (Волгодонской) АЭС / Санжарова Н.И., Панов А.В., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н., Харитонова Е.В., Белова Н.В., Спирин Е.В., Новикова Н.В., Сидорова Е.В., Гешель И.В., Шишулина М.В., Соломатин В.М., Музалевская А.А., **Карпенко Е.И.** [и др.] // Информационный выпуск. – 2008. С. 37.
38. Санжарова Н.И. Ответственный за выпуск – Карпенко Е.И. Экспериментальные данные по оценке радиоэкологических последствий функционирования предприятия по добыче и переработке урановой руды для оценки доз облучения человека и биоты / Санжарова Н.И., **Карпенко Е.И.**, Кузнецов В.К., Белова Н.В., Ратникова Л.И. // Информационный бюллетень. – М.,2012. – С. 36.
39. Санжарова Н.И. Радиационно-экологический мониторинг в районах расположения АЭС: методология, методы, результаты / Санжарова Н.И., Панов А.В., **Карпенко Е.И.**, Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н. // Сборник статей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность-2017» (Севастополь, 11-15 сентября 2017 г.). Севастополь, 2017. – С. 1181-1183
40. Соломатин В.М. Опыт применения программного пакета ERICA для оценки радиологических последствий функционирования предприятий ЯТЦ / Соломатин В.М., **Карпенко Е.И.** [и др.] // Тезисы докладов Международной конференции «Чернобыль: опыт международного сотрудничества при ликвидации последствий аварии» (Москва-Обнинск, 23-25 ноября 2011 г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2011. – С. 147-149.
41. Соломатин В.М. Дозиметрическая модель расчета дозовых нагрузок на генеративные органы деревьев сосны / Соломатин В.М., Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.** // Техногенные системы и экологические риск – Тезисы докладов V Региональной научной конференции (Обнинск, 17 августа 2008 г.). Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ Под общ. Ред. члена-корреспондента РАЕН Г.В. Козьмина, 2008. – С. 213-217.
42. Соломатин В.М. Расчет дозовых нагрузок на растительность луговых экосистем Семипалатинского испытательного полигона / Соломатин В.М., Спиридонов С.И., Тетенькин В.Л., Мукушева М.К., **Карпенко Е.И.** // Вестник НЯЦ РК. – 2007, № 4. – С. 24-27.
43. Спиридонов С.И. Сравнительная оценка радиоэкологических рисков для территории, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.**, Санжарова Н.И., Алексахин Р.М. // Тезисы докладов Научно-практического совещания по реабилитации радиоактивно загрязненных территорий (Кисловодск, 19-22 мая 2009 г.). Кисловодск, 2009. – С. 11.
44. Спиридонов С.И. Оценка радиоэкологических рисков для нормализованных и аварийных выбросов объектов ядерной энергетики / Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.**, Микаилова Р.А., Санжарова Н.И. // Сборник трудов II научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию атомной отрасли России «Экологическая безопасность АЭС» (Калининград, 20-21 октября 2015). Калининград, 2015. – С. 161-164.
45. Спиридонов С.И. Радиоэкологические риски при нормализованных и аварийных

выбросах предприятий ядерного топливного цикла / Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.**, Микаилова Р.А., Шарпан Л.А., Куртмулаева В.Э. // Тезис докладов – VII Съезд по радиационным исследованиям (Москва, 21-24 октября 2014 г.). М.: РУДН, 2014. – С. 456.

46. Спиридонов С.И. Оценка вкладов различных путей облучения населения в результате атмосферных выбросов АЭС (в рамках международного проекта INPRO ENV) / Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.**, Шарпан Л.А., Мейер Л., Фанеф М. // Тезисы докладов Международной конференции «Чернобыль: опыт международного сотрудничества при ликвидации последствий аварии» (Москва-Обнинск, 23-25 ноября 2011 г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2011. – С. 61-63.
47. Спиридонов С.И. Сравнительная оценка дозовой нагрузки на население от атмосферных выбросов предприятий атомно-промышленного комплекса в регионе расположения Ленинградской АЭС / Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э., **Карпенко Е.И.** // Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск. 1. Актуальные вопросы радиоэкологии / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018. – С. 170.
48. Спиридонов С.И. Методология оценки риска воздействия техногенных факторов различной природы на агроэкосистемы / Спиридонов С.И., Санжарова Н.И., Тетенькин В.Л., Гераськин С.А., Панов А.В., Соломатин В.М., Епифанова И.Э., **Карпенко Е.И.** // Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2007. – С. 68.
49. Спиридонов С.И. Оценка последствий радиоактивного загрязнения наземных экосистем для биоты и населения / Спиридонов С.И., Соломатин В.М., **Карпенко Е.И.** // Труды научной сессии НИЯУ МИФИ. – 2010, Т. 1 – С. 91-94.
50. Спиридонов С.И. Оценка дозовых нагрузок и радиационных рисков для населения семипалатинского испытательного полигона / Спиридонов С.И., Тетенькин В.Л., Мукушева М.К., Соломатин В.М., **Карпенко Е.И.** // Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Томск, 21-22 февраля 2008 года). Томск, 2008. – С. 113–115.
51. Спиридонов С.И. Оценка последствий радиоактивного загрязнения наземных экосистем на основе концепции радиоэкологических рисков / Спиридонов С.И., Тетенькин В.Л., Соломатин В.М., **Карпенко Е.И.** // Доклады научно-практической конференции «Проблемы радиологии и агроэкологии», посвященной 40-летию ГНУ ВНИИСХРАЭ РАСХН (Обнинск, 7-8 сентября 2011 г.), Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2011. – С. 90-98.
52. Титов И.Е. Геоинформационная система радиоэкологической обстановки в районе расположения АО «СХК» / Титов И.Е., Кречетников В.В., **Карпенко Е.И.**, Соломатин В.М. // Сборник докладов международной молодежной конференции – Современные проблемы радиобиологии, радиоэкологии и агроэкологии (Обнинск, 3-4 октября 2019 г.). Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2019. – С. 342.
53. Шарпан Л.А. Влияние вариабельности дозиметрических параметров на неопределенность оценки доз облучения населения в результате выбросов АЭС / Шарпан Л.А., Спиридонов С.И., **Карпенко Е.И.** // Тезисы докладов X региональной научной конференции «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 11-12 апреля 2013 г.). Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2013. – С. 115.