Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
(ФГБНУ ВНИИРАЭ)

Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ

Выпуск 3

Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций

Под редакцией профессора С.В. Фесенко

Обнинск
2020

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»
(ФГБНУ ВНИИРАЭ)

Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ

Выпуск 3

Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций

Под редакцией профессора С.В. Фесенко

Обнинск
2020

УДК 614.7:621.039.58
ББК 51.265:18
М 77

Редакционная коллегия:

С.В. Фесенко, *проф., д.б.н.* (науч. ред.); **О.А. Шубина**, *к.б.н.* (отв. ред.);
С.И. Санжарова, *к.б.н.;* **Е.В. Гордиенко**

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор **Крышев И.И.**
доктор биологических наук, профессор **Щеглов А.И.**

М 77 **Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3** / Под ред. проф. С.В. Фесенко. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020.– 170 с.: ил.

ISBN 978-5-903386-62-8

В сборнике отражены результаты фундаментальных и прикладных исследований сотрудников ФГБНУ ВНИИРАЭ в районах расположения объектов ядерной энергетики. Представлены концепция и программа радиоэкологического мониторинга, модели и программные средства, используемые для оценки результатов мониторинга. Приведены результаты мониторинговых исследований в районе расположения АЭС с разными типами реакторов, длительностью функционирования, расположенные в различных почвенно-климатических зонах.

Для специалистов в области радиоэкологии, радиобиологии, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

Рекомендовано к изданию решением Ученого совета ФГБНУ ВНИИРАЭ от 12.02.2020 г.

УДК 614.7:621.039.58
ББК 51.265

ISBN 978-5-903386-62-8

© ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020
© Коллектив авторов, 2020

Содержание

Санжарова Н.И.
Предисловие 5

Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Карпенко Е.И., Андреева Н.В., Гордиенко Е.В.
Концепция и программа радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС 9

Карпенко Е.И., Спиридонов С.И., Титов И.Е., Нуштаева В.Э., Микаилова Р.А., Кречетников В.В.
Модели и программные средства для поддержки радиационно-экологического мониторинга 22

Карпенко Е.И., Санжарова Н.И., Нуштаева В.Э., Душин В.Н., Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Спиридонов С.И., Микаилова Р.А.
Радиоэкологический мониторинг в районе размещения Балтийской АЭС 43

Панов А.В., Душин В.Н., Исамов Н.Н., Шабалев С.И., Кузнецов В.К., Спиридонов С.И., Карпенко Е.И., Анисимов В.С., Гешель И.В., Сидорова Е.В.
Мониторинг природных и аграрных экосистем в районе расположения Белоярской атомной электростанции 67

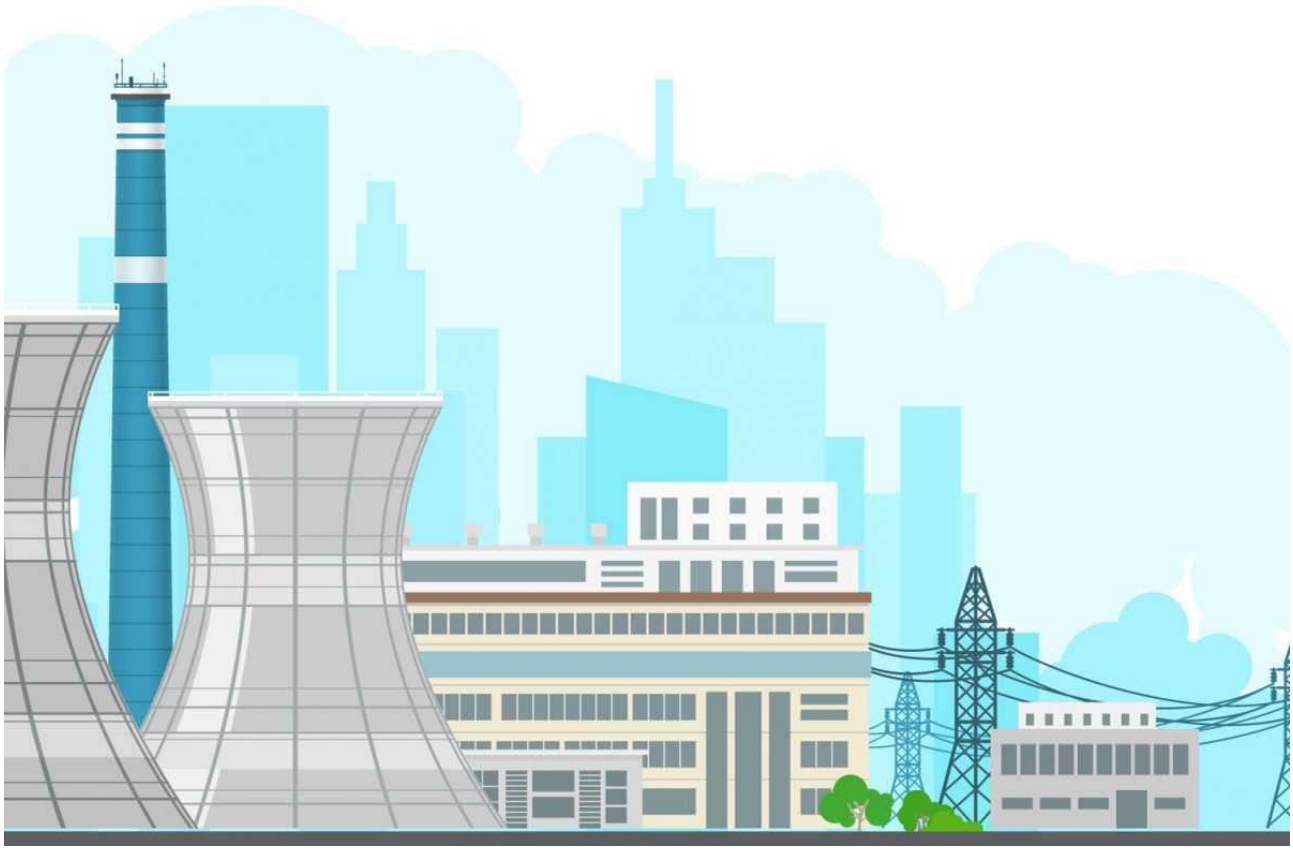
Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Андреева Н.В., Нуштаева В.Э., Панов А.В., Санжаров А.И, Гешель И.В., Сидорова Е.В., Курбаков Д.Н., Новикова Н.В., Саруханов А.В.
Радиоэкологический мониторинг в зоне расположения Курской АЭС 87

Цыгвинцев П.Н., Нуштаева В.Э., Душин В.Л., Анисимов В.С., Бондаренко Л.Г., Кузнецов В.К., Исамов Н.Н.
Радиоэкологический мониторинг в районе размещения Ленинградской АЭС 107

Исамов Н.Н., Санжарова Н.И., Нуштаева В.Э., Панов А.В., Кузнецов В.К., Губарева О.С., Алешкина Е.Н, Гешель И.В., Сидорова Е.В., Емлютина Е.С., Фадеев М.Ю., Музалевская И.А., Урсу Н.В.
Радиационно-экологический мониторинг в зоне размещения Ростовской АЭС 134

Фесенко С.В.
Некоторые уроки радиоэкологического мониторинга в районе расположения атомных электростанций 158

НАШИ ЮБИЛЯРЫ 168



Предисловие

Экологическая безопасность предприятий ядерной энергетики является одной из ключевых проблем при разработке перспективных энергетических стратегий. Основное внимание уделяется контролю за радиационным воздействием на человека и объекты живой природы от выбросов и сбросов радиоактивных веществ в атмосферу, водные, наземные природные и аграрные экосистемы. Следует отметить, что в производственной деятельности предприятий атомной отрасли с момента строительства до снятия с эксплуатации имеет место широкий спектр техногенного воздействия на окружающую среду, в частности: нарушение геологических структур, ландшафтов, экосистем, почвенного покрова; отчуждение земель; использование водоёмов и их тепловое загрязнение; загрязнение в результате выбросов и сбросов радионуклидов и химических веществ; формирование опасных отходов.

Атомные электростанции являются ключевым объектом в ядерном энергетическом цикле. В настоящее время в России на 11 действующих АЭС эксплуатируются 38 энергоблоков общей мощностью около 30 ГВт. Доля атомной энергетики в общей выработке объединённых энергетических систем (ОЭС) составила 19,7 %.

Обеспечение экологической безопасности атомных электростанций закладывается на этапе обоснования выбора площадки под строительство и подготовки проектной документации. В соответствии с СП 47.13330.2012 «Инженерные изыскания для строительства. Основные положения» и СП 151.13330.2012 «Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС» при проектировании и строительстве АЭС или новых энергоблоков проводятся инженерно-экологические изыскания для принятия решений по месту размещения площадки нового строительства, а также разрабатывается Программа радиационно-экологического мониторинга. В рамках системы мониторинга проводится выбор и обследуются пункты наблюдений; определяются объекты мониторинга, перечень наблюдаемых параметров, регламент наблюдений (частота, временной режим, продолжительность), а также методы проведения наблюдений и нормативно-техническое обеспечение. Данные экологического мониторинга включают определение количественных параметров миграции радионуклидов, которые используются для оценки последствий влияния штатного функционирования АЭС на окружающую среду, а также возможных аварийных ситуаций.

Развитие систем радиоэкологического мониторинга относится к началу 80-х годов прошлого столетия, что было связано с интенсивным развитием атомной энергетики, ростом числа атомных электростанций (АЭС), большинство из которых находится в зонах интенсивного ведения сельского хозяйства. Сбросы и выбросы предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), а также мелкомасштабные аварии или инциденты на них становятся одной из причин локального радиоактивного загрязнения территории. Сложившаяся ситуация потребовала организации системы длительных наблюдений в регионах размещения предприятий, а также определения количественных параметров миграции радионуклидов с учётом региональных особенностей территорий размещения для информационной поддержки прогнозирования последствий функционирования объектов для человека и окружающей среды. Следует отметить, что в этот период активно проводятся научные исследования, расширяется спектр изучаемых радионуклидов: уран и продукты его деления при добыче урановых руд; при работе АЭС с аэрозольными выбросами и жидкими сбросами поступают продукты деления (благородные инертные газы, I, Cs, тритий, La, Sr, Rb и др.), а также продукты наведённой активности (^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{60}Co и др.). Разрабатываются модели миграции радионуклидов, методы прогнозирования, а также системы поддержки принятия решений и системы реагирования в случае различных радиологических ситуаций.

Во ВНИИ радиологии и агроэкологии были развёрнуты научные исследования по изучению поведения радионуклидов в

аграрных и природных экосистемах при поступлении в виде аэрозольных выбросов и жидких сбросов АЭС. Оценены параметры аэрального пути загрязнения сельскохозяйственных культур, миграции радионуклидов в системе почва – растения – рацион – продукция животноводства, а также особенности поведения широкого спектра радионуклидов (^{22}Na, ^{32}P, ^{59}Fe, ^{60}Co, ^{65}Zn, ^{89,90}Sr, ^{106}Ru, ^{134}Cs и ^{144}Ce) в условиях богарного и орошаемого земледелия. В настоящее время в институте проводится цикл исследований по радиоэкологии слабоизученных радионуклидов, таких как ^{3}H (тритий), ^{14}C и ^{239}Pu.

Первые работы ВНИИ радиологии и агроэкологии по организации сети радиоэкологического мониторинга были проведены в 1982–1985 гг. в 30-км зоне Ленинградской АЭС. На начальном этапе были определены требования к выбору контрольных участков, разработаны регламенты мониторинга при штатном режиме работы станции и при возможных аварийных ситуациях. Разработка и реализация систем радиоэкологического мониторинга в регионах размещения радиационно-опасных объектов в течение последних 20 лет является одним из важных направлений деятельности института.

В рамках договорных обязательств с различными организациями ГК «Росатом» при решении вопросов обеспечения радиационной безопасности атомных электростанций ВНИИРАЭ участвует в мониторинге территорий, прилегающих к АЭС: Курской АЭС (1998–2019); Ростовской (Волгодонской) АЭС (2000–2016); Балаковской АЭС (2001–2004); Калининской АЭС (2007). Самостоятельным видом работ является проведение комплексного радиоэкологического обследования для разработки тома ОВОС на площадках, выбираемых для размещения новых АЭС (или новых энергоблоков). В рамках этих работ также проводится создание сети радиоэкологического мониторинга. Было проведено комплексное обследование площадок под планируемое строительство Курской АЭС-2, Центральной АЭС, Ленинградской АЭС-2, Смоленской АЭС-2, Белоярской АЭС (БН-1200), Балтийской АЭС. Институт участвовал в обосновании экологической безопасности при выборе площадок под строительство АЭС с реакторной установкой СВБР-100 (Ульяновская обл.). Полученные радиоэкологические данные используются для оценки современной радиационной обстановки, а также для прогнозирования ее изменения в результате длительного штатного функционирования АЭС или аварийных ситуаций.

Важной вехой сотрудничества ВНИИРАЭ и ГК «Росатом» являлось участие сотрудников в подготовке документа «Основы экологической политики Минатома России», в котором были изложены цели, принципы и направления деятельности в обеспечении экологической безопасности при использовании атомной энергии в мирных и оборонных целях на долгосрочную перспективу.

Отличительной особенностью современного этапа организации систем мониторинга является его комплексность. Решается широкий спектр задач: регистрация текущего уровня радиоактивного и химического загрязнения; выявление основных путей загрязнения различных экосистем; установление перечня приоритетных загрязнителей; оценка экологического состояния атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем; обеспечение объективной информацией о текущей радиационно-экологической обстановке; изучение закономерностей поведения радиоактивных веществ в экосистемах, определение количественных параметров миграции радионуклидов, обобщение полученной информации в рамках математических моделей; получение исходных данных для выполнения прогнозных оценок состояния окружающей среды; разработка рекомендаций по предупреждению и устранению возможных негативных тенденций в изменении окружающей среды, обусловленных функционированием АЭС. Одним из практических результатов работ является организация сети длительных мониторинговых наблюдений за радиоэкологической обстановкой.

В полной мере система комплексного обследования площадки планируемого строительства и создания сети радиоэкологического мониторинга была реализована при проведении работ на АЭС «Руппур» в Народной Республике Бангладеш. На современном этапе при проведении работ широко

используются ГИС-технологии для визуализации данных мониторинга, а также базы данных для аккумуляции и систематизации информации. При прогнозировании ситуации и обосновании радиационной безопасности объектов ЯТЦ проводится оценка дозовых нагрузок на человека и референтные виды биоты с использованием рекомендованных МАГАТЭ современных программных средств: ERICA, БД FREDERICA, CROM, RESRAD-BIOTA.

Научное обеспечение экологической безопасности атомной отрасли было включено в 2010 году в План фундаментальных и приоритетных прикладных исследований Россельхозакадемии по научному обеспечению развития АПК Российской Федерации на 2011–2015 годы, а с 2013 года – в Программу фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы.

До 2013 года институтом выполнены следующие исследования (задание 02.05 и 02.07): «Разработать регламент экологического обследования при выборе площадок под строительство атомных электростанций»; «Разработать алгоритм оценки пространственной неоднородности радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель при проведении радиоэкологического мониторинга».

Важность решения проблем ведения сельского хозяйства в условиях увеличения рисков радиоактивного загрязнения была обсуждена в мае 2011 г. на заседании Президиума Россельхозакадемии, где был заслушан доклад Р.М. Алексахина «Проблемы сельскохозяйственной радиологии при расширении использования ядерных технологий», в котором были подведены итоги и намечены перспективы применения источников ионизирующих излучений, достижений атомной науки и техники в сельскохозяйственном производстве, с одной стороны, и задачи обеспечения радиационной безопасности в экологическом плане (сельскохозяйственные аспекты) – с другой.

В рамках «Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы» по пункту программы X 10.2 «Земледелие» 142. «Фундаментальные основы создания систем земледелия и агротехнологий нового поколения, с целью сохранения и воспроизводства почвенного плодородия, эффективного использования природно-ресурсного потенциала агроландшафтов и производства заданного количества и качества сельскохозяйственной продукции» выполняются следующие научные и прикладные исследования (Государственное задание № 075-00452-19-02 на 2019 год и на плановый период 2020 и 2021 годов «7» октября 2019 г.):

• тема № 0627-2014-0044 Разработать методические указания по оценке доз облучения человека и компонентов природных и аграрных экосистем в регионах размещения предприятий ядерного топливного цикла на основе современных программных средств;

• тема № 0627-2014-0043 Разработать методологию, методы и информационное обеспечение радиоэкологического мониторинга агроландшафтов и сельскохозяйственной продукции на территориях, прилегающих к предприятиям ядерного топливного цикла, и пополнить базы данных;

• тема № 0627-2018-0001 Разработать системы реагирования в сфере АПК в случае аварии на радиационно-опасных объектах.

С точки зрения законодательных требований обеспечение «радиационной и химической безопасности и снижение риска воздействия на здоровье человека и окружающую среду при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации промышленных и энергетических объектов (в том числе ядерных установок, включая АЭС, химических, горно-добывающих предприятий и т.п.)» определено Экологической доктриной Российской Федерации. Реализация государственной политики в области экологии осуществляется различными путями, среди которых выделена необходимость «развития единой государственной системы экологического мониторинга на всей территории страны».

Постановлением Правительства № 639 закреплено создание и обеспечение функционирования наблюдательных сетей и информационных ресурсов в рамках подсистемы государственного мониторинга радиационной обстановки на территории Российской

Федерации. В рамках системы мониторинга Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также федеральные органы исполнительной власти и Государственная корпорация «Росатом» осуществляют государственный мониторинг радиационной обстановки на территории Российской Федерации.

Проводимые в институте исследования соответствуют следующим приоритетным направлениям Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации:

20 д «Противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства»;

20 г «Переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективная переработка сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания».

Критические технологии (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899):

- технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её последствий;
- технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Член-корреспондент РАН,
доктор биологических наук, профессор
Н.И. Санжарова

КОНЦЕПЦИЯ И ПРОГРАММА РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РАЙОНАХ РАЗМЕЩЕНИЯ АЭС

Санжарова Н.И., Панов А.В., Исамов Н.Н., Кузнецов В.К., Карпенко Е.И., Андреева Н.В., Гордиенко Е.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии

Представлена концепция и методологические подходы к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения АЭС. Определены цели, задачи и основные требования к радиационно-экологическому мониторингу, выделены этапы его организации и ведения. Показаны особенности разработки программ радиационно-экологического мониторинга. Выделены объекты мониторинга, контролируемые параметры, а также периодичность мониторинговых наблюдений. Обоснованы принципы размещения контрольных пунктов на сети мониторинга. Представлены общие технические требования к приборному обеспечению проведения мониторинговых работ. Составлен алгоритм ведения радиационно-экологического мониторинга в рамках инженерно-экологических изысканий на разных стадиях жизненного цикла АЭС.

Радиоэкологический мониторинг, радионуклиды, воздействие на окружающую среду, сельское хозяйство

Обеспечение приемлемого уровня радиационного риска для персонала, населения и окружающей среды является одной из ключевых задач при обосновании возможности строительства и эксплуатации атомных электростанций. Использование ядерных технологий связано с выделением строго контролируемого количества радионуклидов в окружающую среду и последующим включением их в биологические цепочки миграции, что обусловливает дополнительное к естественному фону облучение живых организмов, в том числе человека. Регистрация воздействия нормализованных выбросов предприятий ядерного энергетического цикла при их штатной работе на человека и окружающую среду относительно существующего фонового загрязнения является сложной методической задачей и, как правило, осуществляется на сети радиационно-экологического мониторинга, а также расчётным путём с использованием количественных миграционных параметров для конкретного региона. Получение исходных данных о содержании радионуклидов и химических веществ в окружающей среде и на их основе оценка экологического состояния региона расположения АЭС до начала и во время её эксплуатации является одним из обязательных условий корректной оценки последствий воздействия нормализованных выбросов атомной станции. Основой оценки экологического состояния окружающей среды в регионах размещения атомных станций является проведение длительных наблюдений (мониторинга) за воздействием выбросов и сбросов АЭС на наземные (природные, аграрные) и водные экосистемы.

В соответствии с СП 47.13330.2012 и СП 151.13330.2012 при проектировании и строительстве АЭС или новых энергоблоков проводятся инженерно-экологические изыскания для проектной документации по принятию решений относительно выбора площадки нового строительства, а также разрабатывается Программа радиационно-экологического мониторинга района размещения атомной станции (СП 151.13330.2012, 2013; СП 151.13330.2012, 2013; СП 47.13330.2012, 2012). В рамках системы мониторинга проводится выбор и обследуются пункты наблюдений; определяются объекты мониторинга, перечень наблюдаемых параметров, регламент наблюдений (частота, временной режим, продолжительность), а также методы проведения наблюдений и нормативно-техническое обеспечение.

Общий алгоритм работ по инженерно-экологическим изысканиям и радиационно-экологическому мониторингу представлен на рисунке 1.

Рисунок 1. Схема организации радиационно-экологического мониторинга и оценки радиационной обстановки в регионе размещения АЭС

Радиационно-экологический мониторинг в зоне воздействия радиационно-опасного объекта (РОО) является локальным мониторингом. Разработка концепции мониторинга включает: цели и задачи; принципы, на основе которых должна реализовываться система мониторинга; границы и уровни мониторинга; содержание мониторинга; порядок проведения; виды наблюдений; объекты наблюдений; контролируемые параметры; методическое обеспечение. При разработке методологии мониторинга в зонах воздействия РОО учитываются особенности источника загрязнения и специфика факторов воздействия, условия формирования зон загрязнения.

Современный подход к оценке влияния радиационно-опасных объектов основан на совместном анализе радиационного воздействия как на человека, так и на окружающую его природную среду (Алексахин, Фесенко, 2004; Крышев, Сазыкина, 2018; Панов и др.,

2017; Фесенко и др., 2004). Требование практической демонстрации, что воздействия объектов ядерной промышленности на человека и природную среду не превышают допустимых пределов, нашло отражение в новых Международных стандартах радиационной безопасности (МАГАТЭ), согласованных и одобренных Российской Федерацией в 2011 году. В частности, в основополагающем международном документе по ядерной и радиационной безопасности «Basic Safety Standards» (IAEA, 2014) отмечается, что при обосновании использования любых ядерных технологий необходимо на основе прямых оценок показать отсутствие вредных эффектов их влияния на окружающую среду.

Целью радиационно-экологического мониторинга является наблюдение за радиационной обстановкой в районе размещения радиационно-опасных объектов, своевременное выявление изменений радиационной обстановки; оценка, прогнозирование и предупреждение возможных негативных последствий радиационного воздействия для персонала, населения и окружающей среды. Радиационно-экологический мониторинг в регионе АЭС – это комплекс системных многолетних наблюдений за изменениями в окружающей среде, позволяющий выявить возможное влияние АЭС при нормальной эксплуатации и оценить текущий уровень её экологической безопасности. Полученные в результате мониторинга данные должны быть достаточными для разработки управленческих решений по исключению либо снижению до уровня, определённого нормативными документами, возможного негативного влияния АЭС на окружающую среду.

К целям радиационно-экологического мониторинга также относятся обеспечение радиационной безопасности населения и требований нормативов, регламентирующих качество окружающей среды, а также выявление тенденций изменения радиационно-экологической обстановки в регионе размещения АЭС в процессе её эксплуатации.

К основным задачам радиационно-экологического мониторинга относятся:

- регистрация текущего уровня радиоактивного и химического загрязнения объектов окружающей среды в зоне наблюдений атомной станции (30-км зона АЭС) и выявление тенденций в его изменении;
- выявление основных путей радиоактивного и химического загрязнения приземного атмосферного воздуха, наземных (природных и аграрных) и водных экосистем, установление перечня приоритетных загрязнителей;
- оценка экологического состояния приземного атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем;
- изучение закономерностей поведения радиоактивных веществ в экосистемах, определение количественных параметров миграции радионуклидов, обобщение полученной информации в рамках математических моделей;
- получение исходных данных для выполнения прогнозных оценок экологического состояния окружающей среды;
- разработка рекомендаций по предупреждению и устранению возможных негативных тенденций в изменении окружающей среды, обусловленных функционированием АЭС;
- обеспечение объективной информацией о текущей радиационно-экологической обстановке для принятия управленческих решений по исключению либо снижению до нормативного уровня возможного негативного влияния АЭС на окружающую среду, а также направленных на ограничение поступления радионуклидов в рацион питания населения и снижение дозовых нагрузок.

Основное требование к радиационно-экологическому мониторингу – получение достоверной информации при проведении наблюдений (измерений, анализов), что предусматривает выполнение следующих условий (Бессонов, 2013):

- наличие представительной системы пробоотбора;
- регулярность и комплексность наблюдений;
- обеспечение точности анализов и достоверности измерений параметров;
- проведение статистического анализа данных для оценки распределения загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды и достоверности прогноза оценки радиоэкологической обстановки.

Этапы организации радиационно-экологического мониторинга включают:

- анализ имеющихся данных о регламентированных сбросах и выбросах АЭС, а также о прогнозируемом радиоактивном загрязнении в случае радиационной аварии;
- составление перечня радионуклидов, подлежащих контролю;
- оценка существующих уровней радиоактивного загрязнения экосистем в зоне размещения АЭС;
- создание сети стационарных контрольных участков и контрольных пунктов по территориальному принципу с учётом многолетней розы ветров относительно площадки АЭС (сеть стационарных контрольных участков и пунктов создаётся на основе существующих сетей путём добавления новых участков и пунктов, обеспечивающих надёжную оценку влияния атомной станции на экосистемы);
- разработка регламента радиационно-экологического мониторинга приземного атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем при работе АЭС в штатном режиме и при возможных аварийных ситуациях.

Схема сети радиационно-экологического мониторинга разрабатывается на основании предварительной оценки характеристик выбросов и сбросов АЭС (перечень радионуклидов, физико-химическая форма, химические загрязнители и т.п.). Система мониторинга должна позволить осуществить расширенные исследования воздействия на окружающую среду каждого из источников: выбросов радионуклидов в приземный атмосферный воздух, сбросов в поверхностные водоёмы и мест хранения (захоронения) РАО. Схема также должна позволить оценить по результатам мониторинговых исследований значимость всех путей облучения, связанных с каждым из источников воздействия.

Порядок работ при организации сети мониторинга включает следующие позиции: подготовка исходных материалов, характеристика источника загрязнения и определение перечня загрязняющих веществ, определение зоны воздействия источника загрязнения; характеристика экосистем в зоне воздействия объекта; порядок выбора, привязки и описания контрольных участков; порядок проведения работ на сети мониторинга (первоначальное обследование, наблюдение за загрязнением атмосферных выпадений и аэрозолей; наблюдение за состоянием экосистем); виды и периодичность наблюдений; объекты мониторинга, контролируемые параметры; требования к сбору, представлению и хранению информации.

В соответствии с п. 7.4.1.2 СП 151.13330.2012 радиационно-экологический мониторинг в рамках инженерно-экологических изысканий на стадии разработки проектной документации необходимо проводить в пределах выбранной площадки размещения РОО и в зоне наблюдения радиусом 30-км (СП 151.13330.2012, 2013).

Для обеспечения задач мониторинга создаётся сеть наблюдений, которая включает:

- стационарные посты радиационного контроля;
- режимную сеть наблюдений за компонентами окружающей среды;
- режимную сеть наблюдения за водными объектами с помощью организации стационарных режимных створов на основных водотоках;
- мобильные средства радиационного контроля дорожной сети и судоходных акваторий.

В рамках радиационного-экологического мониторинга наблюдения за радиационной обстановкой осуществляются с учётом параметров состояния окружающей среды в регионе размещения АЭС (Соболев, Беляев, 2002). Контрольная сеть создаётся с учётом места размещения и зоны возможного воздействия станции, преимущественного направления «розы ветров».

При выборе контрольных участков в наземных природных экосистемах учитываются ландшафтные и почвенные условия, которые могут оказать влияние на характер и уровни загрязнения, а также миграционные процессы. При выборе водных объектов учитываются их характеристики, а также возможное направление выноса радионуклидов за пределы контролируемых территорий (например, для речных систем контрольные кочки закладываются вверх и вниз по

течению от мест потенциальных водных сбросов).

При анализе местных условий учитывается характер хозяйственной деятельности на рассматриваемой территории, поскольку во многих случаях она может существенно воздействовать на поведение радионуклидов и тяжёлых металлов в окружающей среде, в том числе обуславливать загрязнение пищевых продуктов. Основными элементами системы радиационно-экологического мониторинга агроэкосистем в регионе размещения АЭС является сеть контрольных участков на сельскохозяйственных угодьях и контрольных пунктов на фермах. При выборе контрольных участков учитывается преимущественное направление "розы ветров" в весенне-летний период (период вегетации сельскохозяйственных культур и пастбищного содержания животных), характер распределения существующего радиоактивного загрязнения, структура землепользования, характеристики почвенного покрова, направленность животноводства. При организации сети мониторинга агроэкосистем используется картографическая основа хозяйств, входящих в зону наблюдений.

При выборе контрольных участков на сельскохозяйственных угодьях обобщаются данные по почвенным характеристикам и структуре землепользования в хозяйствах. Выделяют пахотные угодья, сенокосы и пастбища. На пахотных угодьях анализируется информация о размещении полевых и кормовых севооборотов. На пастбищах и сенокосах учитывают их характеристики – культурные угодья или естественные луга. При выборе контрольных участков учитываются также зональные особенности ведения земледелия, в частности, применение орошения.

При выборе контрольных пунктов для наблюдения за миграцией радионуклидов по животноводческой цепочке анализируются данные по ведению животноводства и структуре стада. Как правило, выбирается молочно-товарная ферма, наиболее близко расположенная к радиационно-опасному объекту, и ферма, расположенная за пределами зоны контроля объекта.

Для обеспечения корректного отбора проб в пределах контрольных участков осуществляется их географическая привязка, а также визуализация схемы мониторинга с применением ГИС-технологий.

Для реализации системы радиационно-экологического мониторинга разрабатывается *регламент* его проведения, включающий:

- перечень объектов мониторинга;
- наблюдаемые параметры;
- периодичность проведения наблюдений;
- способы и/или процедуры определения контролируемых параметров (непосредственные измерения, отбор проб и т.п.);
- методы анализа отобранных проб (МР 2.6.1.27-2003, 2007).

Объектами мониторинга являются:

- приземный атмосферный воздух;
- атмосферные осадки;
- почва;
- грунты;
- растительность;
- вода и донные отложения;
- подземные воды;
- воды, используемые для орошения полей;
- сточные воды;
- продукты питания и продовольственное сырьё.

Выбор объектов мониторинга проводят на основании анализа выбросов и сбросов АЭС с учётом всех потенциально реализуемых путей облучения населения (табл. 1).

Периодичность отбора проб должна быть основана на:

- изменчивости концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде, а также других переменных величинах, наблюдение за которыми ведётся в рамках программ мониторинга;
- статистических параметрах, необходимых для достижения конкретных целей (выявления тенденций, оценки нагрузки, тестирования на соответствие и т.д.);
- данных о природных или хозяйственных циклах (ежедневные, сезонные и др.).

Периодичность наблюдений определяется на основании результатов обработки данных наблюдений о состоянии окружающей среды. Минимально необходимый

период, с которым должен производиться отбор проб, связан с принятым в статистической обработке понятием корреляции (взаимосвязи) полученных результатов.

Таблица 1

Объекты мониторинга и связанные с ними пути облучения

Объект мониторинга	Определяемый параметр	Ед. изм.	Контролируемый (наблюдаемый) параметр
Приземный атмосферный воздух	Объёмная активность радионуклидов	Бк/м^3	Доза внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов
			Доза внешнего облучения от нахождения в облаке выброса
Почва	Удельная активность радионуклидов	Бк/кг	Удельная активность радионуклидов (наблюдаемый параметр)
	Плотность загрязнения радионуклидами	Бк/м^2	Доза внешнего облучения от нахождения на территории, загрязнённой радионуклидами
Растительность	Удельная активность радионуклидов	Бк/кг	Удельная активность радионуклидов (наблюдаемый параметр)
Пищевые продукты	Удельная активность радионуклидов	Бк/кг	Доза внутреннего облучения от перорального поступления радионуклидов
Сбросные воды в месте выпуска в водоём	Объёмная активность радионуклидов	Бк/л	Концентрация радионуклидов в сбросе (наблюдаемый параметр)
Вода поверхностных водоёмов	Объёмная активность радионуклидов	Бк/л	Доза внутреннего облучения от перорального поступления радионуклидов
			Доза внешнего облучения от нахождения на акватории водоёма, загрязнённого радионуклидами
Донные отложения поверхностных водоёмов	Удельная активность радионуклидов	Бк/кг	Доза внешнего облучения от нахождения на акватории водоёма, загрязнённого радионуклидами
			Удельная активность радионуклидов (наблюдаемый параметр)
Подземная вода	Объёмная активность радионуклидов	Бк/л	Доза внутреннего облучения от перорального поступления радионуклидов
Уровни гамма-излучения	Мощность дозы гамма-излучения	Зв/ч	Дозы внешнего облучения

Для конкретного объекта этот показатель определяется на основании проведённых наблюдений и впоследствии является основой для установления минимальной периодичности проведения отбора проб и анализов.

Периодичность наблюдений и измерений в ходе радиационно-экологического мониторинга устанавливается также в зависимости от климатических условий района. При этом в случае наблюдения за биологическими объектами в первую очередь учитываются особенности фазы их естественного развития. На первом этапе реализации радиационно-экологического мониторинга наблюдения за показателями жизнедеятельности наземных и водных экосистем достаточно проводить дважды в год: до начала (в самом начале) вегетационного периода и по завершении его. Периодичность тех или иных измерений и наблюдений устанавливается в проекте регламента радиационно-экологического мониторинга и может корректироваться в ходе его реализации.

Периодичность наблюдений за сельскохозяйственными объектами определяется циклами их развития: для различных видов сельскохозяйственных культур – это время начала вегетации и время уборки урожая; для пастбищных и сенокосных угодий –

время первого и второго укосов трав; для оценки рациона кормления животных – пастбищный и стойловый периоды.

В качестве примера в таблице 2 представлен регламент проведения радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем, как наиболее важных с точки зрения роли в формировании дополнительных доз внутреннего облучения населения, проживающего в районе АЭС (МУ-13.5.13-00, 2000; Санжарова и др., 2010).

Таблица 2

Регламент радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия атомных электростанций при штатном режиме эксплуатации

Вид с.-х. угодий и продукции	Тип пробы	Периодичность отбора	Определяемые радионуклиды
Пахотные угодья	Почва	1 – перед посевом культур 2 – в период уборки урожая	^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{95}Zr+^{95}Nb, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Овощи, картофель	в период уборки урожая	^{58,60}Co, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Фрукты	в период уборки урожая	^{60}Co, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs
	Ягоды	в период уборки урожая	^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Злаки (зерно)	в период уборки урожая	^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{95}Zr+^{95}Nb, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
Естественные и культурные сенокосы и пастбища	Почва	1 – перед началом выпаса с.-х. животных 2 – в период первого укоса трав и в период первого стравливания 3 – в период второго укоса трав и в период второго стравливания	^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{95}Zr+^{95}Nb, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Корма	1 – перед началом выпаса с.-х. животных 2 – в период первого укоса трав и в период первого стравливания 3 – в период второго укоса трав и в период второго стравливания	^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{90}Sr, ^{95}Zr+^{95}Nb, ^{134,137}Cs, ^{131}I
Продукция животноводства	Мясо:		
	Баранина	во время забоя животных	^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Говядина	во время забоя животных	^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Свинина	во время забоя животных	^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Курятина	во время забоя птицы	
	Рыба	во время лова для торговых целей	
	Молоко	1 – стойловый период 2 – начало выпаса 3 – в период первого стравливания 4 – в период повторного стравливания 5 – при смене пастбища	^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I
	Яйца	перед отправкой на продажу	
	Шерсть	в период стрижки	
	Вода	в период орошения или в период лова рыбы для торговых целей	^{54}Mn, ^{58,60}Co, ^{59}Fe, ^{90}Sr, ^{134,137}Cs, ^{131}I, ^{3}H

Процедуры отбора проб и их анализа регламентируются, как правило, ведомственными нормативно-методическими документами. Для природных объектов - измерение МЭД (мощность экспозиционной дозы); радиоактивные аэрозоли; атмосферные выпадения; стронций в речной и озёрной воде; стронций в морской воде; тритий в речной воде; тритий в атмосферных осадках; техногенные радионуклиды в почве, растительности, снежном покрове) виды наблюдений определяются нормативными документами Росгидромета, Рослесхоза, Минприроды (Методические указания ..., 1993; МУ-13.5.13-00, 2000; РД 52.18.693-2007, 2007; Руководство ..., 1995; Руководство ..., 1992).

Для сельскохозяйственных объектов они определены в документах Минсельхоза и Россельхознадзора (Концепция развития ..., 2010; Положение о системе ..., 1998; Порядок государственного учёта ..., 2010).

Методы проведения исследований на сельскохозяйственных территориях включают: выбор места отбора и его описание; методы отбора проб; требования к маркировке, упаковке, транспортировке и хранению проб; методы пробоподготовки. При проведении отбора проб должны соблюдаться следующие требования:

- обеспечение правильности выбора места и времени отбора проб;
- отбор репрезентативных проб;
- соблюдение режима подготовки проб;
- обеспечение достоверности результатов измерения.

Главным требованием при отборе проб является обеспечение представительности. Так, при отборе проб почв на определение содержания радионуклидов пробы должны отражать средний уровень загрязнения территории. Рекомендуется составлять одну среднюю пробу не менее чем из десяти точечных проб для каждого контрольного участка.

Отбор проб почвы проводится согласно следующим документам:

- ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с.;
- ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с.;
- ГОСТ Р ИСО 11464-2011. Почва. Подготовка проб. М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.;
- ГОСТ ISO 11464-2015. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.;
- ГОСТ Р 54038-2010. Почвы. Метод определения ^{137}Cs. М.: Стандартинформ, 2010. 10 с.;
- ГОСТ Р 54041-2010. Почвы. Метод определения ^{90}Sr. М.: Стандартинформ, 2010. 15 с.;
- МР 2.6.1.0094-14. Радиохимическое определение удельной активности Cs-137 и Sr-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах. М., 2014. 44 с.

Пробы растений (сельскохозяйственных культур) отбираются один раз в год в период уборки урожая. Отбор проб производится сопряжённо с отбором проб почв. Для получения достоверных результатов проводится усреднение растительных проб из 5 точечных проб, отобранных по методу «конверта». При отборе объём пробы сельскохозяйственной продукции должен быть достаточным для измерения содержания радионуклидов на уровне фоновых значений.

Отбор проб рациона кормления сельскохозяйственных животных осуществляется в соответствии со следующими документами:

- Положение о системе государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации (утв. Первым заместителем Министра сельского хозяйства и продовольствия РФ В.Н. Щербаком 20 февраля 1998 г.);
- Методические указания по отбору проб объектов ветеринарного надзора для проведения радиологических исследований. М.: Министерство сельского хозяйства и продовольствия РФ; Департамент ветеринарии, 1996;
- МУК 2.6.1.717-98. Радиационный контроль. Стронций-90 и цезий-137. Пищевые продукты. Обработка проб, анализ и гигиеническая оценка. М.: Минздрав России, 1998. 61 с.;

• ГОСТ ISO 6498-2014. Корма, комбикорма. Подготовка проб для испытаний. М.: Стандартинформ, 2015. 52 с.;

• ГОСТ Р 54040-2010. Продукция растениеводства и корма. Метод определения ^{137}Cs. М.: Стандартинформ, 2011. 8 с.

Обязательным условием отбора проб рациона и продукции животноводства является сопряжённость. При отборе проб в пастбищный период проводится отбор проб почвы, травостоя и продукции животноводства. При стойловом содержании проводится отбор всех компонентов рациона и продукции животноводства.

Отбор проб воды из водоисточников производится преимущественно из тех водоёмов, вода которых используется для орошения посевов, водопоя животных, промышленного разведения и лова рыбы. Пробы воды следует брать вблизи места забора воды для сельскохозяйственных нужд непосредственно перед проведением анализа. Вода подлежит радиологическому контролю перед началом поливов. Пробы воды для определения содержания радионуклидов, предварительно концентрируют (упаривание). Определение содержания радионуклидов проводят теми же методами, которые применялись для растительных и почвенных проб.

Отбор проб компонентов водных экосистем осуществляется в соответствии со следующими документами:

• ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2019. 36 с.;

• ГОСТ 17.1.5.01.80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость. М.: Издательство стандартов, 1980. 6 с.;

• ГОСТ 31413-2010. Водоросли, травы морские и продукция из них. Правила приёмки и методы отбора проб. М.: Стандартинформ, 2011. 12 с.;

• ГОСТ 31339-2006. Межгосударственный стандарт. Рыба, нерыбные объекты и продукция из них. Правила приёмки и методы отбора проб. М.: Стандартинформ, 2010. 15 с.;

• МР 0100/13609-07-34. Отбор и подготовка проб питьевой воды для определения показателей радиологической безопасности. М., 2007. 17 с.;

• МР 2.6.1.0064-12. Радиационный контроль питьевой воды методами радиохимического анализа. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 74 с.

Отбор проб продуктов питания осуществляется в соответствии со следующими документами:

• ГОСТ Р 54015-2010. Продукты пищевые. Метод отбора проб для определения стронция Sr-90 и цезия Cs-137. М.: Стандартинформ, 2011. 16 с.;

• Методические указания по отбору проб пищевой продукции животного и растительного происхождения, кормов, кормовых добавок с целью лабораторного контроля их качества и безопасности (утв. заместителем руководителя Россельхознадзора Н.А. Власовым 21.05.2009 г.);

• ГОСТ 26809.1-2014. Молоко и молочная продукция. Правила приемки, методы отбора и подготовка проб к анализу. Часть 1. Молоко, молочные, молочные составные и молокосодержащие продукты. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.;

• ГОСТ 32163-2013. Продукты пищевые. Метод определения содержания стронция Sr-90. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с.

При отборе и транспортировке проб соблюдаются условия, исключающие взаимное загрязнение проб, а также загрязнение транспортных средств и окружающей среды.

Каждая отобранная проба снабжается этикеткой, на которой приводятся следующие данные: номер пробы, номер контрольного участка или пункта, дата отбора, вид пробы, для растительных проб указывается продуктивность на единицу площади, фамилия радиолога.

Отобранные и обработанные пробы сохраняются в течение 2-х лет с целью обеспечения возможности проведения арбитражных или контрольных измерений. Пробы, хранение которых невозможно в нативном состоянии, хранятся в отзолённом виде.

Подготовка проб к измерениям зависит от предполагаемого метода исследований, чувствительности средств измерения,

радионуклидного состава и уровня загрязнения.

Средства измерения и оборудование используются в соответствии с рекомендуемыми перечнями оснащения лабораторий радиационного контроля.

Метрологическое обеспечение работ заключается в правильном выборе средств измерений, соблюдении норм точности, методов (методик) измерений, правильности применяемых наименований и обозначений физических величин и их единиц. Метрологическое обеспечение работ также включает соблюдение требований о необходимости использования в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, средств измерений только утверждённого типа, имеющих действенный срок поверки, наличие аттестованных методик измерений и верифицированного программного обеспечения (кроме входящего в состав средств измерений).

Используемое измерительное оборудование должно иметь действенное (задокументированное) метрологическое подтверждение. Все работы, касающиеся метрологического подтверждения измерительного оборудования, должны выполняться в соответствии с Законом Российской Федерации от 26 июня 2008 года № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» и действующими нормативными документами по метрологии.

Измерительное оборудование, использующееся при проведении работ, должно проходить метрологическое освидетельствование в метрологических службах организаций, имеющих аттестат аккредитации на право проведения поверок (калибровок) и аттестации испытательного оборудования.

Измерительные лаборатории (испытательные центры), проводящие измерения, должны иметь действующую аккредитацию на выполнение работ, а организация – действующую лицензию на выполнение данных работ.

Приборное обеспечение. При штатном режиме работы АЭС в пробах почвы, растений и воды присутствуют в основном долгоживущие радионуклиды глобальных выпадений – ^{90}Sr и ^{137}Cs. В некоторых случаях могут быть обнаружены продукты наведённой активности: ^{51}Cr, ^{54}Mn, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{59}Fe, а также ^{131}I, ^{3}H. При аварийной ситуации в пробах регистрируются коротко- и среднеживущие продукты деления: ^{131}I, ^{141}Ce, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{89}Sr, ^{103}Ru, ^{140}Ba, ^{140}La, а также альфа-излучающие элементы.

Анализ проб, характеризующихся сложным радионуклидным составом, может быть выполнен с использованием высокоразрешающей полупроводниковой гамма-спектрометрии в соответствии с действующими методиками. Для массового анализа проб на содержание радионуклидов целесообразно использовать универсальные сцинтилляционные спектрометрические комплексы или радиометры (табл. 3). Аппаратура для проведения измерений при проведении радиоэкологического мониторинга должна отвечать требованиям ГОСТ 29074-91 (Аппаратура контроля радиационной обстановки. Общие требования. М., 1992. 20 с.).

Определение ^{134}Cs и ^{137}Cs в почвах, растительности, продукции растениеводства и кормах проводится гамма-спектрометрическим методом в соответствии со следующими документами:

- ОСТ 10071-95. Стандарт отрасли. Почвы. Методика определения Cs-137 в почвах сельхозугодий. М.: Минсельхозпрод России, 1995. 11 с.;
- ОСТ 10179-96. Стандарт отрасли. Определение ^{134,137}Cs в продукции растениеводства и кормах. М. М.: Минсельхозпрод России, 1996;
- Методика измерения активности радионуклидов в счётных образцах на сцинтилляционном гамма-спектрометре с использованием программного обеспечения «Прогресс». М., 1996.

Экспрессное радиометрическое определение содержание ^{134}Cs и ^{137}Cs в пробах проводится в соответствии с Методикой экспрессного радиометрического определения по гамма-излучению объёмной и удельной активности радионуклидов в воде, почве, продуктах питания, продукции животноводства и растениеводства (утв. Минздравом СССР 18.06.1990, Главагробиопромом при Государственной комиссии СМ СССР по продовольствию и закупкам 13.08.1990, Госстандартом СССР 19.09.1990). М., 1990. 16 с.

Таблица 3

Технические требования к блокам детектирования

Метод регистрации ионизирующих излучений	Диапазон энергий регистрируемых излучений, МэВ	Диапазон активности измеряемых проб, Бк	Геометрия измерений, размер проб
Полупроводниковая и сцинтилляционная гамма-спектрометрия	0,05–3,0	$0,5–10^5$	Сосуд Маринелли 0,5 л; 1 л
Сцинтилляционная гамма-радиометрия	0,05–3,0	$0,5–10^5$	Сосуд Маринелли 0,5 л; 1 л чашка Петри 100 мм
Бета-спектрометрия: твёрдые сцинтилляторы	>0,6	$0,1–10^5$	Точечные источники Кювета 75х5 мм
Бета-радиометрия:			
– в толстом слое	>0,6	$0,5–10^5$	Кювета
– в тонком слое	>0,6	$1,0–10^5$	Кювета 40 $см^2$
Полупроводниковая альфа–спектрометрия			
– в тонком слое	<5,0	$0,1–10^4$	100–3000 $мм^2$
Альфа-радиометрия			
– в тонком слое	<5,0	$10^{-3}–10^3$	100–3000 $мм^2$
Гамма-дозиметрия	0,5–3,0	0,1–999,9 мкЗв/ч	Измерение уровней внешнего гамма-фона

Определение ^{90}Sr в почвах и растениях проводится в соответствии со следующими документами:

- ОСТ 10071-95. Стандарт отрасли. Почвы. Методика определения Cs-137 в почвах сельхозугодий. М.: Минсельхозпрод России, 1995. 11 с.;
- Методические указания "Определение содержания стронция-90 в почвах и растениях радиохимическим методом" (утв. заместителем министра сельского хозяйства и продовольствия А.Г. Ефремовым 9 февраля 1995 г.). М., 1995. 74 с.;
- Методика приготовления счётных образцов проб почвы для измерения активности стронция-90 на бета-спектрометрических комплексах с пакетом программ "Прогресс". М., 1997.

Выбор методики определения ^{90}Sr зависит от аппаратурного оснащения радиологического подразделения, проводящего мониторинг.

Сбор, хранение и анализ информации, полученной в результате проведения радиационно-экологического мониторинга, осуществляется на базе системы распределённых банков данных. Функционирование этой системы должно обеспечиваться унифицированными программными средствами.

Принятие решений на основе результатов мониторинга должно осуществляться на основе использования унифицированных программных средств, обеспечивающих:

- анализ достоверности и полноты получаемой информации;
- оценку и прогноз радиологической обстановки;
- анализ эффективности возможных контрмер с целью предупреждения негативных тенденций и улучшения радиационно-экологической обстановки.

В случае выявления на контрольном участке или в контрольном пункте локального загрязнения обработка результатов обследования по данному пункту осуществляется отдельно от остальных пунктов сети радиоэкологического мониторинга.

В результате проведения длительных наблюдений за миграцией радионуклидов в экосистемах создаётся база данных по накоплению радионуклидов в объектах окружающей среды. Полученные количественные параметры миграции могут быть использованы для прогнозирования радиационной обстановки в зоне воздействия АЭС как при штатном режиме работы, так и случае аварийных ситуаций. Дополнительно к радиологической информации должны быть обобщены данные по характеристикам сельскохозяйственного производства, которые необходимо учитывать при прогнозировании.

Одним из фундаментальных вопросов организации мониторинга является вопрос выбора *критериев оценки качества компонентов окружающей среды* – пределов, при которых качественные показатели «чистоты» атмосферного воздуха, почвенного покрова, водных объектов и др. можно считать приемлемыми. Санитарно-гигиенические критерии, такие как ПДК, ОДК, применимы преимущественно на территории АЭС для оценки её влияния на организм человека. Применение же их для оценки состояния природной среды не является вполне правомерным. Однако специальные критерии для большинства компонентов природной среды, за исключением водных объектов (например, показатель ПДК для водоёмов рыбохозяйственного назначения) практически отсутствуют. Во всех системах мониторинга используются санитарно-гигиенические критерии или фоновые значения концентраций исследуемых веществ. Применение последних при правильной организации этих наблюдений представляется более оправданным. По этим причинам при типизации мониторинга компонентов окружающей среды обязательным является фоновое обследование площадки размещения до пуска АЭС в эксплуатацию, включение в сеть мониторинга контрольных площадок вне зоны воздействия АЭС и сравнение измеряемых концентраций загрязняющих веществ на контрольных участках в процессе работы станции с фоновыми значениями.

В ФГБНУ ВНИИРАЭ разработана и реализована система радиационно-экологического мониторинга как на функционирующих, так и строящихся АЭС, включая следующие атомные электростанции: Ростовская АЭС, Нововоронежская АЭС, Белоярская АЭС, Курская АЭС, Калининская АЭС, Центральная АЭС (Костромская обл.), Балтийская АЭС (Калининградская обл.), АЭС с опытно-промышленным энергоблоком с реакторной установкой СВБР-100 (Ульяновская обл.), Ленинградская АЭС-2, Смоленская АЭС-2, АЭС «Руппур» (Народная Республика Бангладеш).

Литература

Алексахин Р.М., Фесенко С.В. Радиационная защита окружающей среды: антропоцентрический и экоцентрический принципы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 1. С. 93–103.

Бессонов В.Н. и др. Экологический мониторинг окружающей среды в районах расположения атомных станций: монография / Под ред. В.А. Грачева. М.: Акси-М, 2013. 176 с.

Концепция развития государственного мониторинга земель сельскохозяйственного назначения и земель, используемых или предоставляемых для ведения сельского хозяйства в составе земель иных категорий, и формирования государственных земельных информационных ресурсов об этих землях на период до 2020 года (одобрена распоряжением Правительства РФ от 30 июля 2010 г. № 1292-р).

Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиационная безопасность окружающей среды // Радиация и риск. 2018. Том 27. № 3. С. 113–131.

Методические указания по оценке радиационной обстановки в лесном фонде Российской Федерации на стационарных участках (для части территории, загрязненной радионуклидами при аварии на Чернобыльской АЭС) (утв. приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 21 декабря 1993 г. № 337).

МР 2.6.1.27-2003. Зона наблюдения радиационного объекта. Организация и проведение радиационного контроля окружающей среды: методические рекомендации. М.: Технорматив, 2007. 70 с.

МУ-13.5.13-00. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов: Методические указания (утв. Министерством сельского хозяйства РФ 7 августа 2000 г.). М., 2000. 28 с.

Панов А.В. и др. Анализ национальной системы нормативного и правового обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды вблизи объектов и территорий, загрязнённых техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности // Радиация и риск. 2017. Т. 26. № 2. С. 107–121.

Положение о системе государственного ветеринарного контроля радиоактивного загрязнения объектов ветеринарного надзора в Российской Федерации (утв. Первым заместителем Министра сельского хозяйства и продовольствия РФ В.Н. Щербаком 20 февраля 1998 г.).

Порядок государственного учёта показателей состояния плодородия почв сельскохозяйственного назначения (Приложение к Приказу Минсельхоза России от 4 мая 2010 г. № 150 «Об утверждении Порядка государственного учета показателей состояния плодородия земель сельскохозяйственного назначения»).

РД 52.18.693-2007. Единая государственная автоматизированная система контроля радиационной обстановки на территории Российской Федерации. Руководство по радиационному мониторингу загрязненных территорий на поздней фазе радиационной аварии: руководящий документ (утв. заместителем руководителя Росгидромета 21 июня 2007 г.).

Руководство по радиационному обследованию лесного фонда (на период 1996-2000 годы) (утв. приказом Федеральной службы лесного хозяйства России от 29.12.1995 г. № 195).

Руководство по радиационному обследованию лесов (на период 1992-1995 гг.) (утв. заместителем Председателя Комитета по лесу Министерства экологии и природных ресурсов РФ Б.Д. Отставновым 29 мая 1992 г.). М., 1992. 22 с.

Санжарова Н.И. и др. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС / *Под ред. Н.И. Санжаровой*. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 276 с.

Соболев И.А., Беляев Е.Н. (ред.). Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / *Под ред. И.А. Соболева, Е.Н. Беляева*. М.: Медицина, 2002. 432 с.

СП 151.13330.2012. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Ч. I Инженерные изыскания для разработки предпроектной документации (выбор пункта и выбор площадки размещения АЭС) (утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. № 110/ГС). М., 2013. 187 с.

СП 151.13330.2012. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Ч. II Инженерные изыскания для разработки проектной и рабочей документации и сопровождения строительства (утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. № 110/ГС). М., 2013. 155 с.

СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой России) от 10 декабря 2012 г. № 83/ГС; введен в действие с 1 июля 2013 г.). М., 2012. 111 с.

Фесенко С.В. и др. Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и человека в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 6. С. 618–626.

IAEA (2014). IAEA Safety Standards. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014, № GSR. Part 3. P. 436.

МОДЕЛИ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Карпенко Е.И., Спиридонов С.И., Титов И.Е., Нуштаева В.Э., Микаилова Р.А., Кречетников В.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии

Представлены ключевые элементы в оценке радиационно-экологического состояния окружающей среды на основе применения комплекса математических моделей, баз данных, программных средств, необходимых для оценки доз облучения населения и ГИС-технологий. Выполнен анализ отечественных и международных моделей и кодов для оценки доз облучения населения в результате функционирования радиационно-опасных объектов. Выполнен сравнительный анализ современных международных дозиметрических моделей. Дано обоснование практического применения компьютерных технологий для сбора, хранения, анализа и представления пространственно-распределённых данных, необходимых для проведения радиационно-экологического мониторинга.

Радиоэкологический мониторинг, математические модели, дозы, программные средства, базы данных, ГИС-технологии

Введение

Одной из основных задач радиоэкологического мониторинга является оценка радиационно-экологического состояния экосистем, прогноз возможных негативных последствий радиоактивного загрязнения и информационное обеспечение разработки рекомендаций по предупреждению и устранению негативных тенденций (Санжарова и др., 2020). Ключевыми элементами в практическом решении этих задач является разработка математических моделей, предназначенных для оценки и прогноза радиоэкологической обстановки в регионе размещения радиационно-опасных предприятий, создание системы баз данных и соответствующих программных средств. С помощью комплекса математических моделей и современных программных средств выполняется прогноз изменения радиоэкологической ситуации в районе размещения атомных электростанций как при их штатной эксплуатации, так и для случаев потенциально возможных аварий. С этой целью оцениваются дозовые нагрузки на человека и референтные виды биоты. Использование этих моделей позволяет оценить вклад предприятий в загрязнение окружающей среды и доз облучения населения, а геоинформационные системы позволяют представить полученную информацию в виде удобном для принятия решений. Целью представленной статьи являлся критический обзор применения моделей, программных средств и ГИС-технологий, применяемых в Российской Федерации, для организации и ведения радиоэкологического мониторинга в районах размещения радиационно-опасных объектов.

Национальные модели и коды для оценки доз облучения человека

Облучение населения от радиоактивных выбросов АЭС является результатом совокупности радиоэкологических процессов, включающих миграцию радионуклидов в компонентах окружающей среды и формирование доз внешнего и внутреннего облучения человека. Во второй половине прошлого века в нашей стране, в том числе и во ВНИИРАЭ, активно разрабатывались подходы к описанию радиоэкологических процессов, реализованные в виде дозиметрических моделей и соответствующих программ (кодов) (Фесенко, 1992). Как в России, так и на международном уровне, параметрическое обеспечение таких моделей во многом базировалось на результатах исследований ВНИИРАЭ (Alexakhin et al., 2007; Balonov et al., 2018; Fesenko et al., 2007b; Fesenko et al., 2018; Fesenko et al., 2009a; Fesenko et al.,

2007a; Fesenko et al., 2009b; Fesenko et al., 1997; IAEA, 2009).

В настоящее время базы данных, включающие значения коэффициентов переноса радионуклидов по пищевым цепочкам, являются неотъемлемым элементом разрабатываемых в Российской Федерации методик и программных средств, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на население (СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009*;* МР 2.6.1.0063-12, 2013; Панченко и др., 2015; Программное средство …, 2018).

Дозы облучения населения в результате радиоактивных атмосферных выбросов АЭС и других объектов ядерного топливного цикла формируются по следующим основным путям облучения (рис. 1):

- внешнее облучение от радиоактивного облака и загрязнённой радионуклидами поверхности почвы;
- внутреннее облучение от ингаляционного поступления радиоактивных веществ в организм человека и потребления продуктов питания, содержащих радионуклиды.

Рисунок 1. Пути формирования облучения населения в результате радиоактивных атмосферных выбросов атомных электростанций *(Шарпан и др., 2013)*

Для оценки дозовых нагрузок на человека и другие живые организмы могут использоваться аналитические модели (Гусев, Беляев, 1991; Фесенко, 1992). Однако для практических оценок, как правило, используют дозовые коэффициенты (коэффициенты дозового преобразования), рассчитанные для определённых геометрий «источник – мишень». Эти показатели рассчитываются методом Монте Карло с учётом вероятностного характера элементарных актов взаимодействия излучений с веществом на основе специальных программных средств. Для некоторых объектов и радиоэкологических ситуаций объём и время вычислений могут быть весьма значительными.

При разработках моделей, методик расчёта и программных средств часто используются дозовые коэффициенты из документов авторитетных международных организаций, носящих рекомендательный характер. Так, в монографии (Гусев, Беляев, 1991), опубликованной в начале 90-х годов прошлого века, приводятся дозовые коэффициенты, взятые

из Публикации 30 МКРЗ (МКРЗ, 1982). В последних российских документах и кодах используются коэффициенты дозового преобразования, представленные в более поздних публикациях МКРЗ (IAEA, 2014).

Дозиметрические модели, позволяющие рассчитывать дозовые нагрузки на население от выбросов АЭС по различным путям облучения, объединяются в рамках методических указаний и рекомендаций (ДВ-98, 1998; Методы расчёта ..., 1992; МТ 1.2.1.15.1176-2016, 2016; РБ_106-15, 2015; Система информационной поддержки ..., 2019).

Расчёт доз облучения населения по данным радиоэкологического обследования (мониторинга) территорий, прилегающих к АЭС, проводится согласно Методическим рекомендациям «Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации или радиационной аварии» (МР 2.6.1.0063-12, 2013). На основе этого документа выполняется оценка дозовых нагрузок по концентрациям радионуклидов техногенного происхождения в объектах внешней среды, продуктах питания населения и природных пищевых продуктах.

Дозиметрические модели и методические указания реализуются в виде программных модулей, объединяемых в рамках программных средств или кодов с интерфейсом пользователя. Характерной особенностью таких интегрированных программных средств является удобство их применения, что особенно важно для пользователя, не обладающего специальной подготовкой. В то же время, такие коды, являющиеся, по существу, «черными ящиками», не предоставляют возможности изменения отдельных моделей, входящих в их состав. В некоторых случаях целесообразно использовать компьютерные программы, позволяющие разрабатывать и совершенствовать модели, обеспечивая, тем самым, «гибкость» моделирования.

К настоящему времени в Российской Федерации разработан ряд интегрированных программных пакетов, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на население (Арутюнян и др., 1995; АЭС-2006 ..., 2009; Косых и др., 2010; Крылов и др., 2018; Нострадамус ..., 2001; Программа ..., 2000; Семёнов и др., 2018; Система информационной поддержки ..., 2019; Shershakov, Trakhtengerts, 1996). Так, для оценки воздействия на окружающую среду атмосферных российских выбросов АЭС и разработки соответствующих документов (ОВОС, Материалы обоснования лицензии) используется расчётный код COFAR (Ленинградская АЭС-2, 2015). Эти программные средства разработаны на основе Методических указаний по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу ДВ-98 (ДВ-98, 1998) и учитывают все пути облучения населения при хроническом поступлении радионуклидов в окружающую среду.

Компьютерная система RECASS предназначена для поддержки принятия решений в задачах радиоэкологического анализа и прогностических оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды при радиационных авариях (Shershakov, Trakhtengerts, 1996). Эта система получила широкое распространение при проведении мониторинга на ряде Российских АЭС, используется при проведении учений на АЭС, организуемых эксплуатирующей организацией, но до настоящего времени не аттестовано, что сдерживает его распространение (АРМ анализа ..., 1995).

Основу системы RECASS, построенной по модульному принципу, составляют модули STAMP и RIMPUFF. Программная реализация модулей STAMP и RIMPUFF выполнена в рамках единой технологии и входит в банк моделей системы RECASS, объединяющий в настоящее время модели, выполненные на разной методической основе, различного пространственного разрешения и, соответственно, разной оперативности (Косых и др., 2010; Система информационной поддержки ..., 2019).

В модуле STAMP проведена программная реализация моделей атмосферной диффузии и расчёта доз облучения по стандартным методикам. В модуле RIMPUFF выполнена программная реализация мезомасштабной модели атмосферной диффузии, разработанной в национальной лаборатории RISO, Дания (Thykier-Nielsen et al., 1998).

Мезомасштабная модель атмосферной

диффузии RIMPUFF предназначена для прогноза распространения загрязнённой примеси при выбросах от одного или нескольких источников переменной мощности. Модель позволяет учитывать не стационарность и пространственную изменчивость поля ветра и состояний устойчивости атмосферы в условиях сложного рельефа и применяется для восстановления картины загрязнения на расстоянии до 50 км от места выброса. Распространение примеси моделируется серией клубов, имеющих Гауссову форму во всех трёх измерениях и перемещающихся в поле ветра. Результатом работы модели является пространственно-временной набор полей значений мгновенных или интегральных концентраций примеси в воздухе и на подстилающей поверхности (Thykier-Nielsen et al., 1998).

Общим недостатком стандартных моделей Гауссовой струи является невозможность их применения при реальных нестационарных и неоднородных атмосферных ситуациях. Погрешность их результатов увеличивается с изменением расстояния. Радиус действия ограничивается несколькими десятками километров. Стандартное моделирование диффузии при неоднородных и нестационарных условиях ограничивается множественностью характеристик потоков, имеющих место при таких условиях. Модель RIMPUFF решает проблемы, связанные с большим количеством характеристик атмосферных потоков, моделируя струю множеством отдельных клубов, самостоятельно передвигающихся в поле меняющегося ветра. На каждом временном шаге модель рассчитывает перенос, диффузию и осаждение индивидуальных клубов в соответствии с локальными метеорологическими условиями. Общее поле загрязнения строится как суперпозиция концентраций отдельных клубов и хранится в равномерной сетке заданного разрешения. Учитывается сухое и влажное осаждение примеси, а также радиоактивный распад вещества (Thykier-Nielsen et al., 1998).

В качестве входной метеорологической информации используются поля приземного ветра, поля индекса стратификации или дисперсии флуктуации направления ветра, поля осадков, построенные на весь расчётный период с определённым временным разрешением внешними программами по данным ближайших метеорологических станций. Обязательной информацией является поле ветра. Подготовка метеоинформации вынесена в отдельный программный блок с целью уменьшения времени моделирования и унификации потоков данных. Кроме того, необходимая во многих случаях прогностическая информация может быть подготовлена только в специализированных прогностических центрах.

Исходными данными для расчёта доз являются, в общем случае, пространственно-временные поля мгновенных приземных концентраций радиоактивных продуктов в воздухе и интегральных концентраций выпадений, полученных из модельных расчётов или построенных на основе первичных данных, хранящихся в базе данных загрязнений.

Методика расчёта рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах реализована в рамках Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) (РД 52.18.717, 2009).

Система НОСТРАДАМУС предназначена для оперативного (автономного) прогнозирования радиационной обстановки при выбросах радиоактивных материалов во время аварий на атомных станциях и других ядерных объектах (Арутюнян и др., 1995). Система может быть использована для поддержки принятия решений в реальном времени на начальной (острой) фазе радиационной аварии (Арутюнян и др., 1995). Математическая модель, используемая в этой системе, относится к Лагранжево-стохастической модели распространения радионуклидов в атмосфере. Эта модель требует существенно больше вычислительных ресурсов и времени для расчёта, чем Гауссовы модели, но возможности современной компьютерной техники позволяют проводить расчёты в рамках этой модели в режиме реального времени (Арутюнян и др., 1995).

НОСТРАДАМУС содержит две дозиметрических модели для вычисления дозы внешнего облучения от загрязнённого воздуха. По первой модели определяется доза от

однородного облака бесконечной протяжённости с заданной плотностью активности. Эта простая модель используется, когда размеры радиоактивного облака достаточно велики. Однако она становится некорректна, когда характерный масштаб изменения плотности активности сопоставим или меньше характерной длины пробега фотонов в воздухе (Арутюнян и др., 1995).

В этих случаях применяется другая дозиметрическая модель, позволяющая корректно рассчитывать дозу облучения от облака произвольной формы и размеров. Во второй модели мощность дозы рассчитывается как сумма мощностей от всех пробных точек, составляющих облако. Каждая точка рассматривается как точечный источник с известными активностью и радионуклидным составом. Метеорологические условия и параметры источника могут меняться со временем. При наличии достоверной информации об источнике и о параметрах атмосферной дисперсии модель даёт несмещённую оценку, т.е. отклонения в обе стороны практически равновероятны, и распределение имеет максимум, приходящийся на измеренное значение (Арутюнян и др., 1995).

Результаты расчёта имеют некоторый случайный разброс вокруг среднего значения в силу стохастического характера модели, в которой распространение выброса представляется движением большого количества пробных точек (метод Монте-Карло). Выходными данными системы являются приземные объёмные активности нуклидов, плотности радиоактивных выпадений, а также прогнозируемые дозы и мощности дозы от разных нуклидов и по разным путям облучения.

На основе системы НОСТРАДАМУС в ИБРАЭ РАН разработана компьютерная система РОМ, предназначенная для оценки радиационной обстановки при атмосферных выбросах радиоактивных веществ на АЭС и других объектах ядерной энергетики в аварийных режимах и при нормальной эксплуатации (Программное средство …, 2018). Система может использоваться для анализа и обоснования безопасности ядерного объекта, а также для поддержки принятия решений в реальном времени на начальной (острой) фазе радиационной аварии.

В системе РОМ реализована Лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса, основанная на решении уравнения турбулентной диффузии методом статистических испытаний (Монте Карло). Кроме Лагранжевой траекторной модели атмосферного переноса, которая отличает систему РОМ от широко распространённых гауссовых методик, код содержит следующие модели:

- модель пограничного слоя атмосферы для восстановления вертикальных профилей метеорологических параметров по данным измерений на приземном уровне;
- методика для определения категории стабильности атмосферы по синоптическим признакам.

Совокупность этих моделей даёт дополнительные возможности по отношению к гауссовым моделям:

- рассчитывать перенос загрязнений на расстояния до сотни километров;
- учитывать реальную трёхмерную неоднородность ветрового поля в пределах атмосферного пограничного слоя;
- рассматривать источник произвольной конфигурации и формы;
- учитывать дисперсный состав аэрозольных частиц;
- учитывать изменение со временем параметров источника и метеорологических условий;
- рассчитывать влияние рельефа местности на процесс рассеивания;
- рассчитывать влияние осадков с интенсивностью, зависящей от времени и координат.

Следует отметить, что система РОМ обеспечивает расчёт распространения радионуклидов только в воздушной среде. Миграция радионуклидов в почве и водной среде не учитывается. Используемые в РОМ дозиметрические модели неприменимы для оценки больших доз облучения, приводящих к детерминированным эффектам. Система РОМ позволяет рассчитывать следующие параметры:

- мгновенные значения приземных концентраций радионуклидов в аэрозольной и/или газовой форме;

• временные интегралы концентраций;

• поверхностные активности радионуклидов (плотности радиоактивных выпадений);

• мощности дозы и дозы от каждого радионуклида (или суммарные от всех нуклидов) на разные органы с учётом возрастных групп и по разным путям облучения;

• параметры радиационной обстановки при кратковременных выбросах с выбором наиболее неблагоприятных метеорологических условий;

• параметры радиационной обстановки при продолжительных выбросах с использованием реальных метеорологических данных временных рядов;

• среднегодовые дозы облучения населения вокруг предприятия ядерной энергетики при регулярных выбросах при нормальной эксплуатации с использованием реальных метеорологических данных временных рядов;

• скорость гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия.

Код РОМ ориентирован на расчёт доз облучения, которые могут быть получены населением как непосредственно в процессе воздействия радиоактивного облака, так и в течение длительного периода после аварии или от постоянно действующего источника при нормальной эксплуатации. Для обеспечения расчёта облучения на длительных временных интервалах в код РОМ была введена модель облучения по пищевым цепочкам.

Расчёт доз облучения населения основывается на дозовых коэффициентах, значения которых получены в результате анализа публикаций (Методы расчёта ..., 1992; Панченко и др., 2015; РБ-106-15, 2015; Руководство ..., 1998; IAEA, 2001; IAEA, 2014; ICRP, 1994). В базу данных включены данные для 118 радионуклидов, значимых с точки зрения дозообразования и имеющихся в заметных количествах в активной зоне реакторов.

В заключение следует отметить, что все упомянутые программные средства имеют ведомственную принадлежность и недоступны широкому пользователю.

Международные модели и коды для оценки доз облучения человека

Как уже отмечалось, оценка доз облучения населения в результате радиоактивных выбросов в условиях нормальной эксплуатации предприятий ЯТЦ является сложной и комплексной задачей. Совокупность миграционных и дозиметрических моделей может быть представлена в виде единого программного пакета с интерфейсом пользователя или методических указаний/рекомендаций. К настоящему времени разработан ряд международных программных пакетов, предназначенных для оценки дозовых нагрузок на человека в случае штатной работы предприятий ЯТЦ. К ним относятся: RESRAD, CROM, PC-CREAM 08® (Карпенко и др. 2011, Карпенко и др., 2017).

Код CROM

Программный пакет или код CROM позволяет выполнить оценку дозовых нагрузок на критические группы населения в рамках различных сценариев. Модели, входящие в состав данного пакета, относятся к классу "screening models", то есть, моделей первичной консервативной оценки, а степень консерватизма оценённых доз определяется значениями параметров, использованных в расчётах (Suáñez, Robles, 2011).

Код CROM применим при непрерывных выбросах в окружающую среду. В этом случае можно принять допущение о том, что распределение радионуклидов в компонентах окружающей среды является квазиравновесным. В рамках возможных сценариев рассматриваются выбросы радионуклидов в атмосферу и радиоактивные сбросы в водные объекты (реки, эстуарии, морские береговые воды и озёра или водохранилища). Во всех случаях рассчитывается дисперсия радионуклидов в среде в результате процессов диффузии и миграции. В результате проведения расчётов оцениваются концентрации радионуклидов в компонентах окружающей среды и дозовые нагрузки на критические группы населения с учётом различных путей поступления радиоактивных веществ в организм человека.

При незначительном радиоактивном

загрязнении, формируемом штатными радиоактивными выбросами АЭС, рациональным представляется точечный консервативный подход. В рамках этого подхода расчёты проводятся для «точки», расположенной в определённом направлении и на определённом расстоянии от источника выброса. Консерватизм оценок заключается в том, что параметры выбираются для условий максимальной концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы, и принимается во внимание, что миграция радионуклидов после осаждения на земную поверхность протекает в заданной точке (Карпенко и др., 2018).

Программный пакет CROM характеризуется оптимальным уровнем сложности (для решения поставленной задачи) и хорошо проработанным параметрическим обеспечением. Данный пакет разработан с учётом информации, представленной в документе МАГАТЭ SRS № 19 (IAEA, 2001), с некоторыми добавлениями, взятыми из документа Европейской комиссии RP-72.

Миграция радионуклидов в воздухе после выброса осуществляется процессами адвективного переноса и турбулентной диффузии. После чего возможны два типа осаждения радиоактивных аэрозолей на поверхность почвы – сухое и влажное. Программный пакет CROM также позволяет учитывать влияние зданий, размещённых в радиусе пункта выброса (IAEA, 2014).

Расчёт атмосферной дисперсии для случая непрерывного выброса осуществляется с помощью гауссовой дисперсионной модели. Эта модель может принимать различные формы, в зависимости от соотношения между эффективной высотой выброса и высотой зданий, которые влияют на направление потока выброса вокруг источника.

Код RESRAD

RESRAD (RESidual RADioactivity) – программный код для оценки дозы облучения населения и персонала на радиоактивно загрязнённых территориях. Он позволяет оценить эффективную эквивалентную дозу в соответствии с рекомендациями DOE (Department of Energy) по оценке дозы и риска от хронического облучения (Yu et al., 2003). В программном средстве рассматривается радиоактивное загрязнение почвы, миграция радионуклидов в воздухе, воде, а также накопление биотой. Рассмотрены 9 путей облучения: прямое, ингаляция (аэрозоли и радон), пероральное поступление радионуклидов с продуктами питания водных пищевых цепочек, растительного и животного (мясо, молоко) происхождения, с водой и почвенными частицами. При этом содержание радионуклидов в почве и биотических компонентах экосистем, дозовые нагрузки и риск радиационного облучения вычисляются для заданных временных интервалов (Yu et al., 2003).

RESRAD использует одномерную модель переноса для учёта раздельного транспорта нуклидов с различными коэффициентами распределения, учитывая процессы радиоактивного распада, накопления, выщелачивания, эрозии и перемешивания. Данный программный продукт может применяться для прогнозирования радиационной обстановки на территориях с существующим радиоактивным загрязнением, для определения критериев реабилитации, мониторинга, оценок доз облучения и радиационного риска населения.

Код PC-CREAM 08

PC-CREAM 08 предназначен для выполнения оценки радиологического воздействия в случае продолжительных штатных выбросов радионуклидов в окружающую среду. Данный программный код используется для оценки индивидуальных и коллективных доз, полученных в результате выбросов радионуклидов в воздушную и водную среды (Smith, Simmonds, 2009). Он включает в себя два основных блока: «Модели» и «Оценки» ("ASSESSOR").

Блок «Модели» включает в себя ряд программных модулей (PLUME, RESUS, GRANIS, FARMLAND и т.д.), которые позволяют прогнозировать миграцию радионуклидов в среде и провести оценку объёмной активности в различных природных средах в результате продолжительных выбросов. Все полученные в этом блоке результаты становятся исходными данными для блока «Оценки», который непосредственно используется для

оценки доз.

Модуль PLUME предназначен для прогнозирования распространения радионуклидов в атмосфере с помощью Гауссовой модели атмосферной дисперсии, которая учитывает метеорологические условия в течение выброса, шероховатость поверхности и физические характеристики выбрасываемых радионуклидов. Модуль рассчитывает объёмную активность в воздухе, скорость осаждения и внешнюю дозу гамма-облучения от облака на различных расстояниях от источника выброса. Полученная скорость осаждения используется для результатов расчётов других модулей, а именно: RESUS, GRANIS и FARMLAND, а также для оценки доз от различных путей облучения, причиной которых являются выбросы радионуклидов в атмосферу.

Модуль RESUS может использоваться для оценки объёмных активностей в результате вторичного подъёма радионуклидов с поверхности. Результаты расчётов затем комбинируются с информацией об образе жизни населения и используются в блоке «Оценки» для вычисления доз от ингаляции, вторично поднятых с поверхности почвы радионуклидов.

Доза внешнего облучения от осаждённых на поверхность почвы радионуклидов рассчитывается модулем GRANIS, который воспроизводит миграцию радионуклидов в вертикальном профиле и учитывает экранирующие свойства почвы при расчёте доз на высоте одного метра над поверхностью. Модуль GRANIS включает в себя расчёты эквивалентных доз для органов человека и эффективной дозы его облучения.

Модуль FARMLAND представляет собой набор математических моделей для прогнозирования миграции радионуклидов по пищевым цепочкам, при этом рассматриваются наиболее значимые продукты питания, а именно: зелёные овощи, корнеплоды, фрукты, зерновые, молочные продукты, говядина, баранина (Smith, Simmonds, 2009).

Также в PC-CREAM 08 присутствуют модели рассеивания примесей в морской среде и реках. DORIS – это модель рассеивания примесей в морской среде, которая используется для прогнозирования удельной активности в морской воде, осаждения радионуклидов и их накопления в морской биоте для определённых пользователем скоростей сброса загрязняющих веществ. Результаты данной оценки используются блоком «Оценки» для вычисления доз от потребления морепродуктов, внешнего облучения от пребывания на берегу моря и вдыхания морских испарений.

В программный пакет включены две модели рассеивания радионуклидов в реках: простая и динамическая. Простая модель допускает растворение с достижением мгновенного равновесия между водой и речными отложениями, и её рекомендуется использовать для скрининга. Для более детальной оценки используется динамическая компартментная модель, требующая большого количества входных данных (Smith, Simmonds, 2009).

Сравнительный анализ международных дозиметрических моделей

Данные по содержанию радионуклидов в компонентах окружающей среды, полученные при проведении радиоэкологического мониторинга, используются для расчёта дозовых нагрузок на население. Эти данные являются входными для программных средств. Следует отметить, что задание входной информации имеет свою специфику для каждого программного средства, обусловленную его функциональными особенностями.

Например, коды семейства RESRAD, позволяют вводить информацию по содержанию радионуклидов в почве, а содержание в воздухе и воде рассчитывают посредством моделей переноса загрязняющих веществ в результате атмосферного выброса или сброса в водоём (Yu et al., 2007). Программный пакет CROM v. 6.0.3 позволяет вводить информацию по содержанию радионуклидов в приземном слое воздуха, а также содержание радионуклидов в воде (Suáñez, Robles, 2011). В версии CROM v. 8.2.4 возможность оценки доз на основании данных содержания радионуклидов в окружающей среде вовсе исключена. А методология расчётов доз облучения населения PC-CREAM 08® основана исключительно на данных

атмосферных выбросов (Smith, Simmonds, 2009).

Прогностическая оценка воздействия радиационного фактора на население и природные объекты в период, предшествующий строительству и эксплуатации АЭС, является необходимым этапом в процессе контроля качества окружающей среды на территориях, прилегающих к этим объектам. Прогнозирование возможно только на основе математических моделей, описывающих радиоэкологические процессы, с целью получения количественных результатов. Результаты модельных расчётов можно использовать для принятия решений.

В случаях низких ожидаемых доз облучения населения или недостатка информации о параметрах миграции радионуклидов дозы на человека можно оценивать на основе упрощённых подходов и консервативных допущений. По мере того, как значения доз приближаются к контрольному уровню (дозовому пределу), возникает необходимость повышения уровня сложности моделей с использованием параметров, специфичных для рассматриваемой территории.

Увеличение сложности расчётных инструментов соответствует последовательности выполняемых этапов. На первом этапе исследований формулируется допущение о том, что человек (представитель критической группы) находится в месте осуществления радиоактивного выброса. На втором этапе используются упрощённые миграционные модели с общими значениями параметров. На третьем этапе вышеупомянутые модели параметризуются на основе конкретных данных, учитывающих особенности метеорологической и экологической обстановки в рассматриваемом регионе, рацион потребления населением местных продуктов питания и т.д. В рамках четвёртого этапа расчёты выполняются посредством разработанных специфических моделей для сценариев с использованием всех местных данных и параметров.

В рамках наиболее важных возможных сценариев проводится анализ выбросов радионуклидов в атмосферу и рассчитывается дисперсия радионуклидов в среде в результате процессов диффузии и миграции. В итоге выполняется оценка содержания радионуклидов в компонентах окружающей среды. В дальнейшем рассчитываются дозовые нагрузки на критические группы населения с учётом различных путей поступления радиоактивных веществ в организм человека.

Перемещение радионуклидов в воздухе после выброса оценивается на основе процессов конвективного переноса и турбулентной диффузии. Рассматриваются два типа осаждения радиоактивных аэрозолей на поверхность почвы – сухое и влажное.

Программное средство CROM применимо при непрерывных и затяжных выбросах в окружающую среду. В этом случае можно принять допущение о том, что распределение радионуклидов в компонентах окружающей среды является квазиравновесным. В рамках возможных сценариев предусматриваются выбросы радионуклидов в атмосферу и радиоактивные сбросы в водные объекты (реки, эстуарии, морские береговые воды и озёра или водохранилища). Во всех случаях рассчитывается дисперсия радионуклидов в среде в результате процессов диффузии и миграции. В результате оцениваются концентрации радионуклидов в компонентах окружающей среды. В дальнейшем рассчитываются дозовые нагрузки на критические группы населения с учётом различных путей поступления радиоактивных веществ в организм человека.

Расчёт атмосферной дисперсии для случая непрерывного выброса осуществляется с помощью гауссовой дисперсионной модели. Эта модель может принимать различные формы, в зависимости от взаимоотношения между эффективной высотой выброса и высотой зданий, которые влияют на потоки воздуха вокруг пункта выброса (IAEA, 2001).

Расчёт концентрации радионуклидов в продуктах питания выполняется исходя из предварительно рассчитанных концентраций радионуклидов в воздухе с учётом их накопления в почве и перехода в каждую рассматриваемую группу продуктов питания. Расчёт концентрации радионуклидов в животноводческой продукции (мясе, молоке и яйцах) выполняется в два этапа. На первом этапе вычисляется концентрация

радионуклидов в продукции кормопроизводства, на втором этапе – в животноводческой продукции.

Оценка дозовых нагрузок на население выполняется на основе рассчитанных концентраций радионуклидов в воздухе, воде, почве и продуктах питания. В случае внешнего облучения учитываются четыре пути формирования доз:

- погружение в облако выброса;
- облучение радионуклидами, накопленными в почве;
- облучение радионуклидами, в накопленными в береговых отложениях;
- погружение в воду во время купания.

В случае внутреннего облучения рассматриваются три пути поступления радионуклидов в организм человека:

- пероральное поступление с пищей;
- пероральное поступление с водой;
- ингаляция.

Оценка доз выполняется для шести возрастных групп. Вычисляются годовые эффективные дозы внешнего облучения для каждого радионуклида и каждой возрастной группы с помощью совокупности выражений. Доза внешнего облучения при погружении в воду вычисляется как сумма трёх компонентов: вклад радионуклидов, растворённых в воде, вклад радионуклидов, присутствующих в осадках, и вклад радионуклидов, входящих в состав взвешенных в воде частиц. Исходя из установленных концентраций в продуктах питания, в воде и в воздухе, вычисляются эффективные дозы внутреннего облучения для каждой возрастной группы населения.

Компьютерные технологии для сбора, хранения, анализа и представления пространственно-распределённых данных

В настоящее время в Российской Федерации существует большое количество предприятий ядерно-топливного цикла. Для обеспечения экологической безопасности при их штатной эксплуатации необходимо контролировать все компоненты окружающей среды. Для такого рода контроля необходима сеть мониторинга, контролирующая все ключевые компоненты окружающей среды, на которые возможно воздействие выбросов и сбросов с объектов ЯТЦ. При этом она должна предоставлять объективную информацию о радиационно-экологическом состоянии прилегающих территорий.

Одной из приоритетных задач повышения эффективности ведения системы радиационно-экологического мониторинга атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем в регионах размещения радиационно-опасных объектов является оптимизация информационных потоков радиоэкологических данных, их обработки, хранения и представления для принятия управленческих решений и ситуационных прогнозах развития радиационной обстановки. Для анализа радиоэкологической ситуации в районе размещения предприятий ЯТЦ на всех этапах эксплуатации существует необходимость радиоэкологического обследования территории для получения информации о тех или иных параметрах окружающей среды (Титов и др., 2019).

Полученная информация должна быть отобрана, обработана, систематизирована и представлена в виде стандартного пакета данных, открытых для последующего уточнения, обработки, анализа и детализации, а также пригодных для формирования легко используемых на практике аналитических информационно-справочных систем.

Использование современных средств управления базами данных (СУБД) позволяет существенно изменить характер обращения с радиологической информацией, начиная с хранения данных и обработки полученных результатов до поддержки принятия решений по реализации программ контроля, проведения различных мероприятий по реабилитации загрязнённых территорий, а также по организации размещения новых объектов. Кроме этого, базы данных позволяют анализировать информацию и преобразовывать данные в необходимый для анализа вид.

Информационные базы данных насыщаются большим количеством вспомогательной справочной информации, что сводит к минимуму число возможных ошибок при работе с ними специалистов с минимальным опытом работы на компьютере. Повышенная лояльность к ошибкам в действиях

пользователя достигается встроенной системой внутреннего контроля и значительно упрощает практическое использование информационно-справочных систем (ИСС) (Васенев, Пакина, 2008).

В ФГБНУ ВНИИРАЭ разработан ряд информационных баз данных, например, на основании результатов проведённого комплексного радиоэкологического обследования в районе расположения АО «Сибирского химического комбината» (АО «СХК») – базового предприятия для реализации проекта по созданию в России замкнутого ядерного топливного цикла. АО «Сибирский химический комбинат» является предприятием, объединяющим четыре завода по обращению с ядерными материалами, то есть является предприятием повышенного радиационного риска. На основе данных мониторинга, проводимого ВНИИРАЭ и данных, предоставленных различными службами, была создана база данных радиационно-экологической обстановки в районе АО «СХК». Основу базы данных составляют таблицы для хранения информации. Она хранит все данные в одном файле, хотя и распределяет их по разным листам, включая следующие блоки информации:

- содержание радионуклидов в пробах почвы;
- содержание радионуклидов в пробах растительности;
- содержание радионуклидов в пробах поверхностных вод;
- содержание радионуклидов в пробах донных отложений;
- содержание тяжёлых металлов 1-го класса опасности в пробах почвы;
- содержание тяжёлых металлов 2-го класса опасности в пробах почвы;
- содержание тяжёлых металлов 3-го класса опасности в пробах почвы;
- содержание тяжёлых металлов 1-го класса опасности в пробах растительности;
- содержание тяжёлых металлов 2-го класса опасности в пробах растительности;
- содержание тяжёлых металлов 3-го класса опасности в пробах растительности;
- характеристики сельскохозяйственных угодий.

Всего в базу данных занесено 3710 записей в 11 таблицах. Наибольшее количество записей содержится в таблицах «Сельскохозяйственные угодья», «Растительные пробы» и «Почвенные пробы».

Для обеспечения хранения, систематизации, поиска и анализа информации, полученной в результате проведения радиационного мониторинга, на радиоактивно загрязнённых территориях Российской Федерации созданы «База данных радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель в отдалённый период после аварии на ЧАЭС» и «Электронный реестр земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения».

«База данных радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель в отдалённый период после аварии на ЧАЭС» содержит информацию о радиоактивном загрязнении сельскохозяйственных земель и сельскохозяйственной продукции (Шубина и др., 2015). Интерфейсы и формы для ввода и просмотра базы данных радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель в отдалённый период после аварии на ЧАЭС и электронного реестра земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения показаны на рисунках 2–5.

Блок радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель содержит следующую информацию:

- административно-хозяйственные и экономические характеристики сельскохозяйственного предприятия;
- характеристики сельскохозяйственных угодий (структура землепользования, характеристики почвенного покрова и т.д.);
- характеристика радиационной обстановки;
- перечень основных мероприятий по преодолению последствий аварии на ЧАЭС в хозяйстве.

Блок радиационного контроля продукции содержит:

- обозначение места отбора (идентификатор места отбора проб),
- вид контролируемой продукции и характеристика пробы с результатами измерений содержания ^{137}Cs, а также датой отбора проб.

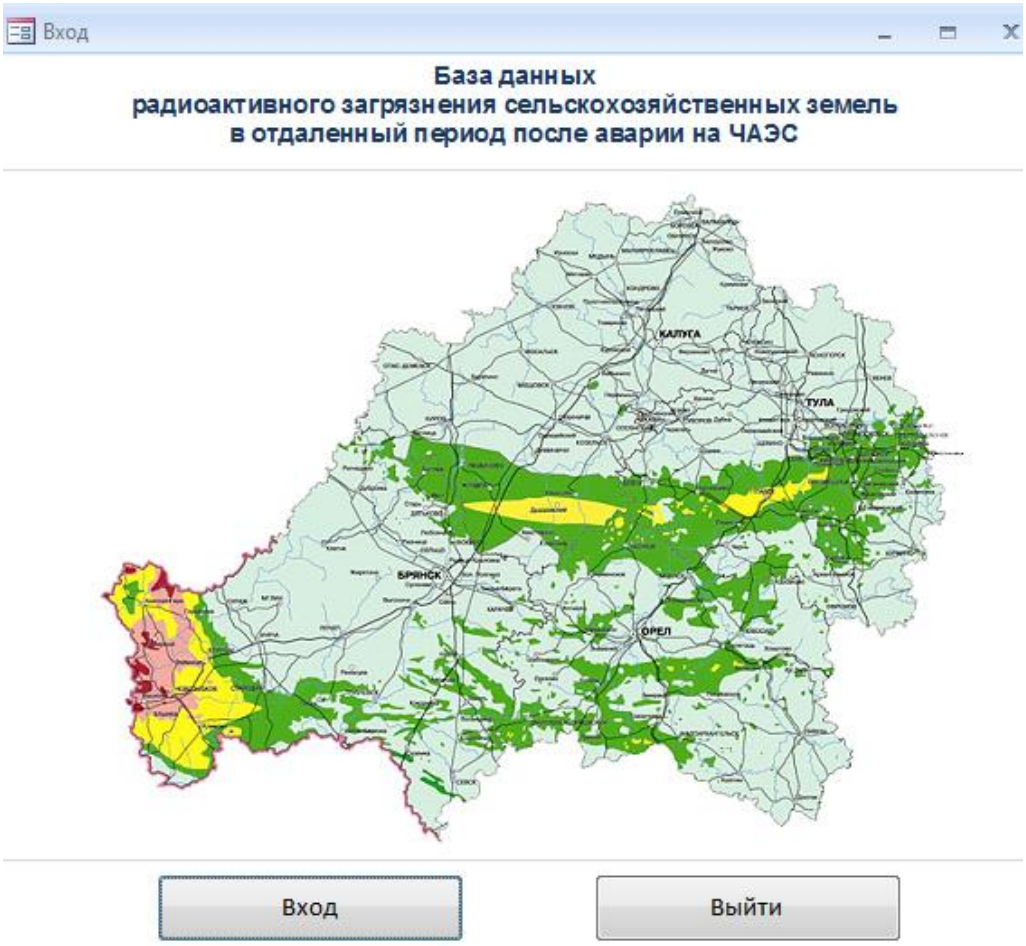


Рисунок 2. Интерфейс базы данных по радиоактивному загрязнению сельскохозяйственных земель после аварии на ЧАЭС

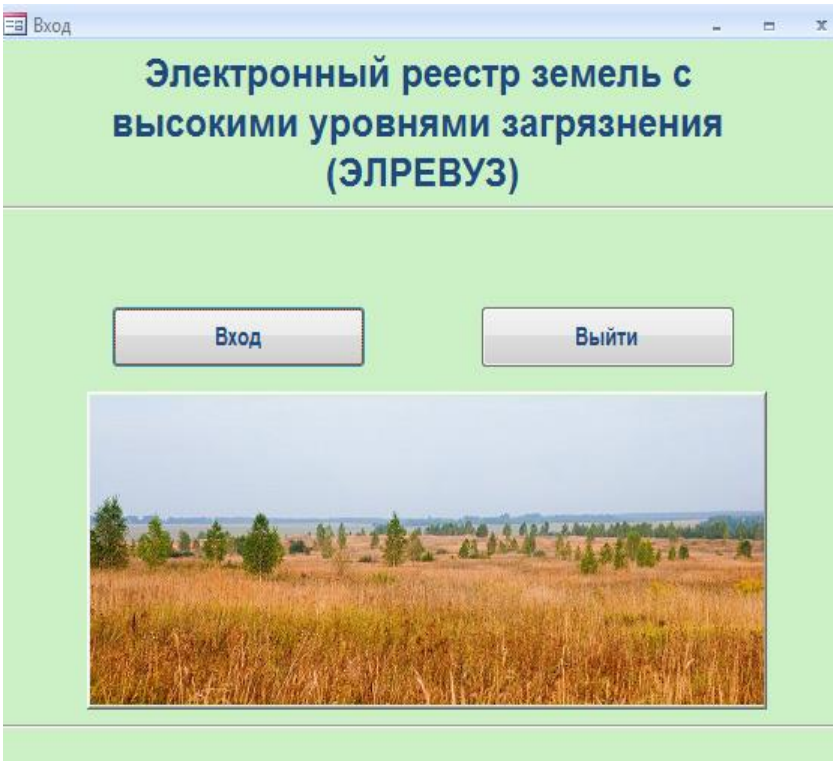


Рисунок 3. Интерфейс электронного реестра земель с высокими уровнями загрязнения

Рисунок 4. Формы для ввода и просмотра данных в базе данных по радиоактивному загрязнению сельскохозяйственных угодий

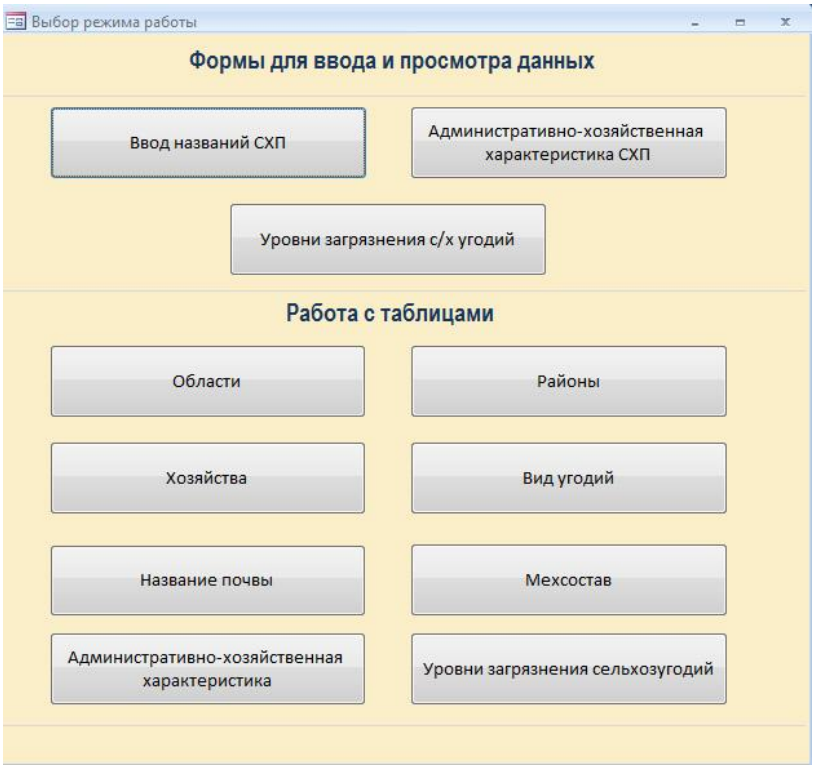


Рисунок 5. Главные формы баз данных и формы для ввода и просмотра данных

В базу данных включена информация о 163 сельскохозяйственных предприятиях Брянской, Калужской, Тульской и Орловской областей. Блок радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель содержит 46,7 тыс. записей. Блок радиационного контроля продукции содержит данные более, чем для 70 видов продукции, полученной как в общественном (продукция сельскохозяйственных предприятий), так и в частном секторе (личные подсобные хозяйства). Всего в базу данных внесено более 250 тыс. записей.

«Электронный реестр земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения» включает следующие блоки информации (Шубина, Титов, 2016):

- административно-хозяйственные характеристики сельскохозяйственного предприятия до вывода земель из оборота;
- характеристики сельскохозяйственных угодий (структура землепользования, характеристики почвенного покрова и т.д.) до вывода земель из оборота;
- данные о современной радиационной обстановке на выведенных из оборота сельскохозяйственных землях.

Всего по уровням загрязнения сельскохозяйственных угодий база данных содержит 1,9 тыс. записей.

Большой объём пространственной и атрибутивной информации качественно можно обрабатывать, анализировать и визуализировать только при помощи специального программного обеспечения, учитывающего как пространственную привязку, так и специализированные сведения о радиоактивно опасных объектах. Наиболее удобным способом для ознакомления с радиоэкологической ситуацией при принятии решений в районе радиационно-опасных объектов являются геоинформационные системы.

Базовое определение геоинформационной системы (ГИС) подразумевает аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий систематизацию, обработку, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Выделяются растровые и векторные виды ГИС, отличающиеся принятой в них системой координат и типом цифрового представления (оцифровки) информации. Оба вида ГИС могут активно применяться в геоинформационном обеспечении радиоэкологического мониторинга (Кащенко, 2012).

Современные ГИС способны оперативно обрабатывать огромные массивы информации и визуализировать данные радиационно-экологического мониторинга. Основанием для разработки ГИС-проекта и его атрибутивной основой являются полученные в ходе радиационно-экологического мониторинга атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем в районе размещения ядерных предприятий, объединённые в специализированные БД данные.

Разработка и внедрение единой системы радиационно-экологического мониторинга, создание электронных баз данных с применением ГИС-технологий дают возможность на основе наблюдений и исследований оценить современное состояние и дать прогнозную оценку радиационной обстановки в районе размещения предприятий ядерного цикла. Для формирования ГИС-проекта в рамках системы радиационно-экологического мониторинга в районе размещения объекта необходимы следующие виды данных (Титов и др., 2019):

- картографические материалы (топографические и общегеографические карты, карты административно-территориального деления, кадастровые планы и др.);
- данные дистанционного зондирования (аэро- и наземные съёмки местности, гидроакустические съёмки рельефа морского дна и др.);
- данные радиационно-экологического мониторинга атмосферного воздуха, наземных и водных экосистем;
- статистические данные (гидрологические и метеорологические данные, сведения о загрязнении окружающей среды и т.д.);
- литературные данные (справочные издания, книги, монографии и статьи, содержащие сведения по отдельным типам географических объектов).

Создание ГИС радиоактивно-опасных объектов необходимо проводить на нескольких уровнях, согласно иерархии потребностей управленческого аппарата и оценкой экологической обстановки на уровне края, района, объекта. Такой подход позволит

оценить воздействие на окружающую среду как на локальном, так и на глобальном уровне.

Создание системы мониторинга с использованием геоинформационных технологий осуществляется во ВНИИРАЭ по двум основным направлениям. Основная задача первого направления состоит в получении базового картографического материала и создании банка картографической информации. Основу банка картографической информации составляют цифровые модели местности различных масштабов. Такой подход обусловлен тем, что позволяет представлять картографическую информацию в сочетании с другими информационными технологиями и системами обработки данных, а также использовать информационные продукты одного семейства на самых разных уровнях управления.

Картографическую цифровую информацию можно считать интегрирующей подложкой ГИС, на которую накладываются статистические и спутниковые данные, климатические и тематические карты, табличная и фактографическая информация.

Современные ГИС-программы позволяют провести статистическую оценку полученных данных. Также современные модули пространственного анализа позволяют смоделировать пространственное распространение тех или иных процессов, связанных с эксплуатацией радиоактивно опасных объектов. На основе проанализированных данных и смоделированных ситуаций создаются электронные карты, визуализирующие полученную информацию. Каждая электронная карта имеет базу данных, содержащую соответствующую тематике карты информацию по каждому контуру. Путём взаимного наложения тематических электронных картслоёв формируется комплексная карта радиационно-экологической обстановки территорий, расположенных вблизи объектов ЯТЦ.

Структура геоинформационной системы радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения ядерного радиационно-опасного объекта (рис. 6) представлена базовыми, информационными и расчётными слоями.

Создание такой ГИС позволяет собрать и систематизировать всю информацию о природных и радиоэкологических условиях, а также уровнях и характере загрязнения исследуемой территории и получить на основе имеющихся данных актуализированную информацию.

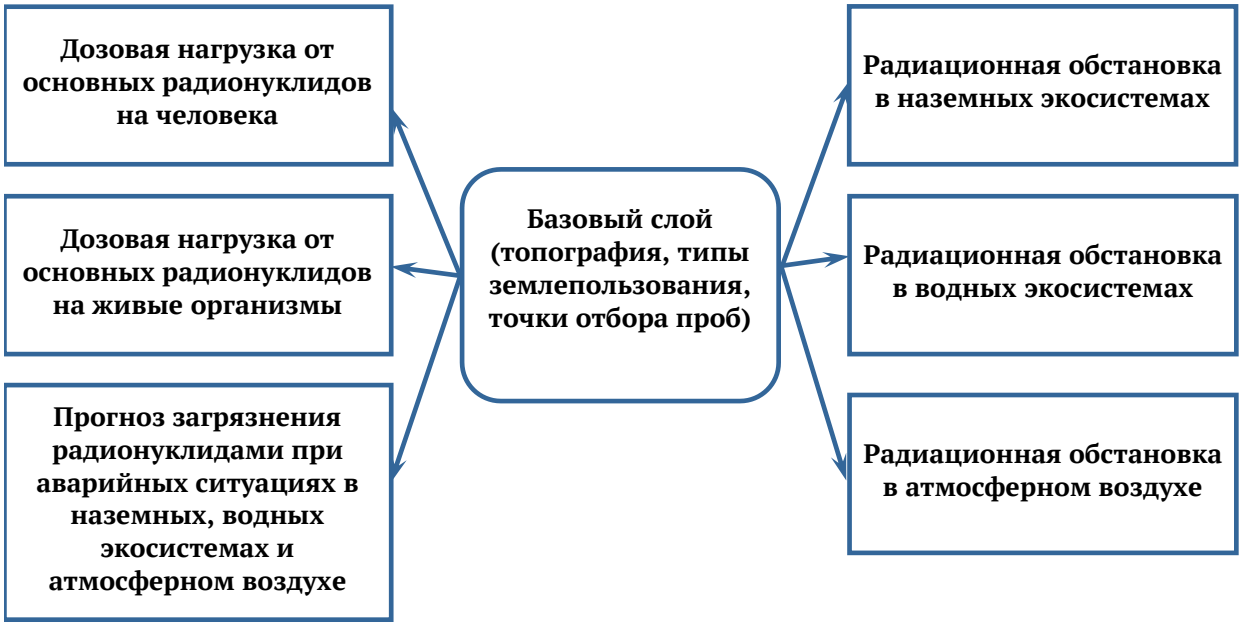


Рисунок 6. Структура геоинформационной системы радиационно-экологического мониторинга в районе размещения объектов ядерной энергетики

Созданные ФГБНУ ВНИИРАЭ на основе оцифрованных картосхем и сопряжённых с ними баз данных радиационно-экологического мониторинга ГИС-проекты радиоэкологического состояния объектов позволяют в полуавтоматизированном режиме визуализировать и анализировать разнообразную информацию по современному состоянию почвенного покрова, основным факторам функционирования объектов ЯТЦ.

На основе этой базы данных радиационно-экологической обстановки в районе расположения АО «Сибирский химический комбинат» (СХК), которая была использована в качестве хранилища атрибутивной информации, разработан ГИС-проект «Радиоэкологическая обстановка в районе расположения АО «СХК». ГИС-проект разработан в программной среде ArcGIS for Desktop 10.4.1 (рис. 7–8).

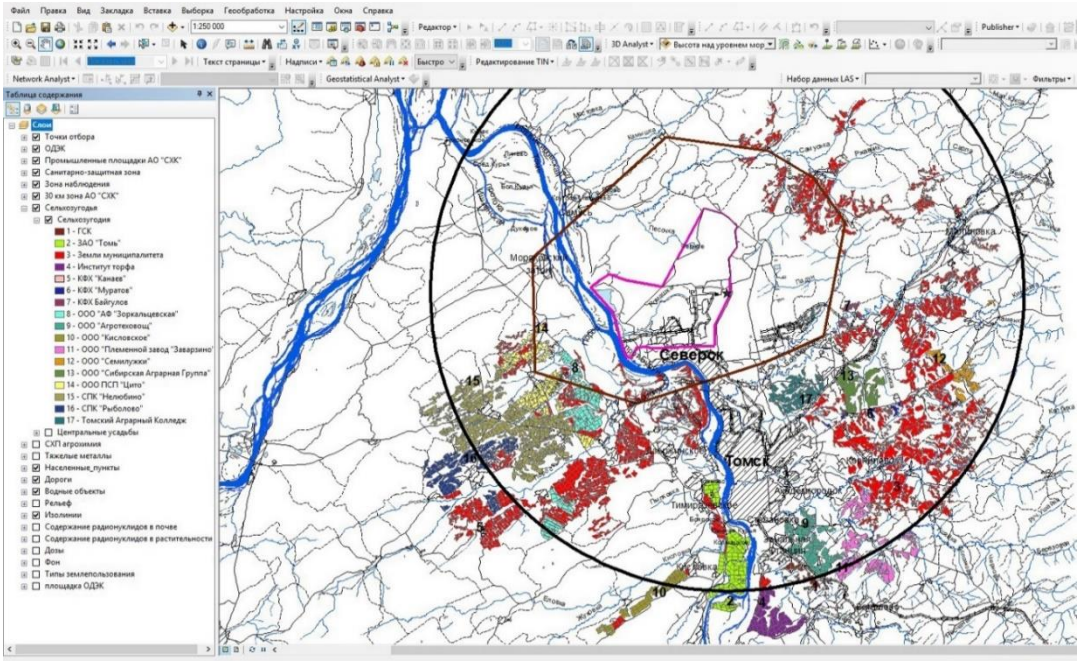


Рисунок 7. Карта расположения сельскохозяйственных угодий в зоне наблюдения АО «СХК»

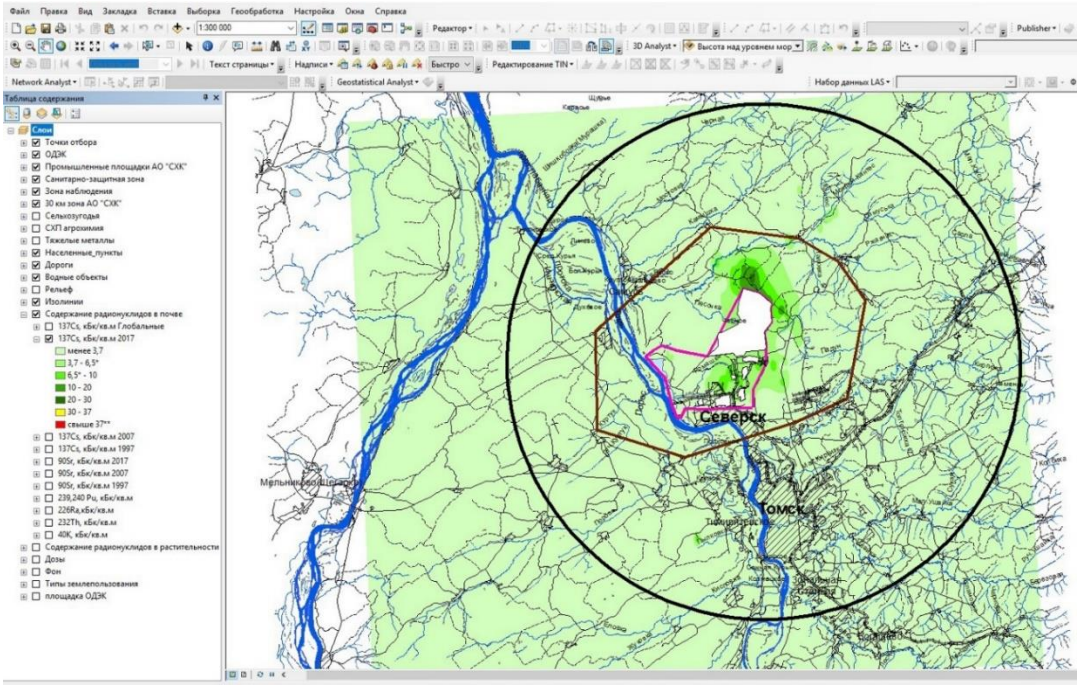


Рисунок 8. Карта поверхностной активности ^{137}Cs, кБк/м^2 в зоне наблюдения АО «СХК»

Структура ГИС-проекта представляет собой каталог для организации географической информации различного характера и управления ею как логическими наборами данных и карт. ГИС-проект включает в себя библиотеку электронных карт, содержащих 156 слоёв: координаты точек отбора проб, координаты границы 30-км зоны АО «Сибирский химический комбинат», санитарно-защитной зоны АО «СХК», границы зоны наблюдения АО «СХК» и промышленной площадки АО «Сибирского химического комбината». ГИС-проект также включает данные о содержании радионуклидов (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{239,240}Pu, ^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K) в поверхностном слое почвы, растительности, поверхностных водах и донных отложениях. Наряду с данными о радиоактивном загрязнении окружающей среды ГИС-проект содержит информацию о концентрациях тяжёлых металлов в почве и растительности, дозах облучения человека и биоты, расположении сельхозугодий в 30-км зоне АО «СХК», агрохимических показателях почв, рельефе, типах землепользования и природных объектах.

Для территории 30-км зоны наблюдения Ростовской АЭС разработан оригинальный ГИС-проект (рис. 9).

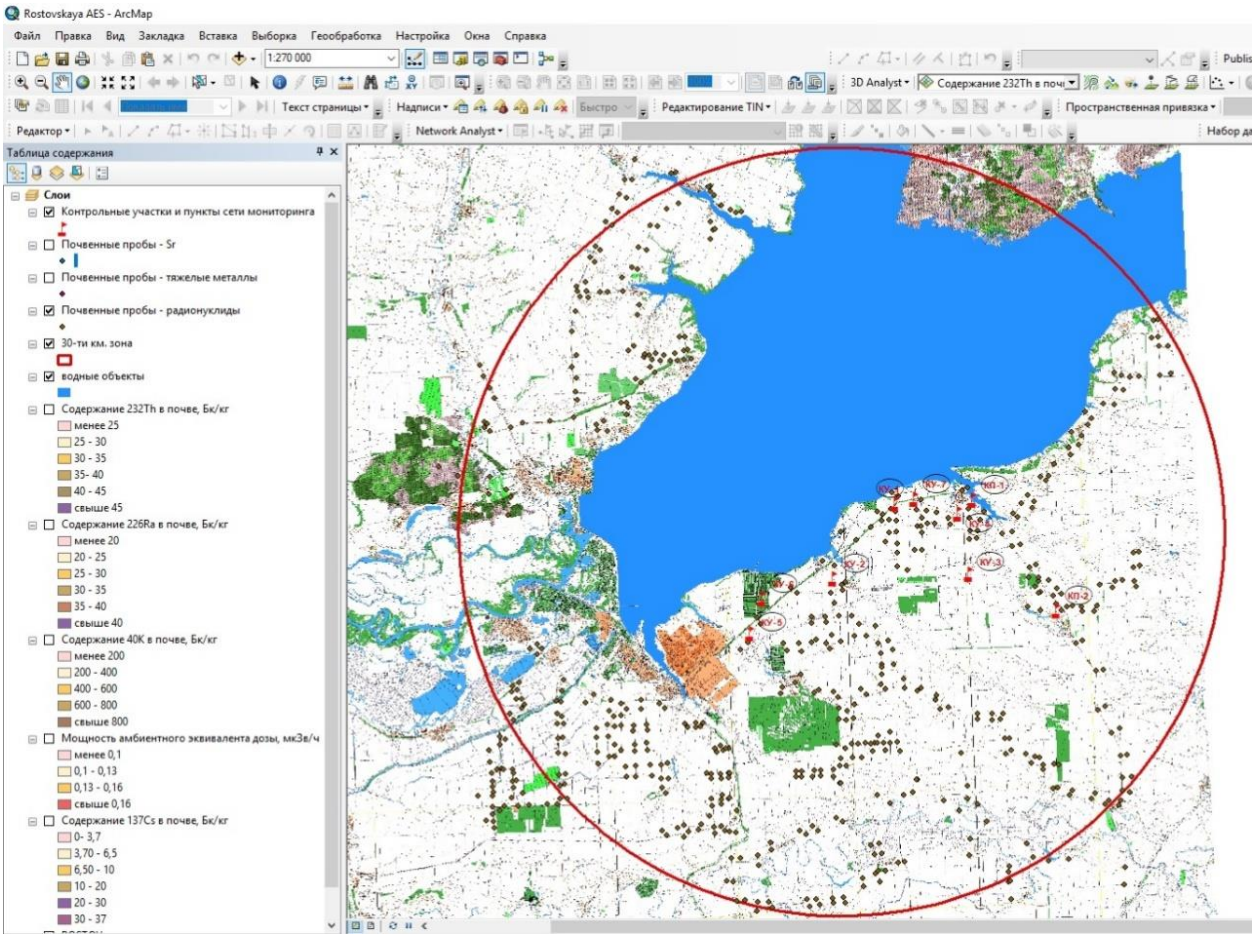


Рисунок 9. Электронная карта «Точки отбора почвенных проб» в районе Ростовской АЭС

ГИС-проект радиационно-экологического мониторинга наземных экосистем включает накопленную за 18-летний период информацию о составе и содержании радионуклидов и тяжёлых металлов в почве, растительности и сельскохозяйственной продукции. Для создания ГИС-проекта разработаны: электронные карты размещения контрольных участков и контрольных пунктов сети радиационно-экологического мониторинга, аграрных и природных наземных экосистем, распределения значений удельной активности техногенных (^{90}Sr, ^{137}Cs) и естественных (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) радионуклидов в объектах окружающей среды, распределения значений мощности амбиентного эквивалента дозы, содержания тяжёлых металлов 1–3 классов опасности (Cd, Zn, Pb, Co, Cu, Ni,

Mo, Cr, Mn, Fe) в почвах региона Ростовской АЭС (рис. 9).

ГИС-технологии также активно применялись для поддержки реабилитации территорий, подвергшихся загрязнению после аварии на Чернобыльской АЭС. На основании данных радиологических обследований, проводимых с 1986 г. по 2015 г., была создана геоинформационная система для обоснования возвращения в хозяйственный оборот территорий, временно выведенных из землепользования после аварии на ЧАЭС, включающая информацию по всем выведенным из землепользования участкам для 22 хозяйств 5-ти районов Брянской области. На рисунке 10 показан пример информации о загрязнении сельскохозяйственных угодий ^{137}Cs в хозяйстве «Комсомолец».

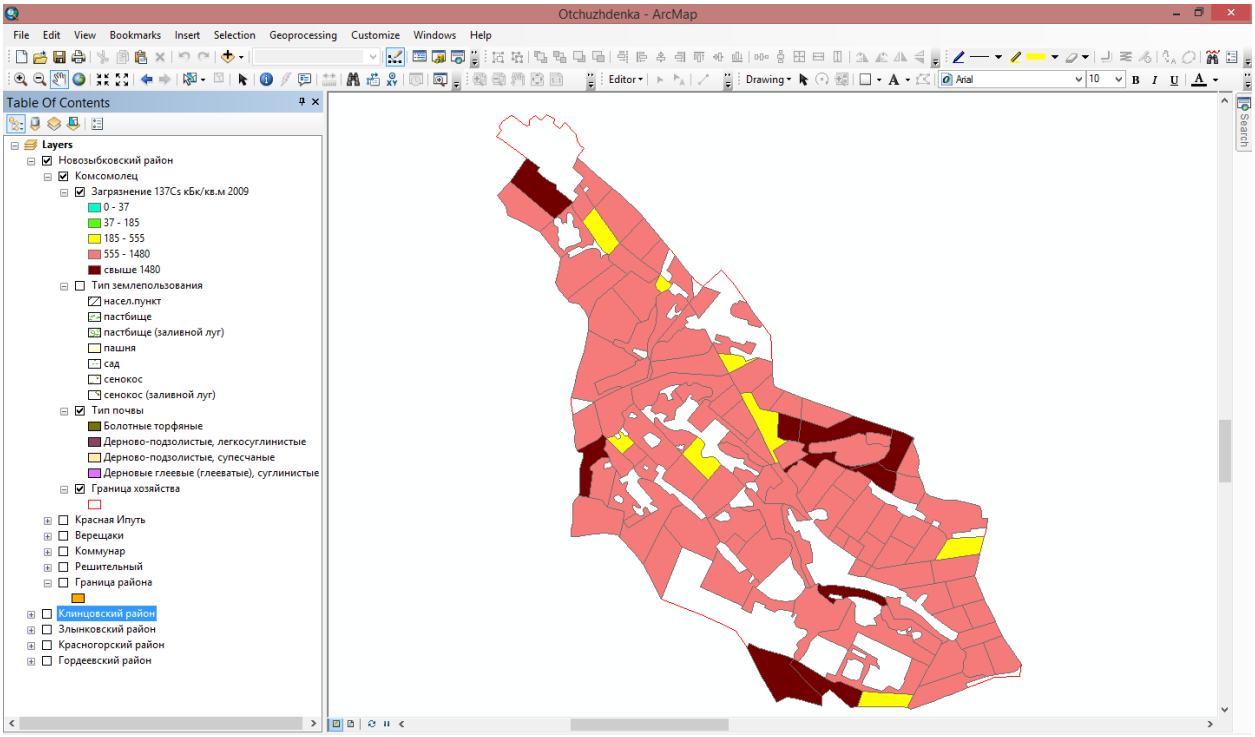


Рисунок 10. Электронная карта загрязнения ^{137}Cs СПК «Комсомолец», Брянская область

ГИС включает в себя библиотеку электронных карт для 22 хозяйств наиболее радиоактивно загрязнённых районов Брянской области, включая всю информацию, необходимую для принятия решений по реабилитации загрязнённых земель.

Для принятия решений по обращению с высоко загрязнёнными землями ГИС предлагает детальную информацию, включая: типы землепользования; плотность загрязнения по ^{137}Cs (5 туров обследования с 1988 г. по 2015 г.); почвенные карты; содержание гумуса; основные агрохимические показатели (pH, P_2O_5, K_2O); карты с прогностическими оценками возможности производства продукции растениеводства, кормопроизводства, животноводства, удовлетворяющей требованиям нормативов (СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002; СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010), при различных вариантах возделывания земель (без проведения специальных мероприятий, при условии применения реабилитационных мероприятий).

Заключение

Оценить радиационно-экологическое состояние окружающей среды и выполнить прогноз возможных негативных последствий радиоактивного загрязнения возможно только на основе комплекса взаимосвязанных элементов, таких как математические модели, базы данных, программные средства, необходимые для оценки доз облучения населения и ГИС-технологии. Данные элементы играют ключевую роль в организации и ведении радиоэкологического мониторинга в районах размещения радиационно-

опасных объектов. Данная система элементов должна иметь достаточно хорошую связь между собой для обмена информацией и быстрого принятия необходимых решений в условиях радиоактивного загрязнения.

Литература

АРМ анализа и прогноза радиационной обстановки. Руководство пользователя. Книга 2. Обнинск: НПО «Тайфун», 1995.

Арутюнян Р.В. и др. Компьютерная система НОСТРАДАМУС для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно опасных объектах // Известия академии наук, серия Энергетика. 1995. № 4. С 19–31.

АЭС-2006. Ленинградская АЭС. Отчёт о НИР. Программное средство «Рабочая студия COFAR». LN2O.P. НК.0004. М.: ЗАО Научно-технический центр «Радиоэкология человека», 2009.

Васенев И.И., Пакина Е.Н. Современные достижения в оптимизации агроландшафтов и организации устойчивых агроэкосистем. М., 2008. 105 с.

Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

ДВ-98. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. М., Госкомэкологии России, Минатом России. 1998.

Карпенко Е.И. и др. Обзор международных программных пакетов ERICA и RESRAD-BIOTA // Чернобыль: опыт международного сотрудничества при ликвидации последствий аварии: тезисы докладов международной конференции. Москва–Обнинск, 2011. С. 144–146.

Карпенко Е.И., Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э. Анализ современных программных средств для оценки доз облучения биоты // Техногенные системы и экологический риск: тезисы докладов I международной (XIV региональной) научной конференции. Обнинск, 2017. С. 255–257.

Карпенко Е.И., Спиридонов С.И., Куртмулаева В.Э. Долгосрочный прогноз дозовых нагрузок на население при штатных атмосферных выбросах Ленинградской АЭС-2 с помощью программного средства CROM // Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра «Радиация и риск». 2018. Т. 27. № 2. С. 20–27.

Кащенко Н.А. Геоинформационные системы: учебн. пос. для вузов / Н.А. Кащенко, Е.В. Попов, А.В. Чекин. Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. 130 с.

Косых В.С., Бородин Р.В., Корнейчук Н.А. RECASS NT: система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно и химически опасных объектах // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сб. статей / Под ред. М.П. Коломеева. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. Т. 3. С. 24–35.

Крылов А.Л. и др. Программное средство для расчёта радиационной ситуации, формируемой в поверхностных пресноводных объектах при воздействии со стороны объектов использования атомной энергии. Версия 1.0 (Сибилла): свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ № 2018610432 от 11.01.2018.

Ленинградская АЭС-2, энергоблоки №1 и №2. Материалы оценки воздействия на окружающую среду. Том 1, книга 1. М.: АО «Атомпроект», 2015. 399 с.

Методы расчёта распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. М.: НТД МХО Интератомэнерго, 1992.

МКРЗ (1982). Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: публикация 30 МКРЗ: пер. с англ. Ч. 1. М.: Энергоиздат, 1982. 136 с.

МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с.

МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух: методика. Обнинск: НПО «Тайфун», 2016, 76 с.

Нострадамус. Компьютерная система прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС: инструкция пользователя. М.: ИБРАЭ РАН, 2001.

Панченко С.В. и др. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту / Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. М., 2015. 265 с.

Программа ДОЗА_М. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт № 117 от 02.03.2000 г. 4 с.

Программное средство для расчёта радиационной обстановка в мезо масштабе (за пределами промышленной площадки объекта

использования ядерной энергии). Учебная версия 1.0 РОМ/Е1.0: учебное пособие. М.: ИБРАЭ РАН, 2018. 132 с.

РБ-106-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчёта параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 ноября 2015 г. № 458). М., 2015. 75 с.

РД 52.18.717-2009. Методика расчёта рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах: руководящий документ. Обнинск: ООО «Принт-Сервис», 2009, 121 с.

Руководство по радиационной защите при авариях на ядерных реакторах. IAEA-TEC-DOC-955. Вена: МАГАТЭ, 1998.

Санжарова Н.И. и др. Концепция и программа радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (утв. и введ. в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 № 47): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 28.06.2010 г. № 71). М., 2010. 22 с.

Семёнов В.Н., Сороковникова О.С., Дзама Д.В. Программное средство для расчёта радиационной обстановки в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта использования ядерной энергии.) Учебная версия 1.0. РОМ/Е1.0. М.: ИБРАЭ РАН, 2018. 132 с.

Система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно опасных объектах RECASS NT. Инструкция по эксплуатации. Обнинск: ФГБНЦ «НПО «Тайфун», ФИАЦ Росгидромета, 2019. 13 с.

Титов И.Е. и др. Прикладные ГИС для поддержки радиационно-экологического мониторинга в регионах размещения ядерно- и радиационно опасных объектов // Геоинформатика. 2019. № 2. С. 12–16.

Фесенко С.В. Математические модели в радиоэкологии // Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.

Шарпан Л.А., Карпенко Е.И., Спиридонов С.И. Оценка дозы облучения населения в результате атмосферных выбросов Ростовской АЭС // Атомная энергия. 2013. Т. 115. Вып. 3. С. 163–166.

Шубина О.А., Титов И.Е., Нуштаев С.Н. База данных радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель в отдалённый период после аварии на ЧАЭС: свидетельство о регистрации базы данных RU 2015621260 от 14.08.2015.

Шубина О.А., Титов И.Е. Электронный реестр земель с высокими уровнями радиоактивного загрязнения (ЭЛРЕВУЗ): свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620529 от 24.06.2016.

Alexakhin R.M. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // Health Physics. 2007. Vol. 93(5) P. 418–426. ttps://doi.org/10.1097/01.HP.0000285093.63814.b7.

Balonov M. et al. Harmonization of standards for permissible radionuclide activity concentrations in foodstuffs in the long term after the Chernobyl accident // J. Radiol. Prot. 2018. Vol. 38. P. 854–867. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aabe34.

Fesenko S.V. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident and doses resulting from the consumption of milk and milk products // Rad. Protect. Dosim. 1997. Vol. 69(4). PP. 289–299. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031916.

Fesenko S. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 1. Gut absorption // J. Environ. Radioact. 2007a. Vol. 98. P. 85–103. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.02.011.

Fesenko S. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 2. Transfer to milk // J. Environ. Radioact. 2007b. Vol. 98. P. 104–136. https://doi.org/10.1016/

j.jenvrad.2015.01.015.

Fesenko S. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: 3. Transfer to muscle // J. Environ. Radioact. 2009a. Vol. 100. P. 215–231. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.12.003.

Fesenko S. et al. Review of Russian-language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: part 4. Transfer to poultry // J. Environ. Radioact. 2009b. Vol. 100. P. 815–822. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2009.06.009.

Fesenko S. et al. Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in agricultural animals: Transfer to animal tissues // J. Environ. Radioact. 2018. Vol. 192. P. 233–249. https://doi.org/10.1016 /j.jenvrad.2018.06.012.

IAEA (2001). Safety Reports Series No.19 «Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment». Vienna: IAEA, 2001. 229 p.

IAEA (2009). Quantification of Radionuclide Transfers in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments, IAEA-TECDOC-1616. Vienna: IAEA, 2009. 622 p.

IAEA (2014). IAEA Safety Standards. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014, № GSR. Part 3. P. 436.

ICRP (1994). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication Press. 1994.

Shershakov V.M., Trakhtengerts E.A. Development of RODOS/RECASS System as a Distributed Decision Making Support System in Emergency // Radiation Protection Dosimetry. 1996. Vol. 64(1). P. 143–147.

Smith J.G., Simmonds J.R. The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment. Luksemburg: European Commission, 2009.

Suáñez A., Robles B. Código CROM V. 1.0, Código de Criba para la Evaluación de Impacto. Guía del Usuario, CIEMAT/DIAE/PIRA/21/98 (1998) (Перевод с испанского языка с разрешением авторов. Международный курс МАГАТЭ, Октябрь 2011).

Thykier-Nielsen S., Deme S., Mikkelsen T. Description of the Atmospheric Dispersion Module RIMPUFF. RODOS(WG2)-TN(98)-02, 1998.

Yu C. et al. The RESRAD-BIOTA Code for Application in Biota Dose Evaluation: Providing Screening and Organism-Specific Assessment Capabilities for Use Within an Environmental Protection Framework // Protection of the Environment from Ionising Radiation. IAEA, 2003. P. 283–289.

Yu C. et al. User's Manual for RESRAD-OFFSITE Version 2, ANL/EVS/TM/07-1. Argonne: Argonne National Laboratory, 2007.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ БАЛТИЙСКОЙ АЭС

Карпенко Е.И.[1], Санжарова Н.И.[1], Нуштаева В.Э.[1], Душин В.Н.[2], Панов А.В.[1], Исамов Н.Н.[1], Кузнецов В.К.[1], Спиридонов С.И.[1], Микаилова Р.А.[1]

1 – ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии
2 – АО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

Представлены результаты радиоэкологического мониторинга наземных (природных, аграрных) и водных экосистем в районе размещения строящейся Балтийской АЭС. Содержание ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий и растительности 30-км зоны Балтийской АЭС достигало 10 Бк/кг и 370 Бк/кг (папоротник) соответственно. Содержание ^{14}C в лесной растительности находилось в диапазоне от 111 Бк/кг до 214 Бк/кг. В пробах грибов удельная активность ^{14}C составляла 7–16 Бк/кг. В чернике и грибах содержание ^{90}Sr достигало 0,48 Бк/кг и 0,10 Бк/кг соответственно. Показано, что дозы облучения взрослого населения в районе расположения Балтийской АЭС составляет 0,03 мЗв/год. Основным дозообразующим радионуклидом в условиях существующего облучения является ^{137}Cs, а основными путями облучения человека являются ингаляция и потребление продуктов питания. После ввода Балтийской АЭС в эксплуатацию годовая эффективная доза облучения населения от атмосферных выбросов Балтийской АЭС будет возрастать с 2,01 до 2,07 мкЗв/год за период с 1-го по 50-й годы работы станции, а основным дозообразующим радионуклидом будет ^{14}C. Суммарная годовая доза облучения населения от атмосферных выбросов Балтийской АЭС составит 20 % от значения квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов для строящихся или проектируемых АЭС, равной 10 мкЗв в год.

Балтийская АЭС, радиоэкологический мониторинг, проба, содержание радионуклидов, выбросы, доза облучения

Характеристики Балтийской АЭС как источника воздействия на окружающую среду

Мониторинг воздействия Балтийской АЭС на окружающую среду и человека представляет значительный интерес с точки зрения оценки воздействия на окружающую среду и человека нового водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-1200, модернизированного с учётом опыта эксплуатации серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, наработавших более 130 реакторо-лет. Мониторинг Балтийской АЭС является примером мониторинга, проводимого до начала функционирования АЭС с целью оценки базового, начального состояния и предварительного прогноза потенциального воздействия на окружающую среду и человека новых энергосистем.

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. Граничащие с районом расположения Балтийской АЭС южные, юго-западные и западные территории Литовской Республики были загрязнены радионуклидами в результате трансграничного переноса аварийного выброса Чернобыльской АЭС в 1986 г.

Планируется, что в состав Балтийской АЭС будут входить два энергоблока общей мощностью 2388 МВт. После постройки станции Калининградская область из энергодефицитного региона превратится в экспортёра электроэнергии. Стоимость строительства Балтийской АЭС оценивалась в 4,8 млрд евро, а вместе с инфраструктурой – 6,23 млрд евро.

25 февраля 2010 года состоялась церемония закладки первого камня на площадке Балтийской АЭС. Основной этап строительных работ начался в апреле 2011 г. Зона основного производства состоит из моноблоков, скомпонованных в единый строительный объём главных корпусов. На территории промышленной площадки будут размещены башенные испарительные градирни с

насосными станциями и брызгальные бассейны для охлаждения ответственных потребителей реакторного отделения. Будет рассмотрена оборотная система технического водоснабжения. В качестве источника подпитки для компенсации испарения предполагается использование пресной воды из реки Неман.

Системы безопасности Балтийской АЭС используют четырёхканальную структуру, применяющуюся в строящихся и уже действующих проектах в России и за рубежом. При этом конструкция систем безопасности предусматривает специальные технические средства, предназначенные для реагирования в случае запроектных аварий: пассивная система отвода тепла от защитной оболочки, система удаления водорода, ловушка расплава, система защиты первого контура от превышения давления. Системы автономного электроснабжения Балтийской АЭС позволяют более 72 часов поддерживать работу систем охлаждения реакторов при полном обесточивании внешнего электропитания. Расчётная интенсивность землетрясений на станции была определена равной 7 баллов, при сейсмическом микрорайонировании это значение было уменьшено до 6 баллов.

В качестве принципиальной основы проекта «АЭС-2006», разрабатываемого для площадки Балтийской АЭС, принята концепция с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1200, модернизированная с учётом опыта эксплуатации серийных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, наработавших более 130 реакторо-лет. В состав энергоблока входит реакторная установка ВВЭР-1200 (главный конструктор ФГУП ОКБ «Гидропресс»). Все радиоактивные отходы в твёрдом состоянии находятся на хранении на территории АЭС в специальном хранилище до вывоза их на переработку на спецкомбинате. Отработавшее ядерное топливо после выдержки вывозится спецтранспортом на завод по переработке ядерного топлива. Нерадиоактивные отходы поступают на соответствующий полигон промышленных отходов. Состав и количество планируемых выбросов радиоактивных газов и аэрозолей одного энергоблока Балтийской АЭС в условиях нормальной эксплуатации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Годовой выброс радиоактивных газов и аэрозолей одного энергоблока Балтийской АЭС в условиях нормальной эксплуатации, Бк/год (IAEA, 2017)

Радионуклид	Активность в выбросе, Бк/год	Радионуклид	Активность в выбросе, Бк/год
^{3}H	$3{,}9\times10^{12}$	^{131}I	$7{,}3\times10^{7}$
^{14}C	$3{,}0\times10^{11}$	^{132}I	$9{,}7\times10^{7}$
^{83m}Kr	$6{,}7\times10^{11}$	^{133}I	$1{,}4\times10^{8}$
^{85m}Kr	$2{,}3\times10^{12}$	^{134}I	$6{,}6\times10^{7}$
^{85}Kr	$3{,}6\times10^{11}$	^{135}I	$1{,}1\times10^{8}$
^{87}Kr	$1{,}4\times10^{12}$	^{51}Cr	$7{,}9\times10^{4}$
^{88}Kr	$5{,}0\times10^{12}$	^{54}Mn	$4{,}8\times10^{3}$
^{131m}Xe	$2{,}5\times10^{11}$	^{60}Co	$3{,}1\times10^{4}$
^{133}Xe	$2{,}8\times10^{13}$	^{89}Sr	$3{,}4\times10^{5}$
^{135}Xe	$7{,}6\times10^{12}$	^{90}Sr	$6{,}0\times10^{2}$
^{138}Xe	$2{,}9\times10^{11}$	^{134}Cs	$2{,}0\times10^{7}$
		^{137}Cs	$3{,}0\times10^{7}$
Сумма	$5{,}01\times10^{13}$		

Сравнивая атмосферные выбросы АЭС с реактором БН-800 и Балтийской АЭС с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1200, можно сделать вывод о том, что суммарный выброс радионуклидов этой установкой примерно в 3 раза больше чем у АЭС с реактором БН-800, что связано, в основном, с более низким выбросом трития на реакторах на быстрых нейтронах. Содержание ^{3}H в атмосферных выбросах при работе реактора БН-800 на два порядка превышает его содержание в выбросах при работе реактора ВВЭР-1200. По суммарной активности выброса радиоактивных газов и аэрозолей от атомных электростанций с разными видами реакторов можно сделать вывод о том, что новые реакторы являются более безопасными для окружающей среды и человека.

Карта-схема точек отбора проб в 30-км зоне строительства Балтийской АЭС приведена на рисунке 1.

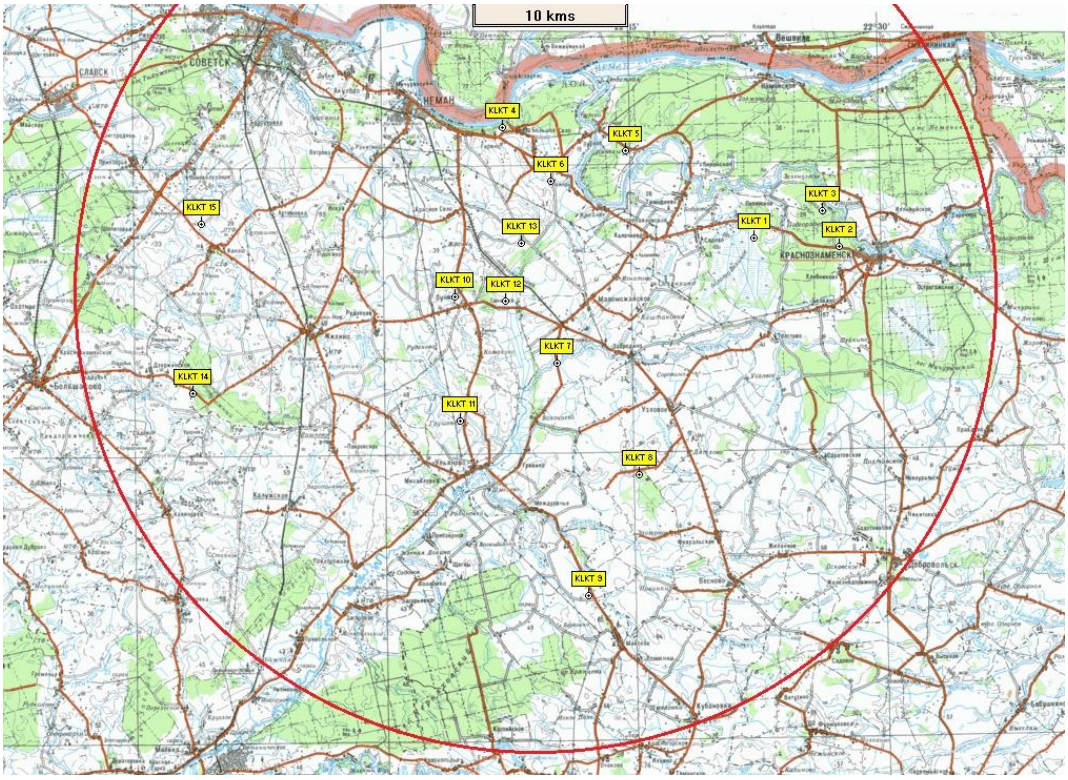


Рисунок 1. Карта-схема отбора проб в 30-км зоне Балтийской АЭС за 2016 год

Количество контрольных точек и число отбираемых проб являлось достаточным для пространственной характеристики уровней содержания радионуклидов в объектах контроля. Выбор точек контроля определялся конкретными условиями на территории размещения Балтийской АЭС с учётом характера и размещения объектов, которые являются или могут являться источниками повышенного облучения населения, природными факторами (характером почв, рельефом, растительностью и др.), плотностью населения и структурой рациона питания населения. На каждую пробу оформлялся акт отбора, содержащий информацию о виде пробы, дате и месте отбора проб, географических координатах и мощности дозы в месте отбора проб.

Радиационно-экологический мониторинг в районе размещения строящейся Балтийской АЭС проводился на основе общей программы, представленной в статье Санжаровой с соавторами (Санжарова и др., 2020), приведённой в настоящем сборнике, и включал: сбор данных и анализ характеристик природной среды, оценку потенциальных выбросов и сбросов, измерение и анализ существующих уровней содержания радионуклидов в окружающей среде и прогноз содержания радионуклидов и доз облучения населения в случае функционирования АЭС в течение 50 лет. Настоящая статья

подготовлена на основе мониторинга, проводимого в месте строительства Балтийской АЭС в период с 2014 по 2016 гг.

Природно-климатическая характеристика района расположения Балтийской АЭС

Почвенно-климатические характеристики территории

Калининградская область географически расположена в Центральной Европе, на западной окраине Восточно-Европейской равнины, на юго-восточном побережье Балтийского моря. Природный морфологический облик области сложился в результате деятельности Валдайского оледенения, выраженного в чередовании равнинных и низменных пространств с холмисто-грядовыми возвышенностями. На востоке области расположена Полесская озёрно-ледниковая низменность. Отдельные участки низменности находятся на 1–2 метра ниже уровня моря, что вызывает её заболачивание.

Избыточное увлажнение, низменный и равнинный рельеф, преобладание глинистых и суглинистых почв способствует образованию множества рек, озёр и болот. Реки области равнинного типа, входят в бассейн Балтики. Общее количество рек составляет 4610, но большинство относится к малым рекам, длиной не более 50 км. Неман относится к большим рекам, его протяжённость 937 км, по территории области – 115 км. Преголя с притоками относится к средним рекам.

Своеобразие ландшафтов Калининградской области обусловлено географическим положением, историей формирования и влиянием антропогенного фактора. Все ландшафты Калининградской области относятся к бореальному подтаёжному (смешанно-лесному) типу равнинного класса.

Растительный и животный мир

Многообразие ландшафтов, природные особенности региона обусловили возможности для существования богатого видового разнообразия живых организмов на территории области. На сравнительно небольшой по площади территории области произрастает более 1400 видов высших растений. В их число входит 25 видов, внесённых в Красную книгу России, причём некоторые из них (*Sphagnum molle, Odontoschisma sphagni, Erica tetralix, Taxus baccata*) являются уникальными для произрастания в России. Благодаря мягкому климату в области произрастают: тополь канадский, бархат амурский, магнолия, буки европейский и восточный, можжевельник крымский, сосна крымская, горная, туя гигантская, лиственница японская и др. (Санжарова и др., 2016).

Лесной фонд Калининградской области относится к зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов. Лесистость области составляет 18 %. Общая площадь лесного фонда области составляет 272,9 тыс. га. Все леса области относятся к защитным, из них леса, выполняющие функции защиты природных и иных объектов составляют 26,6 %, ценные – 73,4 %. Основными лесообразующими породами области являются: ель, сосна, дуб, берёза. Хвойные насаждения составляют 31 % лесопокрытой площади, из них: ель – 15 %, которая широко распространена в лесных массивах восточных районов. Сосновые леса занимают 16 % лесопокрытой площади, наиболее значительны они в Краснознаменском, Нестеровском, Зеленоградском районах. Твердолиственные породы составляют 19 %, из них: дуб – 13 %, ясень – 5 %. В основном дубравы встречаются в Правдинском, Полесском, Черняховском районах. Мягколиственные составляют 50 %, береза – 27 %, ольха чёрная – 17 %. Пониженные участки почвы с избыточным увлажнением заняты ольховниками, которые широко представлены в Славском, Полесском и Гвардейском районах.

Фауна наземных позвоночных животных области включает 338 видов, имеющих с территорией закономерные биотопические связи, из них в Красную книгу Российской Федерации включены 3 вида млекопитающих, 24 вида птиц, 1 вид земноводных. В Красной книге Балтийского региона как редкие, исчезающие и находящиеся под угрозой исчезновения числятся 22 вида млекопитающих, 79 видов птиц, 1 вид пресмыкающихся и 5 видов земноводных. В водоёмах области, как пресных, так и морских обитает 97 видов

рыб и круглоротых. Из них 1 вид круглоротых и 6 видов рыб внесены в Красную книгу Российской Федерации.

Особенности ведения сельского хозяйства

Агроландшафты Калининградской области – природно-хозяйственные геосистемы с относительно низким порогом экологической надёжности и нарушенными механизмами саморегуляции. Главными причинами тому служат: целенаправленная замена достаточно устойчивых, как правило, естественных фитоценозов агроценозами, представляющими собой чаще всего монокультуру однолетних растений; возникновение в агроценозах множества свободных экологических ниш, доступных для сорной растительности и сельскохозяйственных вредителей; упрощение территориального разнообразия исходного ландшафта, аграрная нивелировка его плановой структуры. В силу особенностей природно-климатических условий почвы области обладают низким запасом элементов питания.

В регионе расположения Балтийской АЭС основные площади сельскохозяйственных культур заняты зерновыми и кормовыми культурами. Некоторые фермерские хозяйства специализируются на производстве картофеля и овощных культур, однако, доля их незначительная. Посевные площади зоны наблюдения Балтийской АЭС, занятые сельскохозяйственными культурами, составляют от 100 % (Неманский и Краснознаменский районы) до 1 % всей посевной площади района. Наибольший удельный вес относительно районных показателей занимают зерновые и многолетние травы.

Основные виды производств продукции животноводства: молочное животноводство, производство мяса говядины, свинины, птицы, коневодство, звероводство, пчеловодство, овцеводство. Приоритетным направлением развития животноводства является молочное скотоводство.

Радиационно-экологические исследования в районе строительства Балтийской АЭС

Основной целью исследований, проведённых в районе планируемого размещения Балтийской АЭС, была оценка существующей радиоэкологической ситуации в зоне наблюдения и оценка потенциального воздействия ядерного предприятия на окружающую среду и человека. Исследования проводились в период с 2014 по 2016 гг. на территории Калининградской области в пределах 30-км зоны площадки Балтийской АЭС.

В результате полевых радиоэкологических исследований одновременно с отбором проб почвы измерялась мощность экспозиционной дозы гамма-излучения дозиметрами-радиометрами ДКС-АТ1121 и «Сталкер» (рис. 2).

Контроль мощности дозы гамма-излучения проводился с целью выявления и локализации возможных радиационных аномалий и определения объёма дозиметрического контроля при измерениях мощности дозы гамма-излучения. В результате проведённых исследований показано, что значения мощности амбиентного эквивалента дозы соответствует фоновым показателям (до 0,2 мкЗв/час). По результатам проведённых измерений на исследуемой территории не выявлено зон, в которых показания радиометра в 2 раза или более превышают среднее значение. Мощность амбиентного эквивалента дозы также не превышает 0,3 мкЗв/ч, что свидетельствует об отсутствии локальных радиационных аномалий на обследованной территории.

При проведении исследований отбирались пробы компонентов водных экосистем (поверхностные и питьевые воды, донные отложения), компоненты наземных природных экосистем (почвы, луговая и лесная растительность), компоненты рациона сельскохозяйственных животных, а также продукции, производимой в регионе.

Средства измерений и методическое обеспечение, применяемые в работе, обеспечивали достоверное определение содержания радионуклидов в объектах окружающей среды на уровне их фоновых значений. Отбор, подготовка, обработка и измерение отобранных образцов проводилось в соответствии с действующими нормативными документами.

Рисунок 2. На полевых работах в 30-км зоне Балтийской АЭС

Пробы питьевой воды отбирались из централизованных и локальных (колонки) водопроводов, а также колодцев. На определение объёмной активности радиоизотопов цезия и стронция было отобрано пять проб поверхностных вод и пять проб питьевых вод объёмом 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 16 проб донных отложений из рек и водоёмов 30-км зоны Балтийской АЭС. В трёх точках (на озере Маломожайском, в реке Шешупе, около пос. Заречный и в маленьком водоёме южнее пос. Искра) свойства донных отложений позволили отобрать их в 2 слоя. Глубина отбора проб составляла от 3 см до 25 см и зависела от физической возможности отбора, ограниченного механическими свойствами грунта и наличием инородных препятствий (Санжарова и др., 2016) (рис. 3).

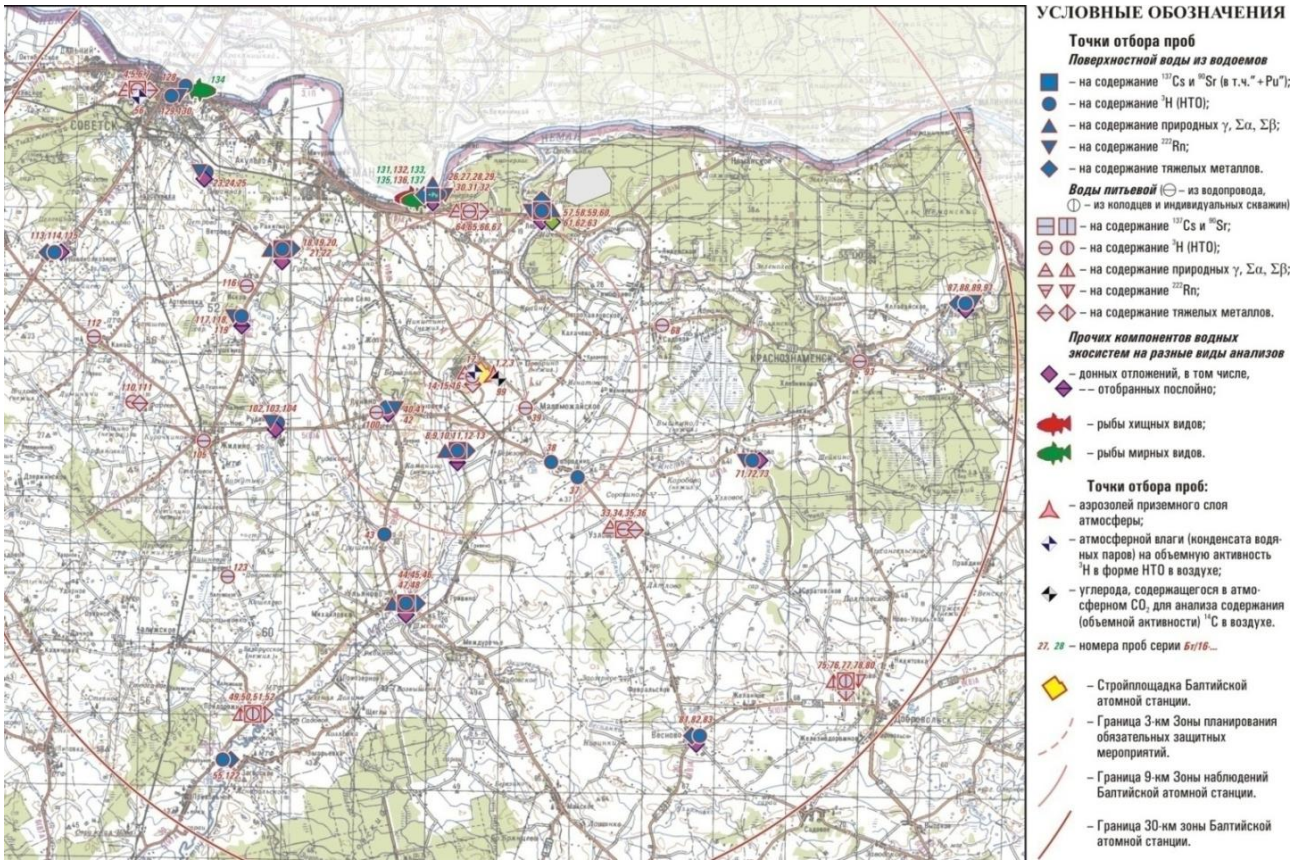


Рисунок 3. Схема отбора проб компонентов водных экосистем и приземного слоя атмосферы

При обследовании земель учитывались: вид угодий (пашня, пастбище, луг, залежь и др.), тип почвы, вид растений. Сельскохозяйственную продукцию (мясо, молочную продукцию, овощи и ягоды), составляющую, как типичный пищевой рацион населения Калининградской области, отбирали в пределах 30-км зоны Балтийской АЭС путём приобретения в населённых пунктах на рынке и у частных лиц. Ранний (конец мая – начало июня) выезд позволил отобрать из овощей нового урожая только редис и огурцы, выращенные в теплицах.

При закупках сельскохозяйственной продукции на рынках путём опроса продавца устанавливался адрес места произрастания овощей или кормления сельскохозяйственного животного и с помощью карты/космического снимка определялись ориентировочные координаты такого места.

Отбор проб компонентов рациона кормления сельскохозяйственных животных осуществлялся на территориях агропредприятия (ООО «Янтарь» в пос. Жилино) и у частных лиц. Предприятие специализируется на выращивании крупного рогатого скота.

Мониторинг содержания радионуклидов в природных объектах

Содержание радионуклидов в почве и растительности

Для анализа на содержание природных и техногенных радионуклидов были отобраны пробы наземных экосистем: луговой, лесной растительности, сельскохозяйственных растений и почвы в районе 30-км зоны Балтийской АЭС.

При определении содержания радионуклидов в различных видах растений и сельскохозяйственных культурах принимались во внимание тип травостоя и вид сельскохозяйственных культур, тип и механический состав почвы, а также гидрологический режим.

Содержание ^{137}Cs в пробах находилось в диапазоне от <0,1 Бк/кг (грибы) до 370 Бк/кг в растительной пробе папоротника, отобранной в Пригородном лесу г. Краснознаменска. Другие природные гамма-излучающие радионуклиды в большинстве проб растительности находились ниже предела обнаружения. Наличие значимых значений ^{137}Cs в пробе папоротника орляка, который является многолетним растением, предположительно, объясняются наличием в районе выпадений после аварии на ЧАЭС.

^{90}Sr достаточно активно участвует в обмене веществ у растений. В растения он попадает при загрязнении листьев, а также из почвы через корни и накапливается в надземных частях растений. Содержание ^{90}Sr в съедобных грибах (сыроежки, подосиновики) и лесных ягодах (брусника) было довольно низким. В чернике содержание ^{90}Sr варьировало от ≤0,05 до 0,48 Бк/кг, а в грибах – от <0,05 до 0,10 Бк/кг.

Радиоизотопы плутония в пробах определяли методом изотопного разбавления с масс-спектрометрическим окончанием. Удельная активность радиоизотопов плутония в компонентах лесной экосистемы в 2016 г. находилась на фоновом уровне, характерном для данного региона.

Содержание ^{14}C в лесной растительности находилось в диапазоне от 111 Бк/кг до 214 Бк/кг. В пробах грибов удельная активность ^{14}C составляла 7-16 Бк/кг (Санжарова и др., 2016).

Так как ^{14}C является одним из основных дозообразующих радионуклидов, образующихся в результате работы современных АЭС, важно, кроме расчётных исследований влияния выбросов ^{14}C изучить фоновое содержание ^{14}C в объектах природной среды. Поэтому для определения реальных масштабов фонового содержания радиоуглерода в наземных экосистемах необходимо проводить и в дальнейшем регулярные, систематические измерения ^{14}C в регионе размещения Балтийской АЭС.

Содержание трития в пробах флоры (в форме связанной воды и органической форме) превышало содержание данного радионуклида в воде поверхностных водоёмов, подземных источников и в воздухе исследуемого региона. Накопление трития растительностью происходит за счёт его усвоения из атмосферы (водная и газовая фазы) и воды. Одной из возможных причин проявления более высоких значений удельной активности трития в форме ОВТ является то, что атмосферный газовый тритий окисляется или встраивается в состав органической молекулы только в результате биохимических реакций в живом организме. Эффект биоаккумуляции также объясняется тем, что в биологических соединениях тритий имеет более сильную ковалентную связь с углеродом и кислородом, чем с кислородом в молекуле воды (Boyer et al., 2014; Jaeschke et al., 2011; Kim et al., 2013).

Почва является главным резервуаром радионуклидов (естественные радионуклиды – литосфера, искусственные радионуклиды – атмосфера) в окружающей среде. Содержание ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий 30-км зоны Балтийской АЭС в основном находилось в диапазоне от 5 до 10 Бк/кг (рис. 4).

Установлено, что содержание ^{90}Sr в почвах варьировало от 0,2 до 3,9 Бк/кг, что в целом укладывается в диапазон значений, определяемых преимущественно глобальными выпадениями (рис. 5) (Андреева и др., 2019, Кузнецов и др., 2018).

Целинные природные участки, в почве

которых основное содержание ^{137}Cs наблюдалось в верхнем 0–10 см слое, вносили основной вклад в выборку значений с максимальным уровнем содержания ^{137}Cs. Пахотные угодья, на которых ^{137}Cs равномерно распределён в пахотном 0–20 см слое, являются источниками минимальных и средних значений уровней содержания ^{137}Cs в почвах.

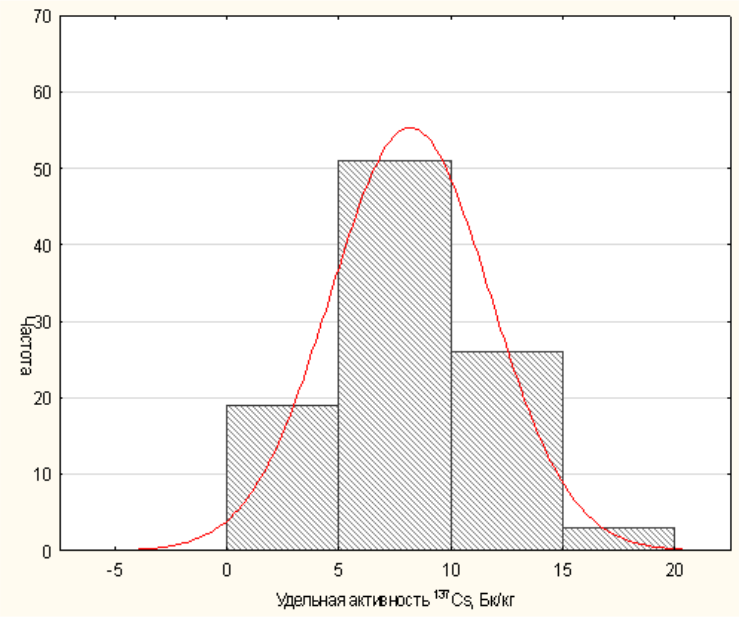


Рисунок 4. Статистическое распределение ^{137}Cs в почвах сельскохозяйственных угодий 30-км зоны Балтийской АЭС

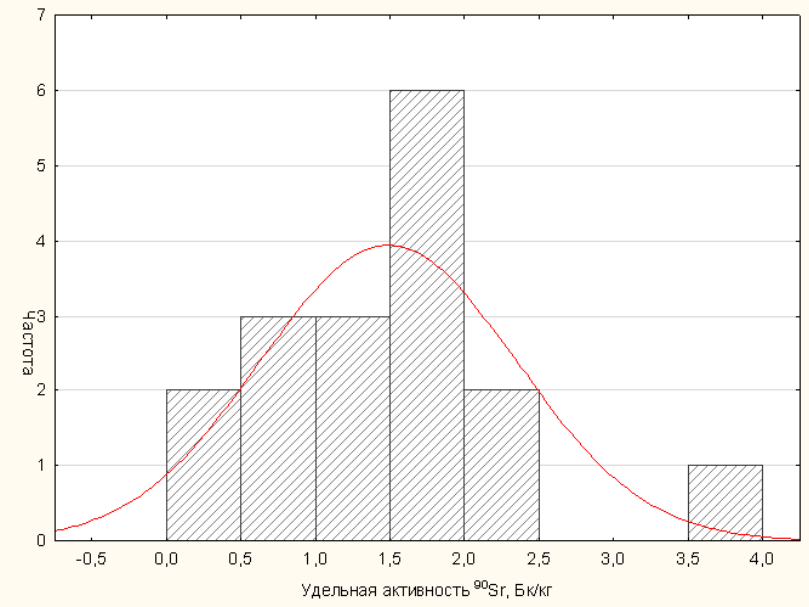


Рисунок 5. Статистическое распределение ^{90}Sr в почвах сельскохозяйственных угодий 30-км зоны Балтийской АЭС

На пахотных угодьях за счёт многократно проводимых механических обработок ^{137}Cs достаточно равномерно распределен в слое почвы 0–20 см.

На целинных участках основное количество радионуклидов находится в верхнем 0–10 см слое почвы, что оказывает влияние как на размеры накопления ^{137}Cs в растениях, так

и на характер определяемой в момент отбора проб экспозиционной дозы (Санжарова и др., 2016).

Увеличение среднего содержания ^{137}Cs в почвах 30-км зоны Балтийской АЭС обуславливается влиянием выпадений в результате аварии на Чернобыльской АЭС, и в большей степени характерно для естественных целинных участков, на которых основное количество ^{137}Cs содержится в верхних слоях, что определяет повышенное содержание радионуклидов в слое 0–10 см.

Важным источником облучения природных объектов являются радиоактивные элементы рядов ^{238}U и ^{232}Th, а также ^{40}K, содержащиеся в земной коре. Среднее содержание естественного калия на сырую массу растений составляет ~ 0,05 %. Больше всего он содержится в бобовых кормовых травах – 0,35 % на сырую массу. Содержание урана, тория и радия в растениях сильно зависит от радиоактивности почвы, воды и может изменяться в сотни и тысячу раз.

В результате исследований установлено, что содержание естественных радионуклидов в районе исследований соответствует обычному радионуклидному составу поверхностных слоёв почв. Среднее содержание ^{40}K в почве составляло 630 Бк/кг, ^{226}Ra и ^{232}Th – 24 Бк/кг и 28 Бк/кг соответственно, что соответствует среднемировому уровню (рис. 6). Варьирование средних значений по выделенным зонам определяется неоднородностью свойств почв и, в частности, механическим составом и органическим веществом почв. При этом минимальное содержание естественных радионуклидов наблюдается на почвах лёгкого механического состава, максимальное – на глинистых почвах.

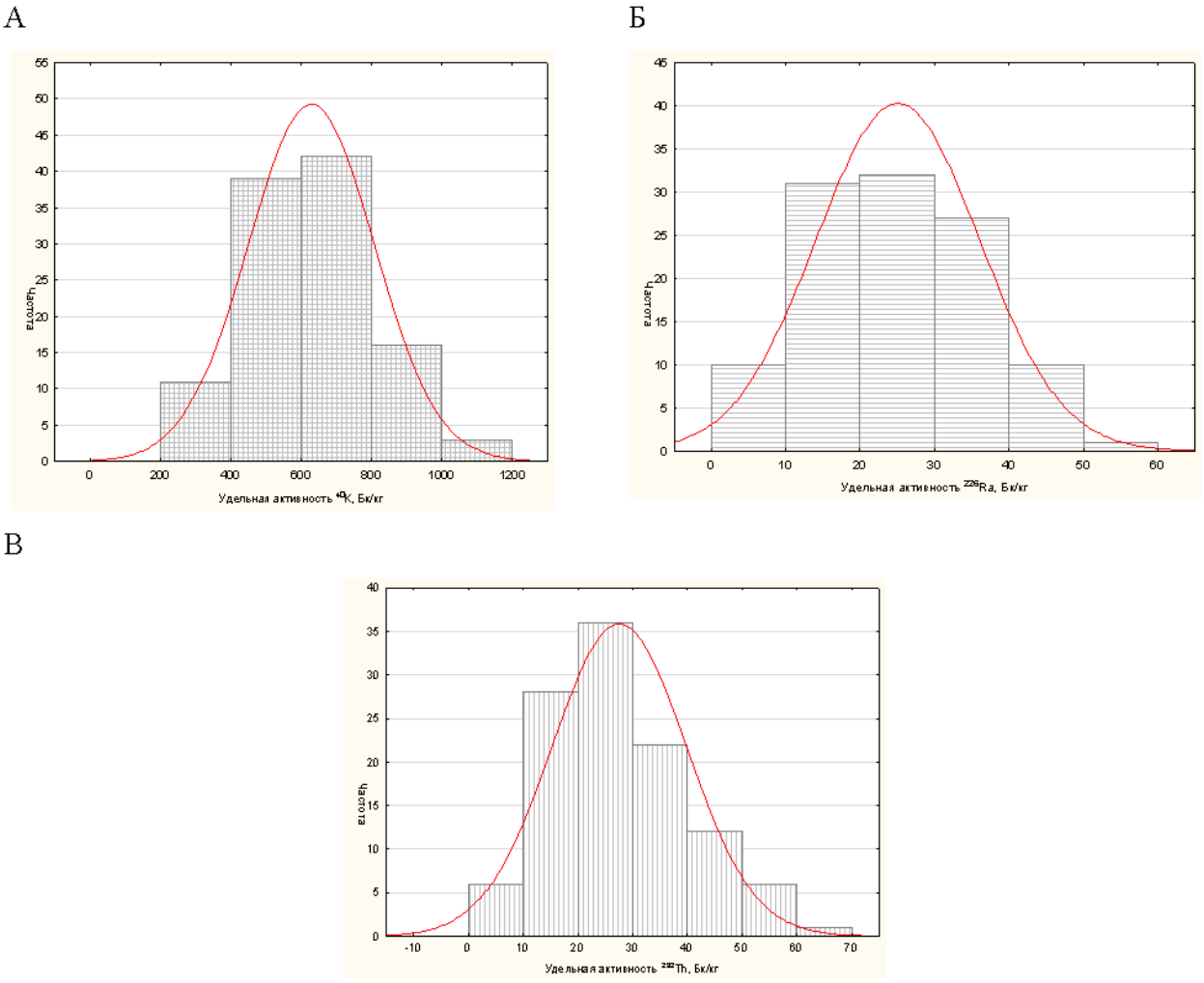


Рисунок 6. Статистическое распределение ^{40}K (А), ^{226}Ra (Б) и ^{232}Th (В) в почвах сельскохозяйственных угодий 30-км зоны Балтийской АЭС

Частота распределения значений удельной активности ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{40}K, ^{226}Ra и ^{232}Th, представленная на рисунках 4–6 в почвах 30-км зоны Балтийской АЭС, соответствует нормальному распределению, что говорит о том, что 68 % всех значений находиться в диапазоне ±1σ стандартного отклонения от среднего, а диапазон ±2σ стандартного отклонения содержит 95 % всех значений. Другими словами, частота значений меньше ±2σ от среднего значения составляет не более 5 % (Андреева и др., 2019).

Концентрация ^{239,240}Pu вполне соответствует величинам (0,5–5,8 Бк/кг), характерным для верхнего слоя почвы северо-запада Европы (Salminen et al., 2004). Изотопные отношения ^{238}Pu/$^{239,\ 240}$Pu также соответствуют значениям (2,1–8,9 %) по исследованию содержания плутония в верхнем слое почв северо-запада Европы. Приведённые на момент измерения изотопные отношения соответствуют фоновым (глобальным выпадениям) уровням, не превышающим 10 %.

Содержание радионуклидов в продукции сельского хозяйства

Сельскохозяйственная продукция, являющаяся основой рационов городского и сельского населения, во многом отражает уровни содержания радионуклидов в природных средах. Это позволяет прогнозировать уровни радиоактивного загрязнения сельскохозяйственной продукции по результатам измерения содержания радионуклидов в районах её производства.

Для определения удельной активности природных и техногенных радионуклидов в сельскохозяйственной продукции были отобраны пробы молочной продукции, овощей, мяса, а также пробы компонентов рациона сельскохозяйственных животных (Карпенко и др. 2016; Карпенко, Санжарова, 2015).

Определение содержания радионуклидов в пробах овощных культур на частных подворьях показало, что уровни загрязнения соответствуют фоновым значениям. Ни в одной из проб сельскохозяйственной продукции растительного и животного происхождения не отмечено превышения нормативов, регламентируемых СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002; СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010). Уровень содержания $^{239,\ 240}$Pu в пробах сельскохозяйственной продукции региона Балтийской АЭС позволяет сделать вывод о том, что, вклад $^{239,\ 240}$Pu соответствует фоновым уровням (от 0,8 мБк/кг до 6,3 мБк/кг) (Санжарова и др., 2016). Уровень удельной активности изотопов плутония весьма низок, что обусловило значительный уровень неопределённости результатов, в связи с чем трудно однозначно оценить источник происхождения плутония: испытания ядерного оружия или выбросы Чернобыльской АЭС.

Содержание трития (в форме тритиевой воды – НТО) в продуктах местного питания находилось в диапазоне от 1,1 Бк/кг до 19 Бк/кг (максимальное значение наблюдалось в пробе молока); значение трития (в органической форме) варьировало от 3,5 Бк/кг до 52 Бк/кг (максимальные значения в пробе картофеля).

Удельная активность ^{14}C в пищевой продукции региона соответствует типичному содержанию природного ^{14}C в продуктах питания (в пробах картофеля содержание ^{14}C варьировало от 14 Бк/кг до 21 Бк/кг, в других овощных корнеплодах – от 6,7 Бк/кг до 14 Бк/кг) (Санжарова и др., 2016).

В продуктах питания в форме НТО и органической форме (для оценок дозовых нагрузок эти величины необходимо суммировать) заметно превышали результаты измерения концентрации трития в воде и в воздухе, что не согласуется с общепризнанной концепцией о весьма быстром установлении равновесия во всех водородосодержащих объектах окружающей среды. Наблюдается явное концентрирование трития в форме НТО в продуктах питания и с ещё большим коэффициентом концентрирования в виде органической формы. Эти результаты подтверждаются многочисленными измерениями и должны учитываться при расчёте дозовых нагрузок.

Содержание радиоуглерода в пробах компонентов сельскохозяйственных животных (зерновые культуры, сено, сенаж) находилось примерно на одном уровне (95–135 Бк/кг), что соответствует природному содержанию данного радионуклида в компонентах природной среды региона.

Содержание радионуклидов в воде

В гидрологическом отношении площадка Балтийской АЭС находится на территории бассейна Балтийского моря на водоразделе стволовых рек Неман и Преголя. Основными водными объектами пункта являются реки Неман, Шешупе (левобережный приток Немана) и Инструч (образующий при слиянии с р. Анграппой реку Преголя). В соответствии с программой полевых радиоэкологических исследований на первом этапе работ был проведён отбор проб и начаты работы по анализу содержания радионуклидов (гамма-излучающих, стронция, плутония, трития (водная и органически связанная формы) и органически связанного углерода-14) в компонентах основных водных экосистем региона (поверхностные и питьевые воды, рыба, высшая водная растительность, донные отложения) и определению ∑α-, ∑β-активности и радона-222 в воде.

По результатам работ 2009–2014 гг. и архивных данных (результатов ранее проведённых исследований изыскательскими организациями) известно, что концентрации радионуклидов в объектах окружающей среды в целом не превышают регламентированных НРБ-99/2009 значений, за исключением проб питьевых вод из подземных источников населённых пунктов Неманского района, в части которых в 2012–2013 гг. обнаружено превышение уровня Σα-активности радионуклидов, установленного НРБ-99/2009 (0,2 Бк/л).

Согласно требованиям СанПиН (СанПиН 2.1.4. 559-96, 1996, СанПиН 2.6.1.2523-09, 2009), для предварительной оценки соответствия питьевой воды критериям радиационной безопасности требуется измерение удельной суммарной альфа- и бета-активности. При превышении контрольных уровней удельной суммарной α- и β-активности выполнение радионуклидного анализа воды является обязательным, причём желательно с привлечением радиохимических методов, позволяющих дать более точную количественную характеристику того или иного радионуклида в исследуемой пробе. Приоритетный перечень определяемых при этом радионуклидов в воде устанавливается в соответствии с санитарным законодательством.

При оценке радиационной безопасности питьевого водоснабжения населения радиохимический анализ питьевой воды должен обеспечивать определение основных дозообразующих радионуклидов. Радиохимический анализ позволяет с высокой степенью надёжности выделять радиохимически чистые изотопы, избегать косвенных оценок содержания радионуклидов, обладает высокой чувствительностью, точностью и информативностью. Радиохимическая подготовка, как правило, включает стадию концентрирования (при определении содержания природных радионуклидов – выпаривание), затем следует селективное выделение группы изотопов одного или нескольких элементов, отделение их от макрокомпонентов, радиохимическая очистка каждого радионуклида, приготовление счётного образца для измерения активности.

Для контроля неизбежных в процессе анализа потерь радионуклидов в исследуемую пробу на первом этапе её обработки для каждого из определяемых изотопов добавляли известное количество носителя, в качестве которого используют солянокислые или азотнокислые соли соответствующих элементов.

Определение содержания в природных водах техногенных радионуклидов имеет некоторые особенности по сравнению с аналогичными определениями в других объектах внешней среды. Эти особенности обусловлены, во-первых, малыми значениями объёмных активностей в природных водах, во-вторых, относительно высоким фоном естественной радиоактивности и в отдельных случаях, сложностью и разнообразием солевого состава исследуемых вод.

При предварительной оценке качества по удельной суммарной альфа- и бета-активности нормативные уровни СанПиН 2.6.1.2523-09 (Σα 0,2 Бк/кг и Σβ 1,0 Бк/кг) в объектах водной среды не превышены.

Для определения объёмной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr были отобраны пробы поверхностных вод в р. Неман, р. Шешупе, р. Тыльжа, р. Инструч, оз. Маломожайское, а также пробы водопроводной воды и воды из колодцев в населённых пунктах 30-км зоны Балтийской АЭС (пос. Большое Село, г. Советск,

пос. Узловое, пос. Болотниково, пос. Придорожное) (Санжарова и др., 2016).

Содержание ^{137}Cs в поверхностных водах исследуемых водоёмов находилось в пределах колебаний, характерных для водоёмов этой зоны. Максимальное значение было зарегистрировано в оз. Маломожайское, что составляло 4,5 Бк/м^3. Результаты исследований содержания ^{90}Sr в поверхностных водах за 2011, 2014–2016 гг. представлены на рисунке 7 (Душин и др., 2015).

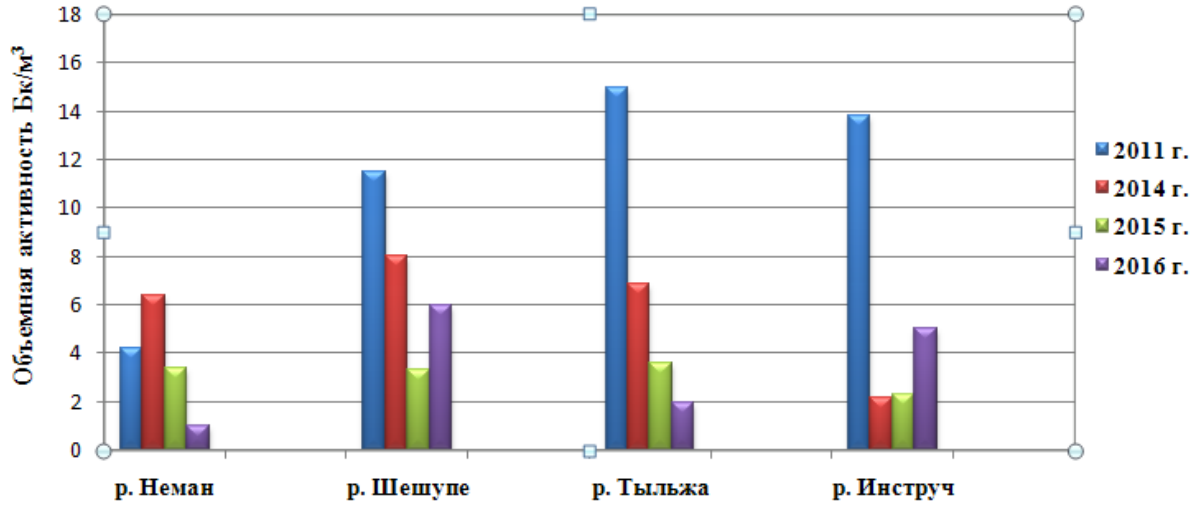


Рисунок 7. Динамика концентрации ^{90}Sr в поверхностных водах рек в 2011, 2014–2016 гг.

Объёмная активность ^{90}Sr в исследуемых водоёмах (5,2 Бк/м^3) также соответствует уровню среднегодовой объёмной активности Северо-Западного Федерального округа России 2015 г. (Радиационная обстановка ..., 2016).

Объёмная активность ^{137}Cs в поверхностной воде максимально достигала 0,04 % от $УВ_{вода}$ (НРБ-99/2009); объёмная активность ^{90}Sr – 0,12 % от $УВ_{вода}$ (НРБ-99/2009) соответственно. Колебания значений объёмной активности обусловлены естественными вариациями гидрологического режима и глобального фона.

Наблюдаемые величины содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде водоёмов 30-км зоны Балтийской АЭС в 2016 г. на несколько порядков ниже нормативного уровня вмешательства для населения и находились на уровне регионального фона. Для не питьевых вод в соответствии с ОСПОРБ-99/2010 (с изменениями на 16.09.2013 г.) (СП 2.6.2612-10, 2010), сумма отношений удельных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr к их предельным значениям для жидких отходов[1] менее 0,1, следовательно, ограничения на использование в хозяйственной деятельности рассматриваемых вод не предусматривается.

Проба поверхностной воды для определения содержания $^{239,\,240}$Pu отбиралась в мониторинговой точке р. Неман. Исходный объём пробы составлял 400 л. Измерения выполняли на полупроводниковом альфа-спектрометре после предварительной радиохимической подготовки проб воды с нормированным значением химического выхода $^{239,\,240}$Pu. Объёмная активность $^{239,\,240}$Pu в поверхностной воде р. Неман в 2016 г. на 5 порядков ниже нормативного уровня вмешательства для питьевой воды (НРБ-99/2009) и находится на уровне 2015 г. $(3{,}2\pm0{,}9)\times10^{-3}$ Бк/м^3.

Объёмная активность ^{137}Cs в питьевой воде находилась на уровне нижнего предела обнаружения прибора. Уровень содержания ^{90}Sr в питьевой воде за летний период составлял от ⩽1,0 Бк/м^3 (вода из колодца в пос. Болотниково и вода из централизованного водопровода пос. Большое Село) до 7,5 Бк/м^3 (водопроводная вода г. Советск). Среднее значение объёмной активности ^{90}Sr в питьевой воде 30-км зоны Балтийской АЭС составило 2,9 Бк/м^3, что на 3 порядка ниже уровня

[1] Приведённым в ОСПОРБ-99/2010

вмешательства для населения (4900 Бк/м^3) (Душин и др., 2015).

Тритий является одним из наиболее подвижных радионуклидов, обладает высокой миграционной способностью в природных средах. В отличие от других радионуклидов не удерживается никакими очистными барьерами, плохо сорбируется растениями, грунтами и находится преимущественно в воде, поэтому в природных условиях этот радионуклид может переноситься водным потоком на большие расстояния. В связи с этим в 30-км зоне Балтийской АЭС были отобраны пробы поверхностных и питьевых вод из водопроводов, колодцев и скважин с целью определения содержания трития в водной экосистеме региона (рис. 8).

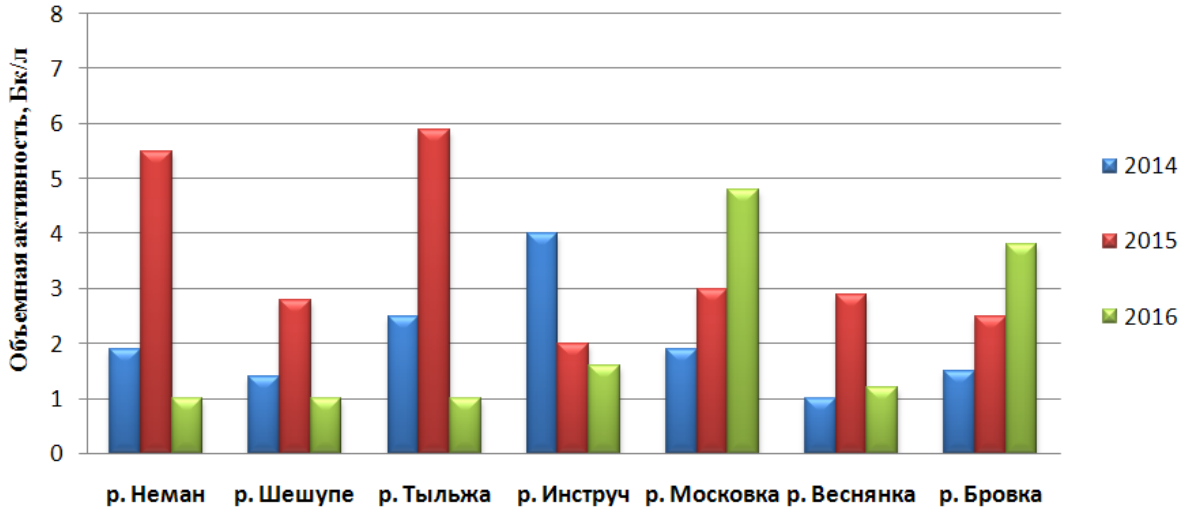


Рисунок 8. Средняя объёмная активность трития в поверхностных водах в 2014–2016 гг.

Значения объёмной активности трития в поверхностных водах 30-км зоны Балтийской АЭС по данным исследований 2016 года находились в диапазоне от <1 Бк/л до 4,8 Бк/л, максимальное значение наблюдалось в р. Московка. В среднем объёмная активность ^{3}H в 2016 г. в водоёмах региона составляла 1,8 Бк/л, что соответствует уровню среднегодовой активности ^{3}H в речной воде на территории России (1,9 Бк/л) (IAEA, 2017).

Уровень объёмной активности трития в питьевой воде 30-км зоны Балтийской АЭС по данным исследований 2016 года находился в диапазоне от <1 Бк/л до 5,0 Бк/л, максимальное значение наблюдалось в питьевой воде из колодца пос. Придорожное (рис. 9).

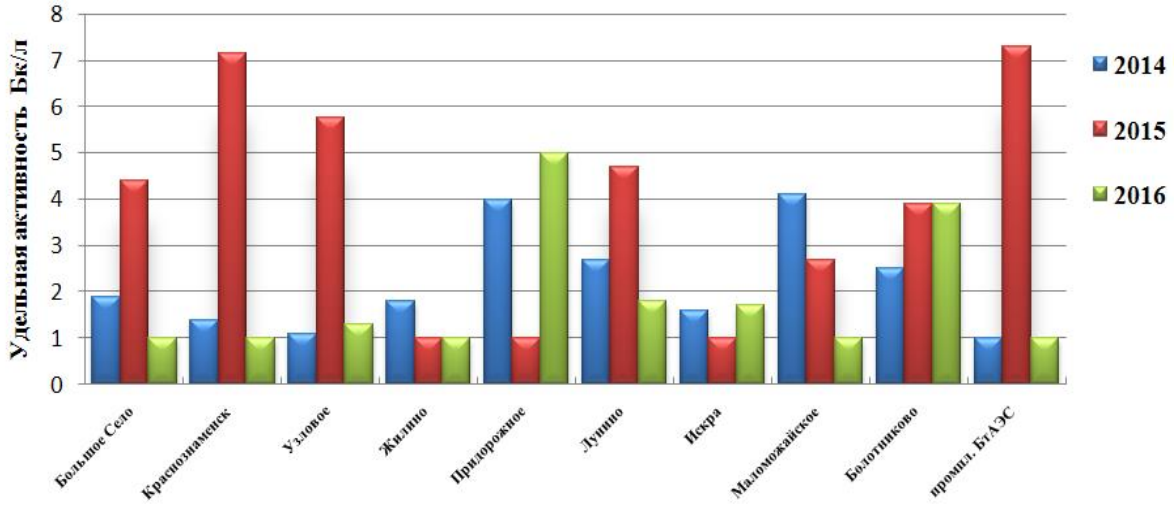


Рисунок 9. Средняя объёмная активность трития в поверхностных водах в районе размещения Балтийской АЭС

В среднем объёмная активность ^{3}H в 2016 г. в питьевой воде региона составляла 1,6 Бк/л, что соответствует уровню среднегодовой активности ^{3}H в реках и озёрах СЗФО в 2015 г. (1,4 Бк/л) и на 3 порядка ниже установленных нормативных уровней (Радиационная обстановка …, 2016).

Содержание радионуклидов в природных водах варьирует в очень широком диапазоне и зависит от состава подстилающих пород, локальных и региональных особенностей их геологического строения, типа вод, климатических условий и др.

Вклад питьевой воды в суммарную дозу облучения населения не является преобладающим (за исключением отдельных регионов) и обусловлен, в основном, присутствующими в воде радионуклидами рядов урана и тория. При этом значимый вклад в формирование дозы облучения за счёт потребления питьевой воды вносит ^{222}Rn.

Таким образом, установлено, что во всех пробах воды, значения ^{222}Rn не превышают допустимых нормативных уровней (СанПин 2.1.4.2580-10, 2010; СанПин 2.6.1.2523-09, 2009).

Содержание радионуклидов в донных отложениях

Известно, что донные отложения водоёмов и водотоков являются природным депо радионуклидов. Удельная активность гамма-излучающих радионуклидов в донных отложениях водоёмов 30-км Балтийской АЭС в 2016 г. в среднем составляла: ^{137}Cs – 2 Бк/кг; ^{226}Ra – 14 Бк/кг; ^{228}Ra – 20 Бк/кг; ^{40}K – 454 Бк/кг. Полученные результаты не имеют статистически значимых отличий от данных, полученных в 2009–2015 гг.

В 2014 г. удельная активность ^{137}Cs не превышала 8,5 Бк/кг; удельная активность природных радионуклидов в среднем составляла: ^{226}Ra – 12 Бк/кг; ^{228}Ra – 17 Бк/кг; ^{40}K – 430 Бк/кг.

В 2015 г. удельная активность ^{137}Cs <1 Бк/кг (за исключением значения в пробе донных отложений из пруда южнее пос. Искра – 4,2 Бк/кг), удельная активность природных радионуклидов в среднем составляла: ^{226}Ra – 17 Бк/кг; ^{228}Ra – 24 Бк/кг; ^{40}K – 557 Бк/кг. Полученные результаты не имеют статистически значимых отличий от аналогичных значений, полученных в других исследованиях. Уровень активности ^{90}Sr в донных отложениях варьировал в диапазоне от ⩽ 0,3 Бк/кг (р. Инструч) до 1,5 Бк/кг (р. Шешупе), что также находится в пределах колебания этих величин типичных для этого региона.

В целом, полученные результаты в 2016 г. по содержанию природных и техногенных радионуклидов, а также максимальные из зарегистрированных удельных активностей радионуклидов в компонентах природной среды в районе расположения Балтийской АЭС значительно ниже допустимых величин по НРБ-99/2009 и находятся на уровне прошлых лет. Таким образом в настоящее время радиационная обстановка в районе размещения Балтийской АЭС стабильна, допустимые нормы содержания техногенных радионуклидов не превышены и соответствуют требованиям действующего законодательства.

В результате выполненных работ были также собраны материалы по видовому составу, численности и плотности населения земноводных, пресмыкающихся, птиц и млекопитающих, по состоянию редких особо охраняемых видов, внесённых в российскую и региональную Красные книги. Представлены актуальные данные, характеризующие в целом видовой состав и численность наземных позвоночных в границах 30-км зоны, а также состояние видов, включённых в Красные книги Российской Федерации и Калининградской области. Представлены детальные учётные данные по материалам работ на комплексных и специализированных маршрутах.

Дозы облучения населения в районе размещения Балтийской АЭС

Для корректной оценки воздействия предприятия ЯТЦ на человека необходимо учитывать, что облучение населения, связанное с функционированием предприятия, является дополнительным к существующему облучению, которое определяется как природными, так и искусственными источниками радиации. Вследствие этого оценка доз должна проводиться как для потенциального

облучения на основе данных о выбросах и сбросах АЭС, так и на основе радиоэкологического мониторинга зоны наблюдения предприятия. Сравнение доз, рассчитанных на основе этих источников информации, позволяет оценить вклад АЭС в загрязнение продукции и облучение населения и сделать выводы о степени воздействия радиационно-опасного объекта на окружающую среду и человека.

Оценка доз облучения населения на основе результатов радиоэкологического обследования

Данные радиоэкологического обследования района размещения Балтийской АЭС, приведённые выше, были использованы для расчёта дозовой нагрузки на население от естественных и техногенных радионуклидов. Доза внутреннего облучения от естественных радионуклидов в основном формируется от ингаляционного пути поступления радионуклидов. Преимущественный вклад вносит непосредственный продукт распада ^{226}Ra – радон (^{222}Rn). Расчёты, проведённые для зоны наблюдения Балтийской АЭС, показали, что средняя доза внутреннего облучения от ингаляции радона составила 1,0 мЗв/год (Спиридонов и др., 2015).

Вклад других естественных радионуклидов в дозу внутреннего облучения по ингаляционному пути незначителен. Средняя доза от ингаляции радионуклидов (за исключением радона) согласно данным радиоэкологического обследования составила 9,3 нЗв/год для взрослого населения. Вклад космического излучения и космогенных радионуклидов в суммарную годовую дозу от ЕРФ на территории России достигает 0,46 мЗв/год (Крышев, Рязанцев, 2004). Доза внутреннего облучения от естественных радионуклидов от потребления продуктов питания формируется преимущественно ^{40}K и ^{14}C, значение дозы для взрослого населения в среднем составляет 0,65 мЗв/год. Средняя доза внешнего облучения от естественных радионуклидов согласно данным радиоэкологического обследования составила 0,27 мЗв/год, а от техногенных – 0,015 мЗв/год.

Суммарная годовая доза от радиационного фона составляет в среднем 2,4 мЗв/год от естественных радионуклидов и 0,02 мЗв/год – от техногенных. На рисунке 10 представлены вклады различных путей облучения в суммарную дозовую нагрузку, рассчитанные по данным радиоэкологического обследования.

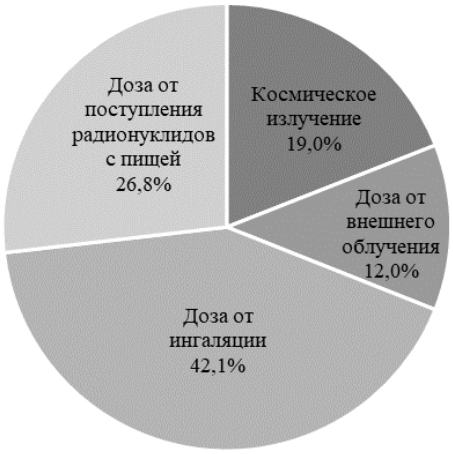


Рисунок 10. Вклад путей облучения в формирование годовой эффективной дозы, %

На рисунках 11 и 13 представлены данные по вкладу естественных и техногенных радионуклидов в суммарную дозовую нагрузку.

Без учёта космического излучения доза формируется в основном от ^{222}Rn и ^{40}K. Основной вклад в дозу от техногенных радионуклидов вносят ^{137}Cs и ^{90}Sr. К критическим продуктам питания, определяющим дозу внутреннего облучения населения,

относятся овощи, картофель, молоко и молочные продукты (рис. 12).

Суммарная доза от внутреннего и внешнего облучения населения, проживающего в районе расположения Балтийской АЭС, от радионуклидов техногенного происхождения значительно ниже установленного НРБ-99/2009 дозового предела облучения населения 1 мЗв/год, и в среднем составляет 0,032 мЗв/год (рис. 13).

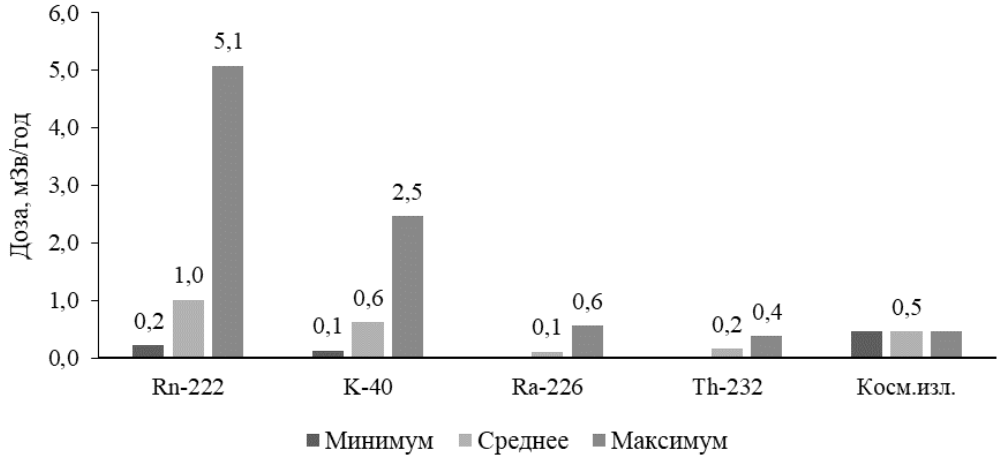


Рисунок 11. Вклад естественных радионуклидов в годовую эффективную дозу, мЗв/год

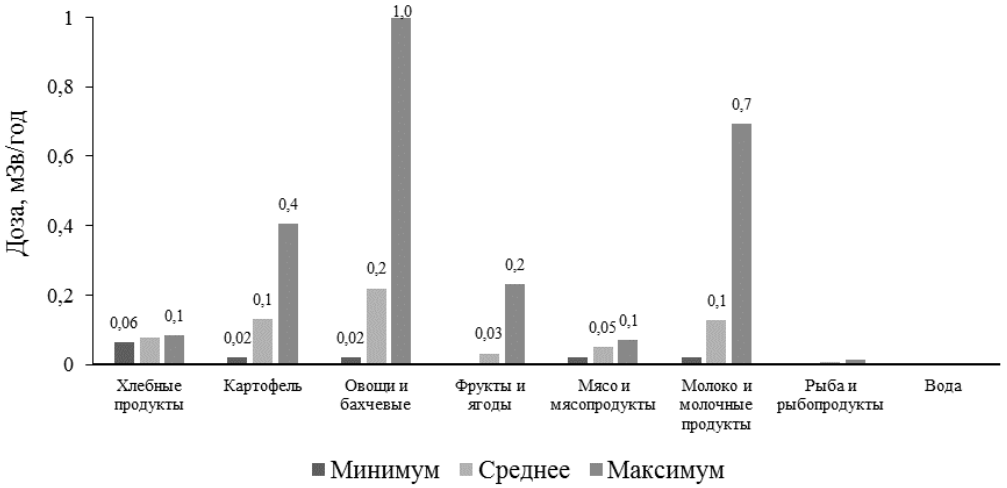


Рисунок 12. Распределение дозовой нагрузки от естественных и искусственных радионуклидов по основным категориям продуктов питания, мЗв/год

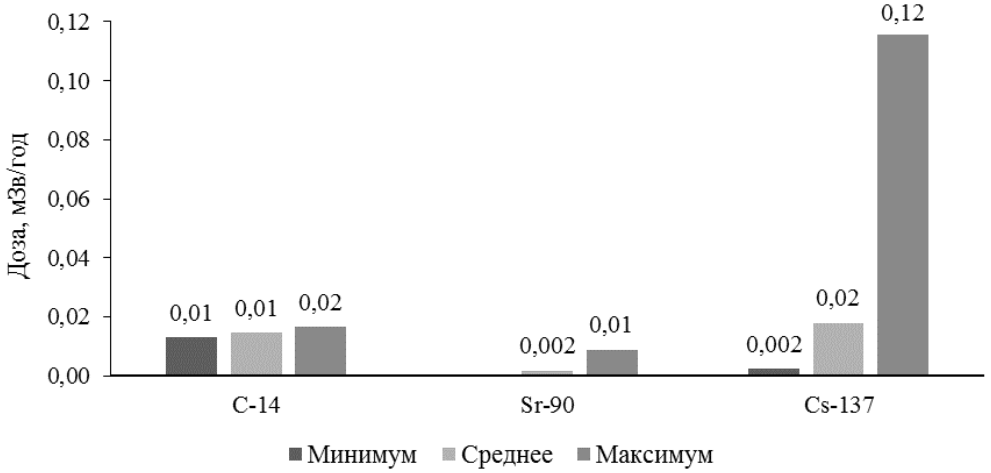


Рисунок 13. Вклад ^{14}C и техногенных радионуклидов в годовую эффективную дозу, мЗв/год

Оценка доз облучения населения в результате планируемых выбросов Балтийской АЭС

Результаты расчёта эффективной годовой дозы от газоаэрозольных выбросов Балтийской АЭС приведены в таблице 2.

На рисунке 14 представлена динамика годовой дозы облучения от радионуклидов станционного происхождения в течение 50 лет с момента начала эксплуатации станции.

Таблица 2

Эффективная годовая доза облучения населения от газоаэрозольных выбросов Балтийской АЭС в течение периода эксплуатации с 1-го по 50-й годы, мкЗв/год

Радионуклид	Эффективная доза, мкЗв/год					
	1 год	10 лет	20 лет	30 лет	40 лет	50 лет
^{3}H	$2,4\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$
^{14}C	$1,3\times10^{0}$	$1,3\times10^{0}$	$1,3\times10^{0}$	$1,3\times10^{0}$	$1,3\times10^{0}$	$1,3\times10^{0}$
^{83m}Kr	$3,5\times10^{-7}$	$3,5\times10^{-7}$	$3,5\times10^{-7}$	$3,5\times10^{-7}$	$3,5\times10^{-7}$	$3,5\times10^{-7}$
^{85m}Kr	$6,9\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$
^{85}Kr	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$
^{87}Kr	$2,4\times10^{-2}$	$2,4\times10^{-2}$	$2,4\times10^{-2}$	$2,4\times10^{-2}$	$2,4\times10^{-2}$	$2,4\times10^{-2}$
^{88}Kr	$2,6\times10^{-1}$	$2,6\times10^{-1}$	$2,6\times10^{-1}$	$2,6\times10^{-1}$	$2,6\times10^{-1}$	$2,6\times10^{-1}$
^{131m}Xe	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$	$3,8\times10^{-5}$
^{133}Xe	$1,6\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$	$1,6\times10^{-2}$
^{135}Xe	$3,7\times10^{-2}$	$3,7\times10^{-2}$	$3,7\times10^{-2}$	$3,7\times10^{-2}$	$3,7\times10^{-2}$	$3,7\times10^{-2}$
^{138}Xe	$1,0\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$	$1,0\times10^{-2}$
^{131}I	$4,4\times10^{-2}$	$4,4\times10^{-2}$	$4,3\times10^{-2}$	$4,4\times10^{-2}$	$4,34\times10^{-2}$	$4,4\times10^{-2}$
^{132}I	$2,8\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-5}$	$2,8\times10^{-5}$
^{133}I	$4,8\times10^{-4}$	$4,8\times10^{-4}$	$4,8\times10^{-4}$	$4,8\times10^{-4}$	$4,8\times10^{-4}$	$4,8\times10^{-4}$
^{134}I	$1,1\times10^{-5}$	$1,1\times10^{-5}$	$1,1\times10^{-5}$	$1,1\times10^{-5}$	$1,1\times10^{-5}$	$1,1\times10^{-5}$
^{135}I	$7,1\times10^{-5}$	$7,1\times10^{-5}$	$7,1\times10^{-5}$	$7,1\times10^{-5}$	$7,1\times10^{-5}$	$7,1\times10^{-5}$
^{51}Cr	$2,3\times10^{-7}$	$2,3\times10^{-7}$	$2,3\times10^{-7}$	$2,3\times10^{-7}$	$2,3\times10^{-7}$	$2,3\times10^{-7}$
^{54}Mn	$3,6\times10^{-7}$	$6,0\times10^{-7}$	$6,0\times10^{-7}$	$6,0\times10^{-7}$	$6,0\times10^{-7}$	$6,0\times10^{-7}$
^{60}Co	$2,8\times10^{-5}$	$6,5\times10^{-5}$	$7,9\times10^{-5}$	$8,3\times10^{-5}$	$8,4\times10^{-5}$	$8,4\times10^{-5}$
^{89}Sr	$2,1\times10^{-5}$	$2,1\times10^{-5}$	$2,1\times10^{-5}$	$2,1\times10^{-5}$	$2,1\times10^{-5}$	$2,1\times10^{-5}$
^{90}Sr	$7,5\times10^{-7}$	$1,9\times10^{-6}$	$2,5\times10^{-6}$	$2,8\times10^{-6}$	$2,9\times10^{-6}$	$3,0\times10^{-6}$
^{134}Cs	$3,9\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$
^{137}Cs	$4,0\times10^{-2}$	$6,3\times10^{-2}$	$7,5\times10^{-2}$	$8,1\times10^{-2}$	$8,4\times10^{-2}$	$8,6\times10^{-2}$
Сумма	$2,0\times10^{0}$	$2,0\times10^{0}$	$2,1\times10^{0}$	$2,1\times10^{0}$	$2,1\times10^{0}$	$2,1\times10^{0}$

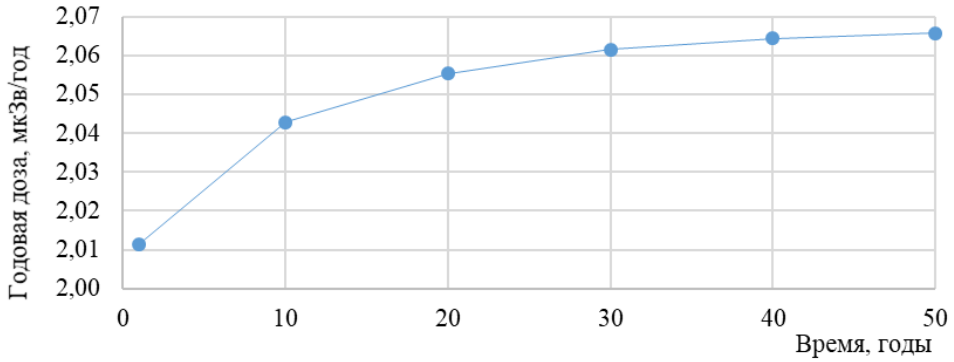


Рисунок 14. Динамика годовой дозы облучения населения на период 50 лет с момента начала эксплуатации станции, мкЗв/год

Как видно из рисунка, годовая эффективная доза возрастает с течением времени, что обусловлено накоплением в почве долгоживущих радионуклидов (Sharpan et al., 2014). Суммарная доза составляет 2,01 мкЗв/год – в первый год после начала работы станции, 2,04 мкЗв/год – в 10-й год, 2,06 мкЗв/год – на 20-й год, 2,06 мкЗв/год – на 30-й год, 2,06 и 2,07 мкЗв/год – на 40-й и 50-й годы соответственно. Основной вклад в дозу вносят ^{14}C, ^{3}H и ^{88}Kr, к пятидесятому году несколько увеличивается вклад ^{137}Cs (рис. 15) (Mikailova et al., 2019).

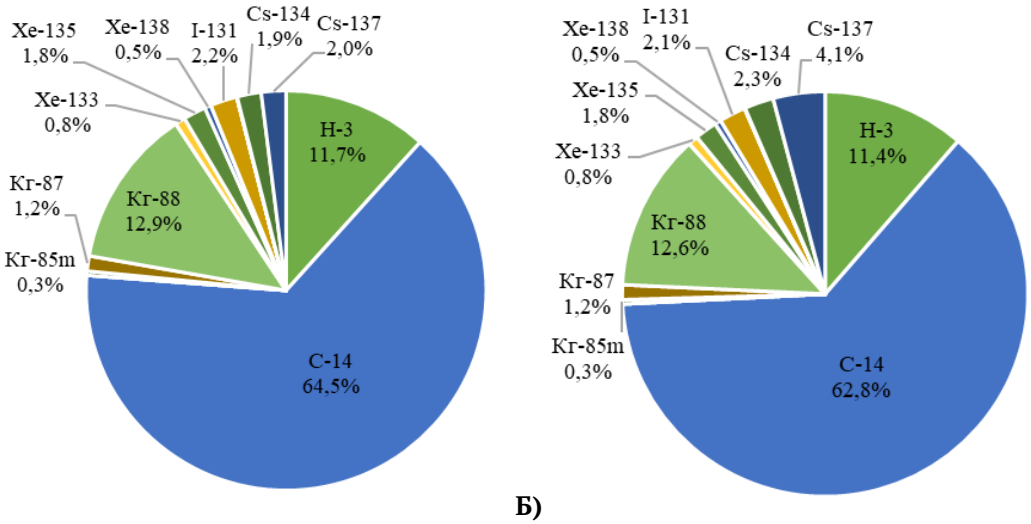


Рисунок 15. Вклад радионуклидов в годовую дозу облучения с учётом трития и углерода-14 в первый и пятидесятый годы работы станции, %.
***А** – первый и **Б** – пятидесятый годы работы Балтийской АЭС*

На рисунке 16 представлена динамика годовой дозы, формируемой по различным путям облучения. Вклад в суммарную дозовую нагрузку внешнего облучения от облака и внутреннего облучения от ингаляционного поступления радионуклидов остается постоянным в течение всего периода работы предприятия. Дозы внешнего облучения от поверхности земли и внутреннего облучения от потребления продуктов питания увеличиваются с течением времени, что связано с накоплением долгоживущих радионуклидов в почве.

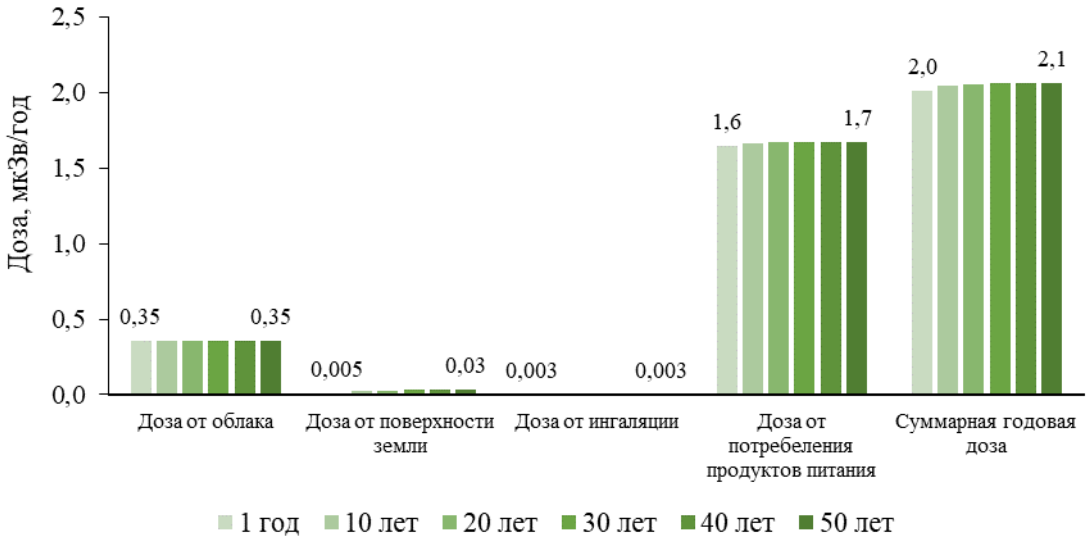


Рисунок 16. Динамика годовой дозы от различных путей облучения, мкЗв/год

Основной вклад в дозу облучения при погружении в облако вносят ИРГ, поступающие в атмосферу при работе атомной станции (рис. 17а). Суммарная годовая доза внешнего облучения от облака составляет 0,36 мкЗв/год и с течением времени остаётся постоянной.

Доза облучения населения по ингаляционному пути поступления радионуклидов в организм человека формируется в основном от трития (рис. 17б). Вклад трития составляет 89,2 %, вклады ^{14}C, радиоактивного йода и $^{134,137}Cs$ составляют 6,9 %, 2,9 % и 1 % соответственно. Величина дозы внутреннего облучения от ингаляции равняется 3,14 нЗв/год. Доза облучения от радионуклидов, находящихся на поверхности земли, в первый год работы предприятия формируется от ^{134}Cs (55,9 %), ^{137}Cs (35,6 %) и ^{131}I (4,8 %) (рис. 18).

К пятидесятому году вклад ^{137}Cs в дозу увеличивается до 72,5 %, а вклад ^{134}Cs уменьшается до 26,1 %. Доза внешнего облучения населения составляет $1{,}8\times10^{2}$ нЗв/год и $1{,}95\times10^{2}$ нЗв/год в первый и пятидесятый годы работы станции соответственно. Таким образом, увеличение вклада техногенных радионуклидов за время работы АЭС (принято значение 50 лет) составит 15 нЗв/год.

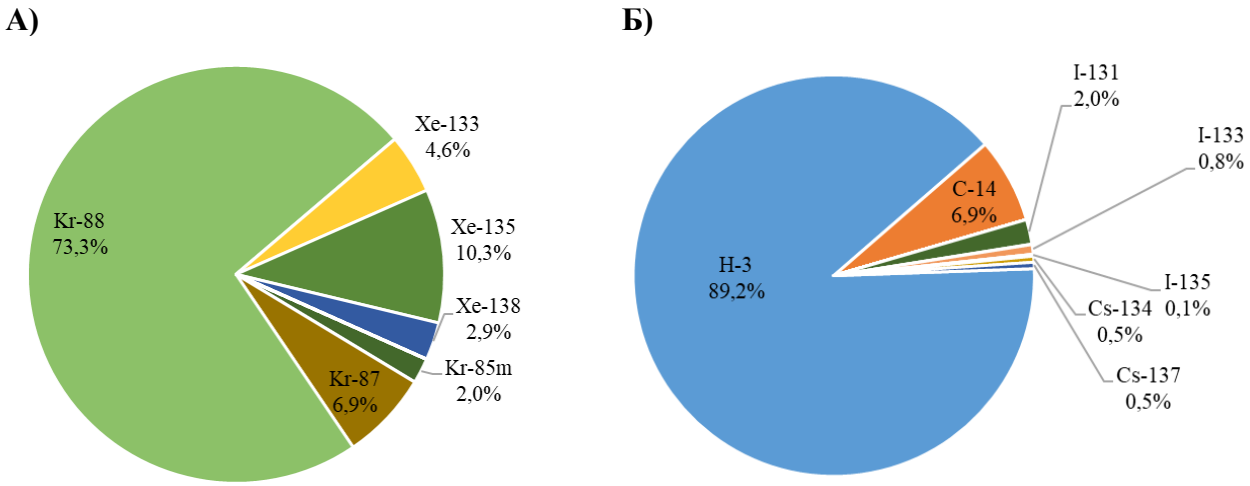


Рисунок 17. Вклад радионуклидов в годовую дозу облучения, %
***А** – от облака; **Б** – от ингаляции, %*

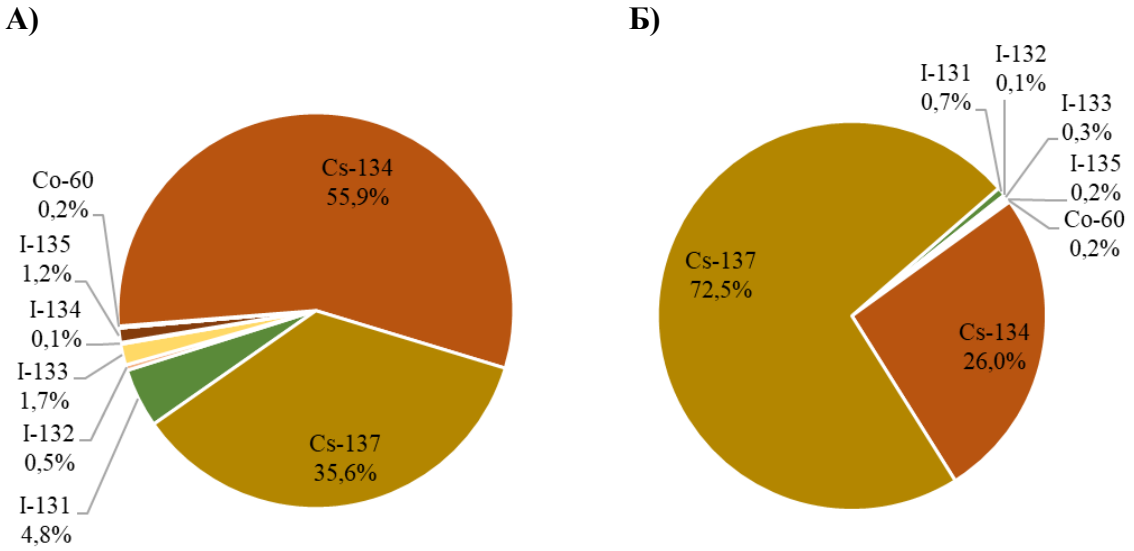


Рисунок 18. Вклад радионуклидов в годовую дозу облучения от поверхности почвы в первый и пятидесятый годы работы станции, %
***А** – первый год работы Балтийской АЭС, **Б** – пятидесятый год работы Балтийской АЭС*

Основной вклад в дозу внутреннего облучения от потребления продуктов питания будут вносить ^{14}C и ^{3}H (рис. 19). Оценка дозовой нагрузки от поступления радионуклидов с продуктами питания без учёта ^{14}C и ^{3}H показала, что критическими группами продуктов питания являются мясо и молоко (рис. 20). Доза облучения от поступления радионуклидов с продуктами питания составила 1,65 мкЗв/год в первый год и 1,67 мкЗв/год – в пятидесятый год работы станции.

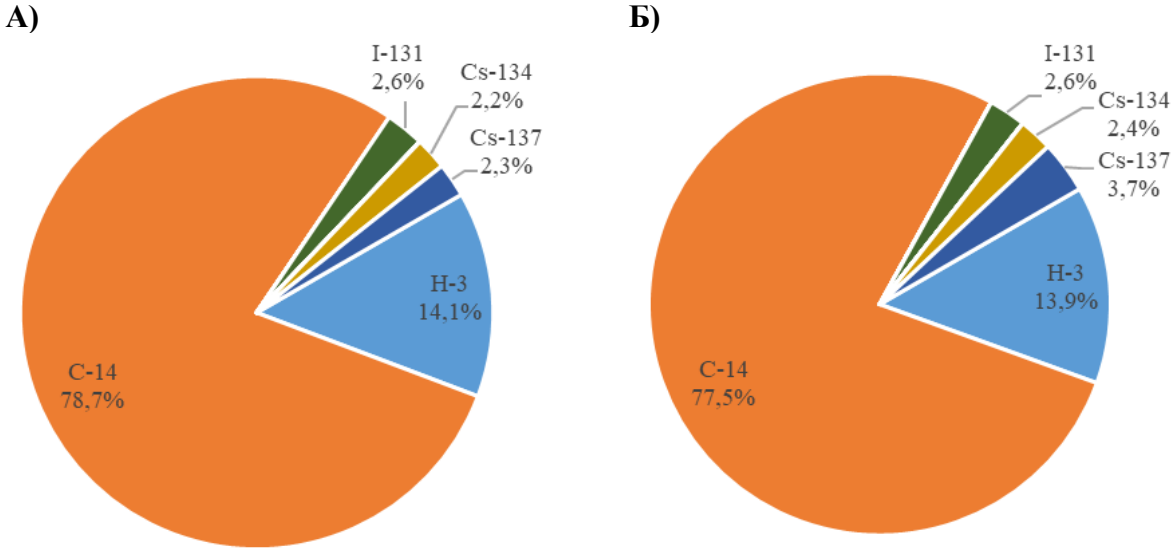


Рисунок 19. Вклад радионуклидов в годовую дозу облучения от потребления продуктов питания, %.
***А** – первый год и **Б** – пятидесятый год работы Балтийской АЭС*

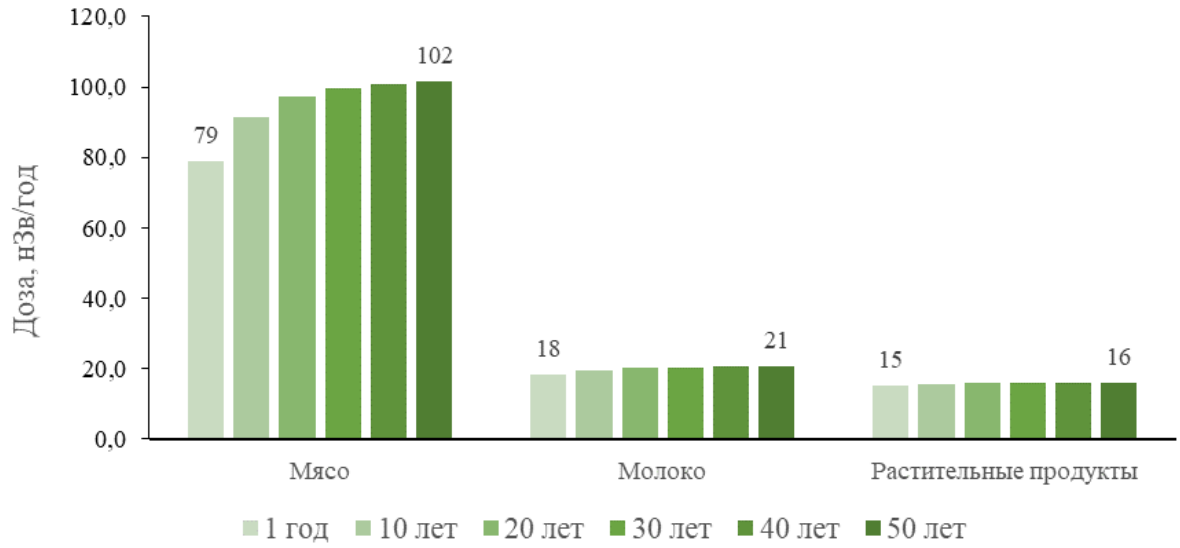


Рисунок 20. Доза облучения от продуктов питания, нЗв/год

Суммарная годовая доза облучения населения от атмосферных выбросов Балтийской АЭС составляет 0,2 % от годовой эффективной дозы 1 мЗв. Дозовая нагрузка от атмосферных выбросов Балтийской АЭС не превысит значение квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов для строящихся или проектируемых АЭС, равной 10 мкЗв в год и составит около 0,8 % от этой величины.

Заключение

По данным радиоэкологического обследования в районе расположения Балтийской АЭС была выполнена оценка доз облучения населения от естественных и техногенных радионуклидов. Показано, что дозы облучения взрослого населения в районе расположения Балтийской АЭС, оценённые по данным, характеризующим содержание техногенных радионуклидов в природных и аграрных экосистемах, составляет в среднем 0,02 мЗв/год. Основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs. Годовая эффективная доза облучения населения, формируемая естественными радионуклидами, составляет 2,4 мЗв/год, что в 80 раз выше по сравнению с вкладом от искусственных радионуклидов.

После ввода Балтийской АЭС в эксплуатацию, годовая эффективная доза облучения населения от атмосферных выбросов Балтийской АЭС будет возрастать с 2,01 до 2,07 мкЗв/год за период с 1-го по 50-й годы работы станции. Внутреннее облучение будет вносить основной вклад в дозовую нагрузку на население от атмосферных выбросов Балтийской АЭС, а основным дозообразующим радионуклидом будет ^{14}C. Суммарная годовая доза облучения населения от атмосферных выбросов Балтийской АЭС составит 0,2 % от предела годовой эффективной дозы 1 мЗв. Дозовая нагрузка от атмосферных выбросов Балтийской АЭС не превысит значение квоты на облучение населения от газоаэрозольных выбросов для строящихся или проектируемых АЭС (50 мкЗв в год).

Литература

Андреева Н.В. и др. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем в районе расположения Балтийской АЭС // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2019. Т. 30. № 1–2. С. 105–120.

Душин В.Н. и др. Радиоэкологический мониторинг окружающей среды района размещения Балтийской АЭС: отчёт (заключительный) / АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»; рук. В.Н. Душин; договор № ВТ1/4541 от 27.05.2015. СПб., 2015. С. 1010.

Карпенко Е.И., Санжарова Н.И. Результаты радиоэкологического мониторинга в районе расположения Балтийской АЭС // Экологическая безопасность АЭС: сборник трудов II научно-

практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию атомной отрасли России. Калининград, 2015. С. 74–77.

Карпенко Е.И. и др. Содержание радионуклидов в различных компонентах наземных экосистем в районе расположения Балтийской АЭС // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления: тезисы докладов международной научно-практической конференции. Обнинск: НПО «Тайфун», 2016. С. 51.

Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Нормативы радиационной безопасности при использовании атомной энергии // Атомная энергия. 2004. Т. 97. № 4. С. 299–308.

Кузнецов В.К., Карпенко Е.В., Исамов Н.Н. и др. Результаты радиоэкологического мониторинга наземных экосистем в зоне строительства Балтийской АЭС // Актуальные вопросы радиоэкологии: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 1 / Под ред. чл.-корр. РАН Н.И. Санжаровой. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2018.С. 170.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М: Метеоагентство Росгидромета, 2016. С. 346.

Санжарова Н.И. и др. Радиоэкологический мониторинг окружающей среды района размещения Балтийской АЭС: заключительный технический отчёт. Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. С. 912.

Санжарова Н.И. и др. Концепция и программа радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. проф. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 9–21.

СанПиН 2.1.4. 559-96. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (утв. и введ. в действие постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 24.10.1996 г. № 26). М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзор России, 1996. 111 с.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (утв. и введ. в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 № 47): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

СанПин 2.1.4.2580-10. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Изменения № 2 к СанПин 2.1.4.1074-01 (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 25.02.2010 г. № 10; введ. в действие 01.05.2010 г.). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 6 с.

СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 28.06.2010 г. № 71). М., 2010. 22 с.

СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ Г.Г. Онищенко от 26.04.2010 г. № 40). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. С. 83.

Спиридонов С.И., Алексахин Р.М., Спирин Е.В. Интегральные показатели радиационного воздействия объектов открытого и замкнутого топливного цикла на население // Атомная энергия. 2015. Т. 118. № 1. С. 47–54.

Boyer C., Gontier G., Pourcelot L. et al. Environmental survey near a decommissioning nuclear facility: example of tritium monitoring in the terrestrial environment of Creys-Malville // ICRER 2014: 3. International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, Barcelona (Spain), 7–12 Sep 2014.

IAEA (2017). International peer review of the environmental impact assessment performed for the licence application of the Baltic-1 nuclear power plant, Kaliningrad, Russian Federation. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017. 92 c.

Jaeschke B.C. et al. Tissue-specific incorporation and genotoxicity of different forms of tritium in the marine mussel. Mytilus edulis // Environmental Pollution. 2011. Vol. 159. № 1. P. 274–280.

Kim S.B., Baglan N., Davis P.A. Current understanding of organically bound tritium (OBT) in the Environment // J. of Environ. Radioact. 2013. Vol. 126. P. 83–91.

Mikailova R.A. et al. Estimation and prediction of the population irradiation dose in the vicinity of NPP with VVER-1200 // Atomic Energy. 2019. Vol. 127. № 1. P. 56–59.

Salminen R., Chekushin V, Tenhola M. et al. Geochemical Atlas of Eastern Barents Region. Elsevier VR, Amsterdam, 2004. P. 1–530.

Sharpan L.A., Karpenko E.I., Spiridonov S.I. Estimation of the radiation dose to the public due to atmospheric emissions from the Rostov NPP // Atomic Energy, Springer New York Consultants Bureau. 2014. Vol. 115. № 3. P. 197–200.

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АГРАРНЫХ ЭКОСИСТЕМ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ БЕЛОЯРСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Панов А.В.[1], Душин В.Н.[2], Исамов Н.Н.[1], Шабалев С.И.[2], Кузнецов В.К.[1], Спиридонов С.И.[1], Карпенко Е.И.[1], Анисимов В.С.[1], Гешель И.В.[1], Сидорова Е.В.[1]

1 – ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии
2 – АО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

Представлены результаты комплексного радиационно-экологического мониторинга приземного атмосферного воздуха, наземных (природных и аграрных) и водных экосистем, а также оценка дозовых нагрузок на население в районе размещения Белоярской АЭС. Показано, что содержание естественных и техногенных радионуклидов в компонентах различных природных сред находится на уровне регионального фона. Повышенное содержание техногенных радионуклидов отмечено только на территории Ольховского болота в отдельных компонентах природных экосистем. Превалирующий вклад в суммарную дозу от техногенных радионуклидов в районе Белоярской АЭС вносит Институт реакторных материалов. Полученные данные позволяют сделать вывод, что Белоярская АЭС не оказывает значимого влияния на радиационную обстановку и дополнительное облучение населения.

Белоярская АЭС, радиоэкологический мониторинг ^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{3}H, ^{14}C, природные радионуклиды, воздействие на окружающую среду, дозы облучения населения

Характеристики Белоярской АЭС как источника воздействия на окружающую среду

Белоярская АЭС (БАЭС), открытая в апреле 1964 года, является одной из старейших в Российской Федерации. Это единственная АЭС, на площадке которой используются различные типы ядерных реакторов. Особенностью АЭС является многолетняя эксплуатация промышленных реакторов на быстрых нейтронах.

Белоярская АЭС расположена в Свердловской области в 35 км от г. Екатеринбург и в 15 км к югу от города Асбест. На площадке атомной станции размещены энергоблоки № 1 и № 2 с водографитовыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200, которые использовались для отработки технологий канальных реакторов. После 17 и 22 лет работы энергоблоки №1 и №2 были остановлены соответственно в 1981 и 1989 гг., сейчас они находятся в режиме длительной консервации с выгруженным из реакторов топливом и соответствуют по терминологии международных стандартов 1-й стадии снятия с эксплуатации АЭС (рис. 1).

В настоящее время на Белоярской АЭС используются два энергоблока: БН-600 и БН-800 с натриевым теплоносителем. Это крупнейшие в мире энергоблоки с реакторами на быстрых нейтронах. По показателям экологической безопасности они входят в число лучших ядерных реакторов мира. Рассматривается возможность дальнейшего расширения Белоярской АЭС энергоблоком № 5 с быстрым реактором мощностью 1200 МВт – головного коммерческого энергоблока для серийного строительства.

В непосредственной близости от энергоблока БН-800 БАЭС находится предприятие АО «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ») с действующей реакторной установкой ИВВ-2М. Энергоблоки № 1, № 2 и № 3 расположены на промплощадке 1-ой и 2-ой очереди. Энергоблок № 4 размещается в 2-х км севернее блока № 3 на площадке 3-й очереди. В качестве границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ) принята граница промплощадки 1-ой и 2-ой очереди и граница промплощадки 3-й очереди. В СЗЗ Белоярской АЭС также включены: Ольховское болото, р. Ольховка и земли (20 метров с обеих сторон) трубопроводов, отводящих хозфекальные воды с дебалансными водами Белоярской АЭС в Ольховское болото.

Рисунок 1. Панорама Белоярской АЭС (Годовой отчёт ..., 2017)

В Зону наблюдения (ЗН) вокруг Белоярской АЭС включена территория по следующим границам:

- внутренняя граница зоны наблюдения – по внешней границе санитарно-защитной зоны Белоярской АЭС;
- радиус зоны наблюдения – 13 км от вентиляционной трубы энергоблока № 3 Белоярской АЭС.

Несмотря на то, что действующие энергоблоки №3 и №4 характеризуются довольно низкими выбросами и сбросами, длительное использование реакторов АМБ-100 и АМБ-200, а также реактора ИВВ-2М привело к формированию локальных очагов загрязнения в санитарно-защитной зоне и частично в зоне наблюдения Белоярской АЭС. Важной особенностью мониторинга в районе БАЭС является и оценка совместного воздействия на население и окружающую среду разных ядерно-энергетических объектов, расположенных на одной площадке, что определяет специфику организации радиационно-экологического наблюдения в зоне размещения этой атомной станции. Таким образом, представленные в настоящей статье результаты служат примером мониторинга не только действующих объектов, но и мест радиационного наследия, характерных для такого рода предприятий ЯТЦ.

В настоящее время источниками загрязнения атмосферы и водных объектов в границах санитарно-защитной зоны БАЭС являются действующие энергоблоки № 3 и № 4 атомной станции и исследовательский реактор на существующей площадке АО «ИРМ». Потенциальными источниками загрязнения являются также выбросы и сбросы проектируемого энергоблока БН-1200. Описание этих источников выбросов и сбросов приведено в работах (Радиационная обстановка ..., 2010, Радиационная обстановка ..., 2011, Радиационная обстановка ..., 2014). Выбросы производятся из вентиляционных труб (ВТ) высотой от 40 до 100 м. Контроль выбросов со станции производится штатной системой радиационного контроля на основе измерения объёмной активности инертных радиоактивных газов (ИРГ) (непрерывно), ^{131}I и аэрозолей (суточный отбор пробы) в выбрасываемом воздухе и расхода воздуха в вентиляционную трубу. На загрязнение атмосферы радиоактивными веществами влияет и выброс аэрозолей (^{60}Co и ^{137}Cs), связанных с выполнением работ по снятию с эксплуатации блоков № 1 и 2, а также выбросом ИРГ через ВТ блока № 3 с реактором БН-600 и № 4 с реактором БН-800. На БАЭС годовые выбросы в атмосферу ниже допустимых уровней НРБ-99/2009 (СанПин 2.6.1.2523-09, 2009) на 2–4 порядка. Ни по одному радионуклиду из регламентируемой группы не наблюдаются превышения допустимых выбросов, установленных СП АС-03 (СанПин

2.6.1.24-03, 2003). Отличительной особенностью АО "Институт Реакторных Материалов" является присутствие в выбросах альфа-излучателей (трансурановые элементы). АО «ИРМ» является источником поступления ^{14}C, ^{131}I, изотопов Pu в приземную атмосферу в районе расположения Белоярской АЭС (табл. 1).

Таблица 1

Газоаэрозольные выбросы радионуклидов с Белоярской АЭС (энергоблоки №1–3) за 2002–2010 гг., Бк/год (Радиационная обстановка ..., 2010, Радиационная обстановка ..., 2011)

Регламентируемая группа нуклидов	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	ДВ (СП АС 03)
ИРГ	$1{,}2\times10^{13}$	$2{,}51\times10^{12}$	$2{,}22\times10^{12}$	$4{,}4\times10^{12}$	$5{,}47\times10^{12}$	$6{,}9\times10^{14}$
^{131}I	<МДА*	–	–	–	–	$1{,}8\times10^{10}$
^{60}Co	$2{,}1\times10^{5}$	$4{,}32\times10^{5}$	$1{,}5\times10^{5}$	$2{,}13\times10^{5}$	$3{,}2\times10^{5}$	$7{,}4\times10^{9}$
^{90}Sr	<МДА	–	–	–	–	–
^{134}Cs	–	–	–	–	–	$9{,}0\times10^{8}$
^{137}Cs	$5{,}7\times10^{7}$	$9{,}55\times10^{6}$	$9{,}2\times10^{6}$	$7{,}3\times10^{6}$	$1{,}427\times10^{7}$	$2{,}0\times10^{9}$
^{24}Na	<МДА	<МДА	<МДА	<МДА	–	–

*Минимально детектируемая активность.

Приёмниками жидких сбросов Белоярской АЭС служат водоём-охладитель станции и Ольховское болото. Источником поступления радиоактивных веществ с БАЭС в водоём-охладитель является промышленно-ливневая канализация (ливневые и талые воды с промплощадки АЭС, а также от потребителей технической воды вспомогательных зданий и сооружений). Ливневые воды удаляются с территории промплощадки через промливневый канал в водоём-охладитель. Потенциальным источником поступления радионуклидов в водоём-охладитель является оборотная циркуляционная вода. В Ольховское болото сбрасываются воды хозяйственно-фекальной канализации (фекальные воды промплощадки АЭС, хозяйственные воды из зданий промплощадки, в том числе душевые воды). Хозяйственно-бытовые стоки промплощадки направляются на самостоятельные очистные сооружения и далее сбрасываются в Ольховское болото, которое является отчуждённой территорией, входящей в санитарно-защитную зону. Данными радиационного контроля станции за последние годы подтверждается отсутствие превышения установленных уровней допустимого сброса с Белоярской АЭС. Основной вклад в суммарную активность сбросных вод вносит тритий. АО «ИРМ» не имеет непосредственного сброса использованной воды в поверхностные водные объекты. Жидкие радиоактивные отходы от АО «ИРМ» поступают на спецводоочистку Белоярской АЭС, затем на очистные сооружения ХФК БАЭС и далее в Ольховское болото.

Природно-климатическая характеристика района расположения Белоярской АЭС

Почвенно-климатическая зона

Климат региона Белоярской АЭС умеренно-континентальный с характерной резкой изменчивостью погодных условий, хорошо выраженными сезонами года. Средняя годовая температура воздуха в районе расположения площадки, приведённая к многолетнему периоду (1881–2010 гг.) составляет 1,3 °С. Среднемесячная температура наиболее холодного месяца (январь) – минус 15,2 °С, наиболее тёплого месяца (июль) – 17,3 °С. Абсолютный (1881–2010 гг.) минимум температуры воздуха минус 46 °С (декабрь 1968 г.), абсолютный максимум 37 °С (июль 1952 г.). Относительная влажность воздуха на исследуемой территории во все месяцы высокая – от 59 % в мае до 80 % в ноябре-декабре. Число дней с относительной влажностью больше или равно 80 % составляет за год 80–85 дней, с относительной

влажностью меньше или равно 30 % – 30 дней (за период 1937–2010 гг.). Рассматриваемый район относится к зоне достаточного увлажнения. Годовая норма осадков составляет 540 мм, из них 410 мм (76 %) приходится на тёплый период года (апрель–октябрь). Общая продолжительность выпадения осадков за год в среднем составляет 1796 часов. Ветровой режим рассматриваемого района формируется под влиянием общей циркуляции атмосферы, характеризующейся преобладанием воздушных потоков западного переноса. Повторяемость этого направления за год составляет 21 %.

Геоморфологические особенности района обусловлены его геологическим строением, в частности, историей его тектонического развития. Обширные площади водораздельных пространств представляют собой денудационную холмисто-увалистую поверхность выравнивания. Вдоль развитой речной сети выделяется холмисто-увалистая поверхность придолинных склонов, а также современная пойменная терраса и 2–3 поверхности выравнивания. Значительная часть поверхности выравнивания, особенно поверхность пойменной и надпойменной террас, заболочены. В пределах выделенных геоморфологических элементов на отдельных участках прослеживаются линейно-вытянутые узкие понижения, приуроченные к дизъюнктивным дислокациям. Отмечается связь отрицательных форм рельефа с участками максимального развития тектонической трещиноватости коренных пород.

По гидрогеологическим свойствам район расположения Белоярской АЭС относится к Большеуральскому сложному бассейну корово-блоковых (пластово-блоковых и пластовых) вод. В пределах бассейна основным продуктивным водоносным горизонтом является палеозойский водоносный горизонт, приуроченный к верхней трещиноватой зоне метаморфических и магматических пород. В условиях открытых геологических структур эти воды подвержены наибольшей опасности загрязнения при их недостаточной природной защищённости. Белоярское водохранилище создано на р. Пышме в 1964 году и использовалось как водоём-охладитель оборотной системы технического водоснабжения I очереди Белоярской АЭС (блоки 1 и 2). С конца 1970 года в р. Пышма стали поступать очищенные сточные воды городов: Екатеринбург, Среднеуральск, Верхняя Пышма, Березовск и др. Так как водоснабжение этих городов осуществляется из бассейнов рек Исеть, Чусовая и Уфа, то водность р. Пышмы существенно увеличилась. В то же время возрастали и отборы воды из реки и водохранилища на нужды промышленности, коммунального хозяйства, орошения и т.д. Прогнозная оценка объёмов водопотребления из Белоярского водохранилища составляет 48,95 млн м^3/год, поступления сточных вод – 65,32 млн м^3/год. Расчётные значения естественного стока в створе р. Пышма – Белоярский гидроузел в маловодные годы обеспеченности 95 % и 97 % составляют 41,6 млн м^3/год и 36,0 млн м^3/год соответственно. Белоярское водохранилище является пресноводным среднеминерализованным водоёмом. Естественный термический режим Белоярского водохранилища в значительной мере определяется его морфометрическими характеристиками и климатом района. Сравнительно небольшая глубина (средняя глубина 6,6 м) обуславливает хороший прогрев водных масс в летний период. Переход температуры воды через 0,2 °С наблюдается в середине апреля и в начале ноября. Средняя продолжительность периода с температурой более 0,2 °С составляет 196 дней. Наибольшие температуры воды наблюдаются, как правило, в июле, иногда – в июне и августе. В настоящее время Белоярское водохранилище используется как первичный поглотитель тепла энергоблоков БН-600 и БН-800.

Ольховское болото и река Ольховка расположены восточнее г. Заречный. Ольховское болото низовое, является местом произрастания лекарственных растений. Местами труднопроходимо. Ольховское болото является ландшафтным памятником природы областного значения и находится в границах Сухоложского лесничества Грязновского участкового лесничества.

Территория исследования принадлежит к подзоне дерново-подзолистых почв южной тайги. На территории исследования доминируют дерново-подзолистые почвы с пятнами

тёмно-серых лесных. На западе и юге территории встречаются чернозёмы выщелоченные. Таким образом, регион Белоярской АЭС располагается на границе нескольких подзон, что объясняет его неоднородность. Основной фон почвенного покрова составляют дерново-подзолистые почвы разной степени оподзоленности, которые формируются под хвойными и лиственно-хвойными лесами в центральной и северной частях участка, и серые лесные почвы (чернозёмы выщелоченные) на юге, а структура и состав сопутствующих компонентов (болотно-подзолистых, болотных, дерново-глеевых, дерново-карбонатных и аллювиальных) определяются орографическими и литологическими особенностями местности.

Фоновыми почвами для территории в центральной и северной частях являются дерново-подзолистые и подзолистые почвы. Признаки оглеения срединных и нижних горизонтов отмечаются локально, что говорит о хорошем дренаже территории. По степени развития подзолистые почвы в основном относятся к неглубокоподзолистым. По степени развития дернового процесса дерново-подзолистые почвы относятся к слабодерновым, реже к среднедерновым. На юге территории фоновыми почвами являются чернозёмы выщелоченные, чередующиеся с чернозёмами оподзоленными и тёмно-серыми лесными почвами по березовым колкам. По долинам рек развиты аллювиальные луговые почвы и аллювиальные болотные почвы, иногда карбонатные и остаточно-карбонатные, в большинстве случаев, слоистые. Под залежами формируются дерново-глеевые почвы и чернозёмы выщелоченные освоенные. Близость плотных коренных пород обусловила значительную щебнистость большинства почв, некоторые из которых по степени каменистости могут быть отнесены к поверхностно-каменистым.

Растительность и животный мир

В лесорастительном отношении рассматриваемая территория расположения БАЭС относится к южно-таёжному лесорастительному округу Зауральской холмисто-предгорной провинции. Основной лесообразующей породой является сосна обыкновенная, кроме того, часто встречается береза, осина, липа мелколиственная. Коренными типами леса являются сосняки ягодниковые и травяные, реже – сфагновые и орляковые, а также березняки осоково-травяные. В подлеске встречаются: шиповник, рябина, можжевельник, ракитник русский и др. В напочвенном покрове преобладает черника, вейник и др. Редкими куртинами встречаются зелёные мхи. К заболоченным участкам чаще всего приурочены березняки, осохотравяные – они являются низкобонитетными древостоями со слабой возобновляемостью. Таким образом, леса в окрестностях Белоярской АЭС можно отнести к ассоциациям березово-сосновых злаково-разнотравных и березово-сосновых осочково-злаково-разнотравных лесов.

Фауна региона представлена животными азиатского и европейского происхождения и характерна для северной и южной тайги Среднего Урала. В регионе обитают 55 видов млекопитающих, 228 видов птиц, 37 видов рыб, 14 видов пресмыкающихся и земноводных. Млекопитающие: бурый медведь, волк, рысь, соболь, куница, лисица, норка американская, бобр, лось, косуля, кабан, птицы: гуси, утки, глухарь, тетерев, рябчик, куропатки, кулики, голуби, пастушки, перепел. Урбанизированные и естественные ландшафты населяют пасюк, полевки, лесные полевые мыши, землеройки. Реже встречаются летучие мыши, ёж, очень редко – белка-летяга. Заяц-беляк распространён повсеместно, заяц-русак – только в лесостепи Зауралья. В хозяйственных целях используется более 50 видов диких зверей и птиц. Наиболее интенсивно эксплуатируются запасы диких копытных животных, заяц-беляк, некоторые виды пушных зверей, боровая и водоплавающая дичь. Из птиц к объектам охоты отнесены: глухарь, тетерев, рябчик, перепел, куропатки, гуси, казарки, утки, лысуха, вальдшнеп, бекас, дупель и другие кулики, голуби. В начале XX века к редким и находящимся под угрозой исчезновения видам животных можно было отнести около 20 видов, в настоящее время – более 70. Редкими считаются не только такие представители фауны, как скопа, орлан-белохвост, сапсан, но и такие ранее обычные виды, как

серая куропатка, перепел, обыкновенный ёж, европейская норка. Рыбохозяйственный фонд составляют озёра, реки, водохранилище. В состав ихтиофауны р. Пышма и Белоярского водохранилища входят представители 24 видов рыб из 7 различных семейств. Из них аборигенная ихтиофауна насчитывает 16 видов; 8 видов были интродуцированы. Наиболее многочисленны представители семейства карповых – 14 видов; второе место занимают окуневые – 3 вида. Остальные семейства представлены 1–2 видами. Из аборигенных видов наиболее массовым является плотва. В отдельные годы в экспериментальных уловах её доля составляла 40 %. Кроме плотвы из аборигенных видов имеют значительную численность и используются в промысле окунь, щука, линь, налим, золотой и серебряный караси, а также мелочь третьей группы (ёрш, уклея, верховка и др.).

Сельское хозяйство

Площадка Белоярской АЭС расположена на территории Южного управленческого округа Свердловской области. Более 90 % сельскохозяйственных угодий 30-км зоны Белоярской АЭС находится в Белоярском городском округе Свердловской области. С городским округом соседствуют: Березовский, Заречный, Асбест, Богданович, Екатеринбург, Каменский и Сысертский городские округа. Сельское хозяйство на территории Березовского, Асбестовского и Сысертского районов практически не развито из-за отсутствия сельскохозяйственных угодий и преимущественного покрытия территории этих районов лесом. В 30-км зону Белоярской АЭС входят также несколько крестьянско-фермерских хозяйств Богдановичского района.

Площадь Белоярского муниципалитета составляет 1,3 км^2. На территории Белоярского городского округа расположены 45 населённых пунктов. Наиболее крупные – поселок Белоярский (административный центр), села Косулино, Большебрусянское, Бруснятское, Кочневское, поселки Совхозный, Студенческий. В Белоярском городском округе проживают 34,8 тыс. жителей. В этом округе действуют 21 крупное сельскохозяйственное предприятие и 114 крестьянских и фермерских хозяйств. Основные виды продукции аграрного сектора: зерно, картофель, овощи, молоко, мясо, яйцо. Основными отраслями сельскохозяйственного производства являются растениеводство и животноводство. При этом 7 предприятий развивают как растениеводство, так и животноводство (ОАО «Косулинское», Птицефабрика «Свердловская», ОАО «Колос», ООО «Некрасово», ФГУП «Учхоз "Уралец», ЗАО АПК «Белореченский», ПК «Мезенское»). Остальные сельскохозяйственные предприятия специализируются преимущественно на растениеводстве. В структуре угодий сельскохозяйственных предприятий Белоярского городского округа пашня занимает 87,9 % от общей площади угодий района. Кормовые угодья (сенокосы и пастбища) в силу незначительного их количества составляют 12,1 %. Агропромышленное производство в районе размещения БАЭС ориентировано на снабжение продовольствием таких крупных промышленных центров, как города: Екатеринбург, Заречный, Березовский, Каменск-Уральский, Асбест, и имеет явно выраженное мясомолочное и овощное направление. Потребности населения в хлебопродуктах и животноводства в комбикормах местным производством зерновых культур удовлетворяются лишь частично.

Основными производителями сельскохозяйственной продукции в районе размещения Белоярской АЭС являются сельхозпредприятия, как правило, не имеющие собственных мощностей для переработки производимой продукции и вынужденные, поэтому, доставлять её для переработки на соответствующие предприятия городов Екатеринбурга и Асбеста. Часть сельскохозяйственной продукции производится подсобными хозяйствами промышленных предприятий, а также местным населением, однако, эта часть относительно невелика и не оказывает ощутимого влияния на рынок продовольствия.

Овощная продукция и картофель реализуются, в основном, в городах: Екатеринбурге, Березовском, Каменск-Уральске и Асбесте, а также в других промышленных центрах Свердловской области. Осуществляется вывоз излишков картофеля за пределы Свердловской области в количествах,

определяемых ежегодно, исходя из реально собранного урожая. Вывоз за пределы Свердловской области других продуктов сельскохозяйственного производства незначителен и не оказывает ощутимого влияния на рынок продовольствия.

Загрязнения атмосферы, природных и аграрных экосистем

Основными источниками загрязнения окружающей среды в рассматриваемом районе являются атмосферные выпадения, имеющие глобальный, региональный (испытания ядерного оружия, Чернобыльская авария и авария на химкомбинате Маяк) или локальный характер (Белоярская АЭС и АО «Институт реакторных материалов»), а также жидкие сбросы радиоактивных веществ Белоярской АЭС и АО «ИРМ». Наиболее значимыми радионуклидами в окружающей среде являются сравнительно долгоживущие ^{137}Cs, ^{90}Sr и изотопы плутония. Таким образом, целью радиоэкологических исследований в зоне размещения Белоярской АЭС является обеспечение достоверного определения содержания радионуклидов в объектах окружающей среды на уровне их фоновых значений. Во время выполнения исследований в зоне наблюдения был произведён отбор проб для проведения анализа концентраций техногенных и естественных радионуклидов в приземном слое атмосферы и компонентах наземных экосистем, сельскохозяйственной продукции, компонентах лесной экосистемы; содержания радионуклидов в природных водах и компонентах водных экосистем, донных отложениях, рыбе на уровне глобального фона. Радиоэкологические исследования в районе Белоярской АЭС были проведены в 2012–2013 гг. в сотрудничестве со специалистами АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина».

Радиационный фон в зоне наблюдения Белоярской АЭС

Мощность дозы гамма-излучения в ЗН контролируется ежемесячно в пунктах постоянного наблюдения. По данным Уральского УГМС, в 2007–2010 гг. (Анализ загрязнения …, 2012) значения МЭД, измеренные во время проведения маршрутных обследований в 10 пунктах 10–15 км зоны АЭС (база отдыха «Золотая рыбка», база отдыха «Ласточка», Каменка, Малые Брусяны, Мезенское, Мельзавод, Папанинцево, Режик, Становая, Учхоз), колебались в пределах 0,10–0,16 мкЗв/ч (Анализ загрязнения …, 2012).

По данным АСКРО БАЭС (Анализ загрязнения …, 2012), мощность дозы гамма-излучения в 2007–2010 гг. в СЗЗ БАЭС изменялась в диапазоне 0,08–0,12 мкЗв/ч, в ЗН – 0,11–0,12 мкЗв/ч. При регламентных маршрутных обследованиях МЭД в СЗЗ и в ЗН БАЭС составляла 0,05–0,07 мкЗв/ч. По результатам измерений мощность дозы гамма-излучения в 2011 г. в районе расположения Белоярской АЭС находится в диапазоне 0,04–0,08 мкЗв/ч (Анализ загрязнения …, 2012).

В 2011 г. АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» проведено уточнение показателей радиационной обстановки в районе расположения площадки строительства БН-800 в соответствии с требованиями санитарного законодательства. При обследовании территории, прилегающей к БАЭС БН-800, выполнена дозиметрическая гамма-съёмка. Маршрутное обследование проводилось с использованием мобильного комплекса радиационной разведки "Пионер РИ" (Проведение радиационного мониторинга …, 2012).

Фактический уровень МАЭД, обусловленный естественным гамма-фоном, представлен на рисунке 2. Поисковая автомобильная гамма-съёмка в зоне наблюдения, в г. Заречный и в его окрестностях общей площадью около 700 га выполнялась с использованием транспортного средства со средней скоростью 30 км/ч с регистрацией значений МЭД по маршруту через каждые 100 м.

Маршрут определялся в соответствии с масштабом съёмки обследуемой территории, технической возможностью и местными условиями.

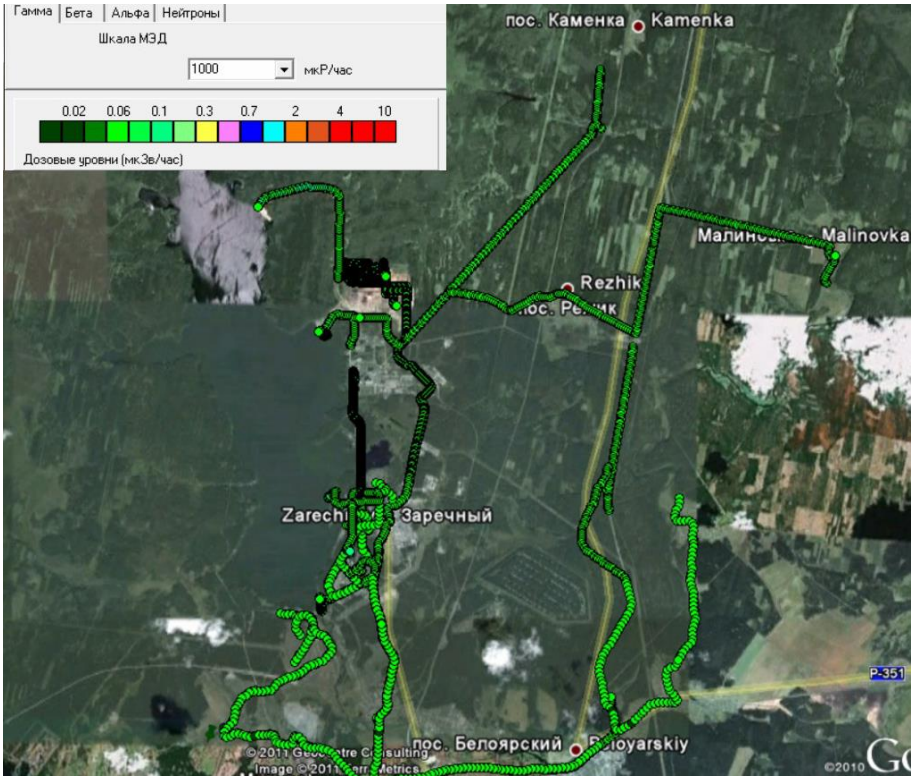


Рисунок 2. Результаты поисковой автомобильной гамма-съёмки территории, прилегающей к БАЭС, выполненной в 2011 г. АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»

На площадке предполагаемого строительства 5-го энергоблока и дороге к БАЭС и ОАО «ИРМ» проведено детальное пешеходное обследование, где среднее значение мощности дозы составляло 0,06 мкЗв/ч, минимально обнаруженное значение – 0,03 мкЗв/ч, максимально обнаруженное значение – 0,19 мкЗв/ч. Территория ближней зоны БН-800 подвергнута обследованию по прямолинейным и Z-образным маршрутам. Среднее значение МЭД составляло 0,05 мкЗв/ч, минимальное значение – 0,04 мкЗв/ч, максимальное значение – 0,16 мкЗв/ч. Дисперсия составляет $2{,}91\times10^{-4}$. Количество точек измеренных значений – 9028. Участки с превышающими значениями МАЭД не были обнаружены.

Измерения мощности дозы гамма-излучения в донных отложениях района Белоярского водохранилища, проведённые СПбО ИГЭ РАН, хорошо демонстрируют общую картину радионуклидного загрязнения. Природный гамма-фон донных отложений в верховье водохранилища фиксируется на отметке 0,09–0,11 мкЗв/ч. Вдоль береговой линии залива «Теплый» и «Худыш» отмечаются повышенные значения – до 0,22 мкЗв/ч. Максимальные значения мощности дозы гамма-излучения, превышающие фон в 50 раз, были встречены в Ольховской болотно-речной системе. Причем по мере удаления от болота по р. Ольховка мощность дозы от донных отложений растёт, а после слияния с р. Пышмой происходит её постепенное падение (рис. 3).

Для выявления и оценки опасности источников внешнего гамма-излучения выполнялась гамма-съёмка (определение мощности эквивалентной дозы внешнего гамма-излучения). Поисковая автомобильная гамма-съёмка в зоне наблюдения, в г. Заречный и в ближней зоне Белоярской АЭС, выполнялась с использованием транспортного средства со скоростью в среднем 40 км/ч с регистрацией значений МЭД по маршруту через каждые 50 м (рис. 4–7). Маршрут определялся в соответствии с масштабом съёмки обследуемой территории, технической возможностью и местными условиями.

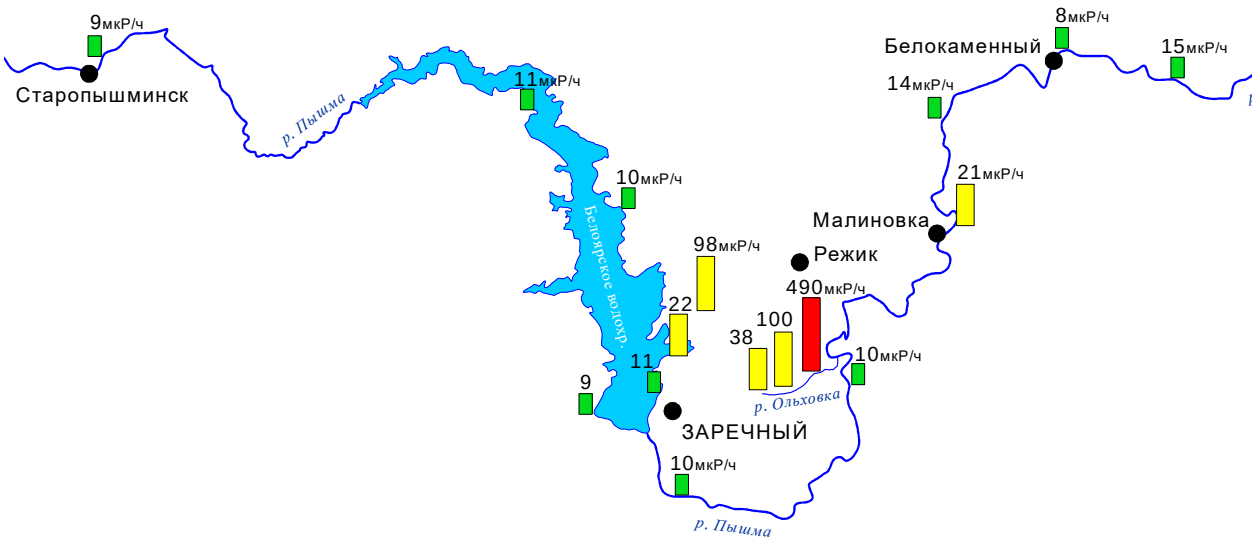


Рисунок 3. Распределение мощности дозы гамма-излучения вблизи водных объектов в пределах 30-км зоны вокруг Белоярской АЭС по данным съёмки 2012 г. (СПбО ИГЭ РАН)

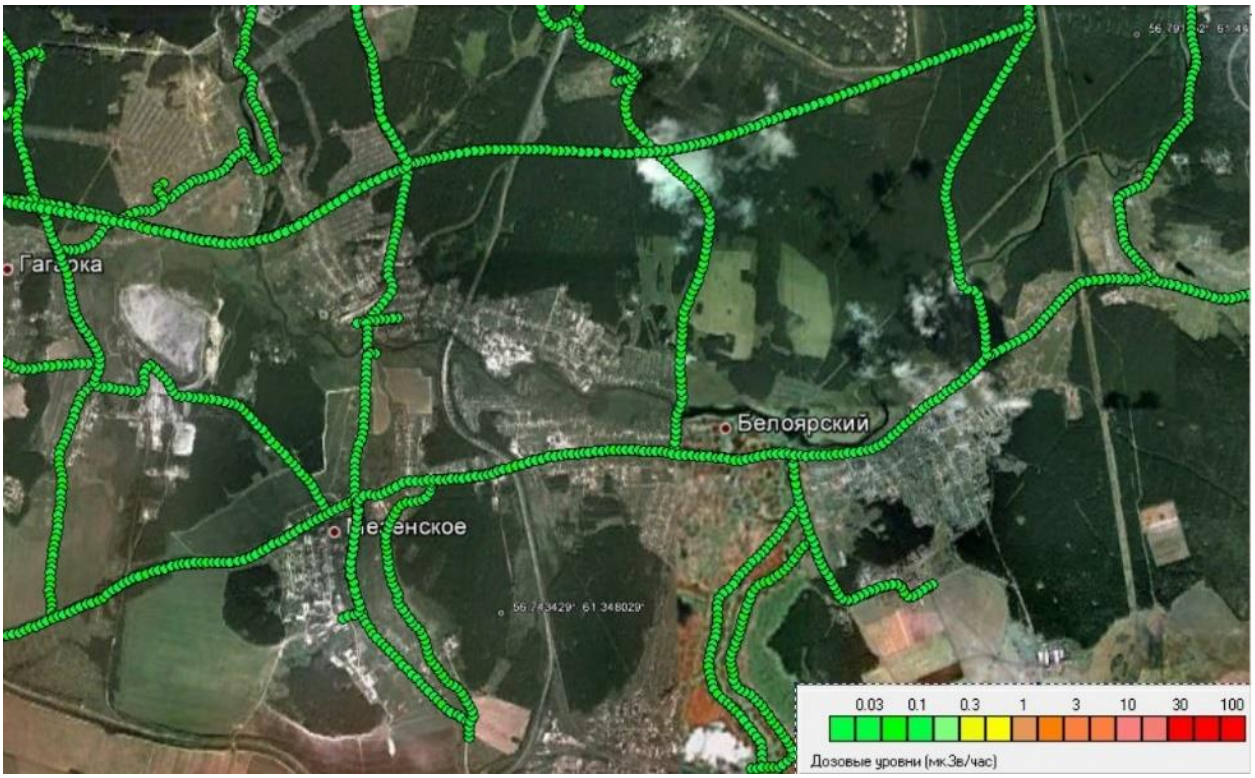


Рисунок 4. Обзорная карта района выполнения автомобильной гамма-съёмки в южной части зоны наблюдения Белоярской АЭС с нанесёнными точками измерений

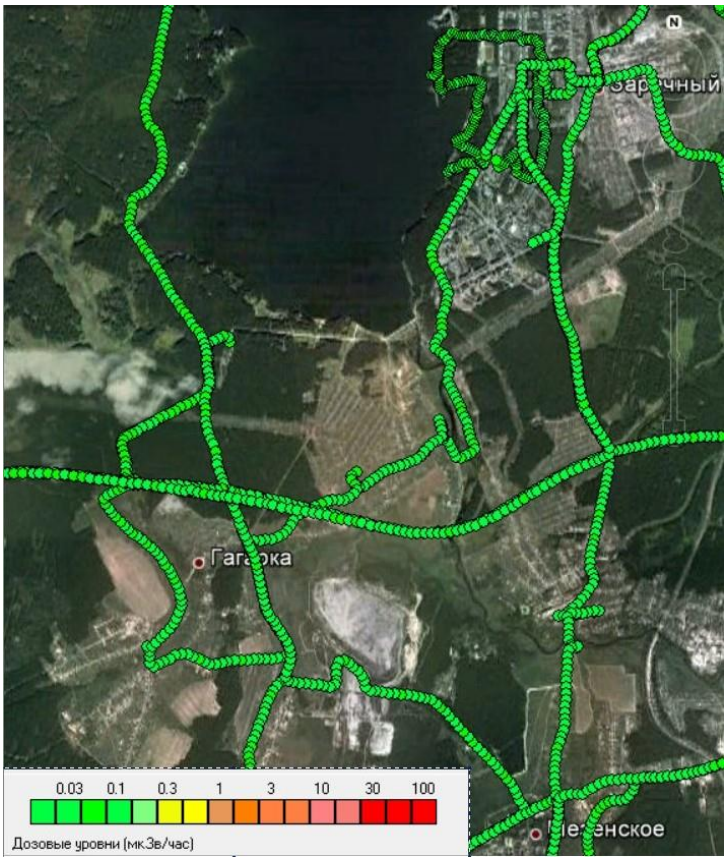


Рисунок 5. Обследование юго-западной части зоны наблюдения Белоярской АЭС

Рисунок 6. Детальное обследование участка в районе расположения реактора БН-800

Рисунок 7. Автомобильное и пешеходное обследование г. Заречный и пешеходный маршрут на Ольховском болоте

Среднее значение мощности дозы составляло 0,05 мкЗв/ч, минимально обнаруженное значение – 0,04 мкЗв/ч, максимально обнаруженное значение – 0,13 мкЗв/ч. На восточном берегу Белоярского водохранилища в районе планируемого расположения БН-1200 и на участке Ольховского болота выполнена пешеходная гамма-съёмка.

Территория была подвергнута обследованию по прямолинейным и Z-образным маршрутам. Среднее значение мощности дозы составляло 0,07 мкЗв/ч, минимально обнаруженное значение – 0,04 мкЗв/ч, максимально обнаруженное значение – 2,23 мкЗв/ч. По результатам гамма-съёмки можно сделать вывод, что мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) на участке Ольховского болота существенно выше нормативного значения (СП 2.6.1.2612-10, 2010). Количество точек измеренных значений в зоне наблюдения, в г. Заречный и в ближней зоне Белоярской АЭС составляло – 6194.

По результатам дозиметрической гамма-съёмки в санитарно-защитной и зоне наблюдения БАЭС, проведённой в 2012 г., среднее значение МАЭД составило 0,05 мкЗв/час, что соответствует результатам исследований 2007–2011 гг.

На участках пробоотбора наземных экосистем за исключением района Ольховского болота значения МАЭД колебались от 0,08 до 0,13 мкЗв/час. В районе Ольховского болота значения МАЭД находились в диапазоне 0,08–1,5 мкЗв/час. По данным АСКРО, в 2013 году среднегодовое значение МАЭД находилось на уровне 0,08–0,12 мкЗв/час.

Содержание радионуклидов в нижних слоях атмосферы

Выполнен гамма-спектрометрический анализ проб для определения радионуклидного состава и активности техногенных и природных радионуклидов в воздухе зоны наблюдения Белоярской АЭС (рис. 8).

Установлено, что объёмная активность гамма-излучающих радионуклидов в аэрозольном фильтре обусловлена в основном активностью природных радионуклидов ^{7}Be и ^{210}Pb. Показано, что объёмная активность ^{137}Cs в пробах приземного слоя атмосферы в 2013 г. в районе расположения Белоярской АЭС находилась в диапазоне 0,5–4,0 мкБк/м^3, максимальное значение (3,7±1,2) мкБк/м^3 объемной активности ^{137}Cs было зафиксировано в третьей декаде ноября 2012 г.

Выявленное максимальное значение на шесть порядков ниже допустимой объёмной активности ^{137}Cs в воздухе для населения ($ДОА_{нас.}$=27 Бк/м^3) по НРБ-99/2009.

Рисунок 8. Место расположения воздухофильтрующей установки (ВФУ) на площадке 4-го блока Белоярской АЭС

В течение первого полугодия 2013 г. среднемесячная объёмная активность ^{137}Cs в воздухе не превышала (0,7±0,3) мкБк/м^3 (на семь порядков ниже допустимой объёмной активности ^{137}Cs в воздухе для населения). Полученные результаты по содержанию радионуклидов в пробах приземного слоя атмосферы в 2013 г. находились на уровне прошлых лет и значительно ниже соответствующих допустимых нормативов, установленных НРБ-99/2009 (табл. 2).

Таблица 2

Результаты мониторинга приземного атмосферного воздуха на промплощадке Белоярской АЭС, мкБк/м^3

Радионуклид	Место отбора	Среднее значение параметра
^{137}Cs	ВФУ на стройплощадке энергоблока № 4 Белоярской АЭС (октябрь 2012 г. – июль 2013 г.)	1,03
^{90}Sr		0,08
$^{239,\,240}$Pu		0,047

Содержание радионуклидов в почвах природных экосистем

Исследование содержания природных и техногенных радионуклидов в почве наземных экосистем показали, что если их распределение по слоям почвы относительно равномерно, то для ^{137}Cs распределение по профилю почвы обусловлено процессами миграции. На склонах и в пойме рек повышенная вертикальная миграция привела к более равномерному распределению радионуклида в верхнем 20 см слое почвы. Показано также, что плотность загрязнения ^{137}Cs почвы на всех исследуемых участках наземных экосистем, за исключением одной точки на Ольховском болоте находится на уровне менее 37 кБк/м^2 и, следовательно, эти участки не относятся к радиоактивно загрязнённым (табл. 3).

Высокая плотность загрязнения на участке Ольховского болота обусловлена многолетними сбросами с Белоярской АЭС низкоактивных жидких радиоактивных отходов.

Таблица 3

Результаты мониторинга почв в районе Белоярской АЭС, кБк/м² (Бк/кг)

Радионуклид	Место отбора	Значение параметра	Среднее значение
^{137}Cs	НП Белоярский	4,99 (20,8)	6,58 (27,4)
	НП Режик	7,06 (29,4)	
	НП Изумруд	7,68 (32)	

Содержание радионуклидов в водной среде

В рамках исследований было проведено определение удельной активности радионуклидов на уровне глобального фона в компонентах водных экосистем (поверхностные и питьевые воды, рыба, донные отложения, высшая водная растительность) в зоне наблюдения Белоярской АЭС (табл. 4). В качестве примера на рисунке 9 представлены точки отбора проб в водоёмах и водотоках зоны наблюдения Белоярской АЭС.

Таблица 4

Результаты мониторинга водных экосистем в районе Белоярской АЭС

Нуклид	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Среднее	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{3}H	Поверхностная вода, Бк/м^3	3	–	–	$8{,}6\times10^3$	$3{,}8\times10^3$	$6{,}3\times10^3$	$1{,}3\times10^3$
^{90}Sr		3	–	–	3,3	2,41	1,0	5,8
^{137}Cs		3	–	2,1	5,6	3,08	2,1	8,0
^{3}H	Питьевая вода (село), Бк/м^3	3	–	–	$5{,}2\times10^3$	$0{,}6\times10^3$	$4{,}5\times10^3$	$5{,}6\times10^3$
^{90}Sr		3	–	–	0,87	0,64	0,5	1,6
^{137}Cs		3	–	–	2,6	0,31	2,3	2,9
^{3}H	Питьевая вода (город), Бк/м^3	1	–	–	$5{,}9\times10^3$	–	–	–
^{90}Sr		1	–	–	0,5	–	–	–
^{137}Cs		1	–	–	2,8	–	–	–
^{137}Cs	Донные отложения, Бк/кг	4	34,9	2,75	51,8	53,8	13,0	130,0
^{90}Sr		3	–	–	2,1	0,61	1,4	2,6
^{60}Co		1	–	–	4,4	–	–	–
^{137}Cs	Рыба, Бк/кг	4	2,1	2,69	2,75	1,7	0,5	4,2
^{90}Sr		4	0,1	4,61	0,16	0,12	0,1	0,3
^{3}H		2	–	–	8,0	–	7,9	8,1

Уровень содержания ^{90}Sr в 2013 г. находился примерно на уровне 2012 г. для питьевой воды и поверхностных вод (за исключением пробы из р. Ольховки), что подтверждает отсутствие дополнительного внешнего поступления радионуклидов в 2013 г. По результатам измерений показано, что концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде (даже для Ольховки) на 2–4 порядка ниже уровня вмешательства. Значения активности радионуклидов в воде региональных водоёмов близки к среднефоновому содержанию поверхностных вод Российской Федерации. Так в 2011 г. величина средней объёмной активности ^{90}Sr в воде рек по территории РФ составляла 4,1 Бк/м^3 (4,1 мБк/л), что на 3 порядка ниже норматива уровня вмешательства для населения (УВ = 4,9 Бк/л) по НРБ-

99/2009.

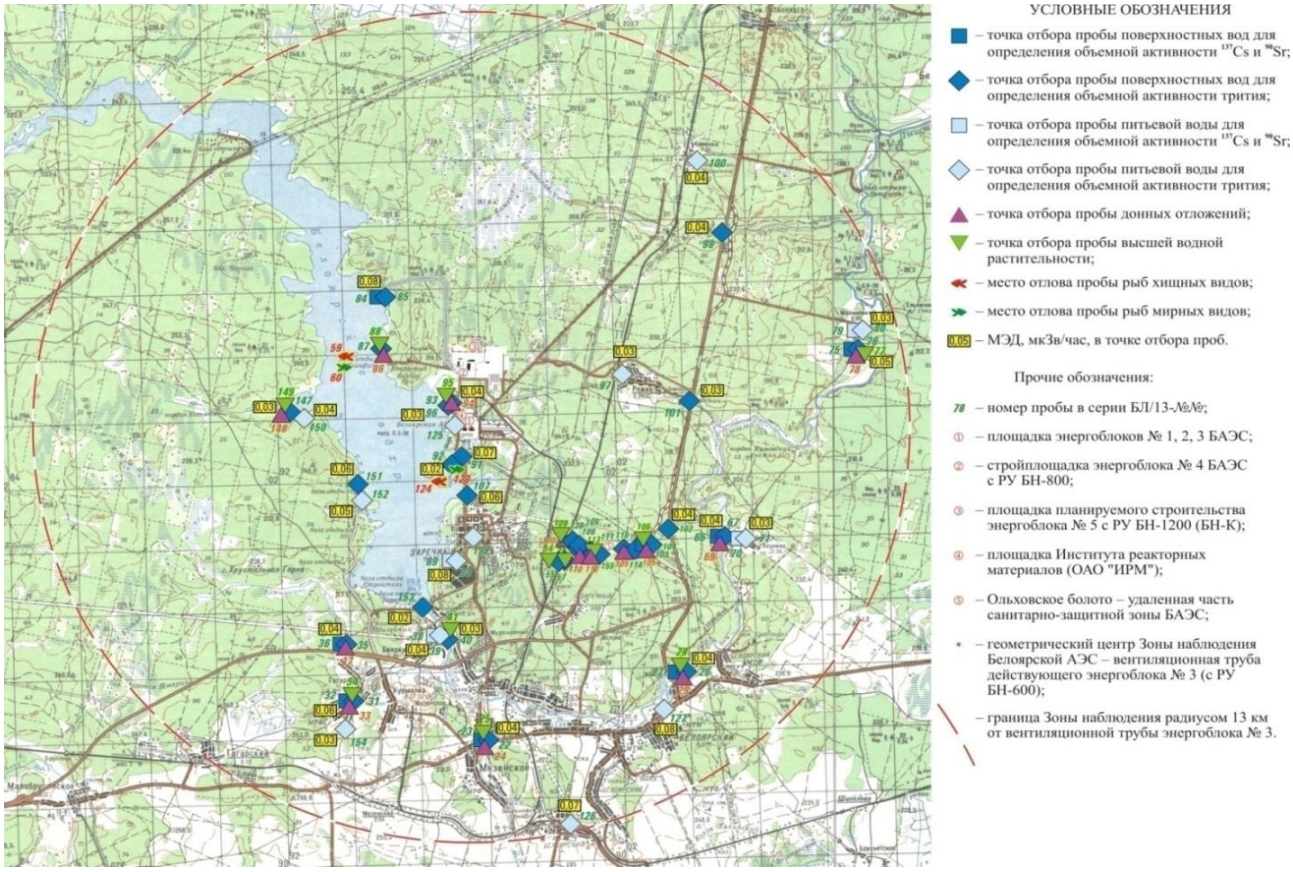


Рисунок 9. Точки отбора проб компонентов водной среды в зоне наблюдения Белоярской АЭС

Значения объёмной активности ^{3}H в водоёмах и питьевых водах в зоне наблюдения Белоярской АЭС, по данным исследований 2013 г., находились (за исключением проб Ольховского болота) в диапазоне от 3,2 до 13 Бк/л. По сравнению с предыдущими годами содержание ^{3}H в поверхностных водах находилось на том же уровне. За глобальный природный фон ^{3}H принимается величина, равная (2,2±0,7) Бк/л, за техногенный фон – 5 Бк/л (Радиационная обстановка …, 2010). Таким образом, содержание ^{3}H в поверхностных водах зоны наблюдения Белоярской АЭС (за исключением Ольховского болота) находилось в диапазоне от среднего значения содержания ^{3}H, характерного для рек России (2 Бк/л), до уровня, лишь трижды превышающего техногенный фон, при этом содержание ^{3}H на 3 порядка ниже уровня вмешательства (7600 Бк/л по НРБ-99/2009).

Удельная активность ^{137}Cs в пробах рыбы в 2013 г. варьировала от порога обнаружения до 4,2 Бк/кг и находилась на уровне 2012 г., что на несколько порядков ниже установленного норматива (СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002).

Содержание радионуклидов в Ольховском болоте

В отдельных пробах почв, отобранных вблизи водотоков Ольховского болота, фиксируются значительные уровни загрязнения техногенными радионуклидами, прежде всего, ^{137}Cs. Так, в самом верхнем слое одной пробы удельная активность ^{137}Cs троекратно, а в слое 5–15 см другой пробы почти на порядок превышает предельное значение удельной активности радионуклидов в отходах для отнесения их к радиоактивным согласно Постановлению Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069: «О критериях отнесения твёрдых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов». То

есть, в случае извлечения в этом месте грунта, его верхний слой толщиной до 25 см подлежит изоляции в приповерхностном пункте захоронения как РАО 4-го класса, в данном случае – очень низкоактивные радиоактивные отходы (ОНАО). С глубиной удельная активность радионуклидов в почве постепенно снижается. Принимая во внимание, что загрязнение почвы в Ольховском болоте вызвано не атмосферными выпадениями, а переносом радионуклидов с поверхностными и грунтовыми водами от исторического источника – канала Старого коллектора, расположенного на расстоянии нескольких сот метров от точки отбора пробы, следует полагать, что загрязнение почвы происходило в момент разлива вод в весеннее половодье и паводков. То обстоятельство, что современные воды реки Ольховки отличаются относительно низкой объёмной активностью ^{137}Cs, а почвы сохраняют в своем объёме значительные количества ^{137}Cs и заметные – ^{60}Co, свидетельствует о высокой удерживающей способности торфяных почв Ольховского болота относительно этих нуклидов. Оценка же неоднородности загрязнений почвы Ольховского болота возможна лишь при проведении дополнительных исследований с отбором большого количества разнообразных проб, которые обеспечат необходимую статистику и позволят оценить накопленные болотом "запасы" радионуклидов и перспективы их естественного переноса вниз по р. Ольховке, и далее в р. Пышму.

Содержание радионуклидов в почвах сельскохозяйственных угодий

Содержание естественных радионуклидов в почвах сельскохозяйственных угодий составляет для ^{40}K – 178–567 Бк/кг, для ^{226}Ra – 7–39 Бк/кг, для ^{232}Th – 10–37 Бк/кг сухой массы. Уровень загрязнения почвы анализируемых хозяйств ^{137}Cs составляет для ФГУП «Учхоз «Уралец» – 4–16 Бк/кг, для ЗАО АПК «Белореченский» – 10–12 Бк/кг. Результаты определения удельной активности радионуклидов в пробах почвы пастбищ позволили проанализировать вертикальную миграцию радионуклидов. Показано, что распределение ^{137}Cs по слоям почвы пастбищ носит достаточно равномерный характер. Данный факт свидетельствует о том, что в прошлом эти участки использовались под пашню и содержание в них данного радионуклида объясняется глобальными выпадениями. На основе полученных данных по содержанию природных и техногенных гамма-излучающих радионуклидов в пробах почвы сельскохозяйственных угодий были оценены плотности загрязнения исследуемых участков. Показано, что плотность загрязнения ^{137}Cs сельскохозяйственных угодий в 30-км зоне Белоярской АЭС варьирует в пределах 1–8 кБк/м^2, что более чем в 4 раза ниже по сравнению с минимально установленной границей выделения зон радиоактивного загрязнения.

Содержание радионуклидов в продукции сельского хозяйства и продуктах питания

Результаты определения удельной активности радионуклидов в пробах сельскохозяйственной продукции показали, что содержание ^{137}Cs в зерне не превышает 1,5 Бк/кг, что в 45 раз ниже установленного норматива СанПиН. Удельная активность ^{90}Sr в зерновых также была в несколько раз ниже установленного лимита. Содержание ^{137}Cs в травах находилось в пределах 0,5–9,4 Бк/кг и все пробы кормов, как и продукции растениеводства, заведомо не превышали нормативы СанПиН (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) и ВП (ВП 13.5.13/06-01, 2000) (табл. 5).

В результате измерений продуктов питания местного производства в 2013 г. показано, что удельная активность ^{40}K находилось на уровне 2012 г. и не превышала МДА для используемых средств измерений. Удельная активность ^{137}Cs в продуктах питания местного производства находилась на уровне 2012 г. (1 Бк/кг) за исключением нескольких проб природной продукции (грибов и ягод), однако и в них содержание ^{137}Cs не превышало нормативов, установленных СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) (табл. 5).

Таблица 5

Содержание радионуклидов в пищевых продуктах в зоне наблюдения Белоярской АЭС, Бк/кг(л)

Радионукл.	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Среднее	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{137}Cs	Молоко	6	0,17	1,0	0,27	0,29	0,062	0,84
^{90}Sr		6	0,14	2,1	0,18	0,14	0,06	0,44
^{3}H		2	–	–	10,4	–	9,9	11,0
^{137}Cs	Свинина	1	–	–	0,26	–	–	–
	Курятина	1	–	–	0,13	–	–	–
^{90}Sr	Свинина	1	–	–	0,18	–	–	–
	Курятина	1	–	–	0,29	–	–	–
^{137}Cs	Картофель	4	0,11	2,0	0,14	0,11	0,058	0,29
^{90}Sr		2	–	–	0,38	–	0,32	0,43
^{3}H		3	–	–	31,3	12,9	18,6	44,3
^{14}C		3	–	–	17,0	3,2	13,4	19,3
^{137}Cs	Свекла	2	–	–	0,26	–	0,11	0,42
^{90}Sr		1	–	–	0,84	–	–	–
^{137}Cs	Морковь	3	–	–	0,14	0,14	0,06	0,3
^{90}Sr		1	–	–	0,16	–	–	–
^{137}Cs	Яблоки	1	–	–	0,11	–	–	–
^{137}Cs	Ягоды	4	0,76	3,4	1,2	1,3	0,18	3,0
^{90}Sr		3	–	–	0,7	0,4	0,47	1,1
^{3}H		2	–	–	11,2	–	8,6	13,8
^{14}C		3	–	–	6,9	2,2	6,1	9,4
^{137}Cs	Грибы	3	–	–	3,2	2,2	–	–
^{90}Sr		1	–	–	2,4	–	–	–
^{3}H		1	–	–	25,9[2]	–	–	–
^{14}C		2	–	–	12,6	–	6,7	18,4[2]

Дозы облучения населения

Расчёт дозовых нагрузок на население в 30-км зоне наблюдения Белоярской АЭС, обусловленных эксплуатацией атомной станцией в номинальном режиме, выполнен на основе методических рекомендаций (МР 2.6.1.0063-12, 2013). Для расчёта использовались данные о содержании радионуклидов в различных средах. Данные получены в результате радиоэкологического обследования территории размещения Белоярской АЭС специалистами ФГБНУ ВНИИРАЭ и АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» в 2013 г. Расчёт проведён для городского и сельского населения старше 17 лет с учётом их режимов поведения и защитных свойств зданий и сооружений от внешнего γ-излучения.

При расчёте интегральных (от всех источников) дозовых нагрузок на население зоны наблюдения Белоярской АЭС от существующего радиационного фона оценивались дозы внешнего облучения за

[2] Проба отобрана на Ольховском болоте

счёт техногенных и естественных радионуклидов в поверхностном слое почвы, за счёт пребывания на пляже, купания и катания на лодке по водоёмам 30-км зоны БАЭС, а также дозы внутреннего облучения городского и сельского населения, различающихся рационом питания и источниками поступления питьевой воды. При расчёте принято, что доля местных продуктов в годовом рационе составляет 100 %.

Для оценки внешнего облучения за счёт купания и катания на лодке, от донных отложений и от пребывания на пляже использовались данные об удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностной воде водоёмов 30-км зоны БАЭС. Для оценки внешнего облучения от поверхности земли для расчёта использованы значения плотности поверхностного загрязнения почвы, полученные по результатам радиационного обследования.

Для оценок дозы внутреннего облучения за счёт потребления продуктов питания использованы значения усредненного по Свердловской области годового потребления основных пищевых продуктов городских и сельских жителей за 2018 г. (Потребление …, 2020). При оценке дозы от потребления питьевой воды городским жителем использовались известные данные о содержании радионуклидов в водопроводной воде. При оценке дозы от потребления питьевой воды сельскими жителями использовались известные удельные активности радионуклидов в водах из колодцев и скважин с питьевой водой.

Дозы внутреннего облучения оценивались за счёт ингаляции радионуклидов из приземного слоя воздуха, потребления сельскохозяйственных продуктов местного производства, питьевой воды, рыбы. Доза внутреннего облучения населения обусловлена в основном потреблением продуктов питания и питьевой воды.

Наибольшие дозы внутреннего облучения за счёт ингаляции техногенных радионуклидов из приземного слоя воздуха приходятся на сельское население и составляют 0,13 мкЗв/год, для городского населения – 0,11 мкЗв/год.

Дозы внутреннего облучения городского населения за счёт потребления продуктов питания и воды составляют 22 мкЗв/год без учёта естественных радионуклидов. Доза внутреннего облучения сельского населения за счёт потребления продуктов питания только от техногенных радионуклидов равна 24 мкЗв/год.

Наибольшие дозы внутреннего облучения связаны с потреблением продуктов растительного происхождения, основным вкладчиком в дозу в данном случае является ^{40}K. Исключая естественные радионуклиды из оценки, основными вкладчиками в дозу становятся ^{14}C (38 %) и ^{90}Sr (39 %).

Доза внешнего облучения населения района расположения Белоярской АЭС в течение года на открытой местности формируется за счёт техногенных радионуклидов и составляет для городского населения около 0,09 мЗв/год, для сельского – около 0,13 мЗв/год. Полученные значения обусловлены в основном облучением от поверхности земли.

Основная часть облучения человека приходится на естественные источники радиации: космическое излучение и естественные радионуклиды, содержащиеся в окружающей среде. Вклад космического излучения и космогенных радионуклидов в суммарную годовую дозу от ЕРФ на территории составляет 19 % и достигает 0,46 мЗв/год (Крышев, Рязанцев, 2010).

Доза внутреннего облучения от естественных радионуклидов в основном формируется за счёт ингаляционного пути поступления радионуклидов. Преимущественный вклад вносит непосредственно продукт распада ^{226}Ra – радон (^{222}Rn). Вычисления, проведённые на основе (Спиридонов и др., 2015), показали, что средняя доза внутреннего облучения за счёт ингаляции радона составила 0,83 мЗв/год.

Вклад других естественных радионуклидов в дозу внутреннего облучения по ингаляционному пути незначителен. Доза от естественных радионуклидов согласно данным мониторинга составила 0,17 мкЗв/год и 0,20 мкЗв/год для городского и сельского населения соответственно.

Доза внутреннего облучения за счёт потребления продуктов питания от естественных радионуклидов формируется преимущественно ^{40}K, значения дозы для городского и

сельского населения составляют 0,39 и 0,42 мЗв/год соответственно.

Доза внешнего облучения от естественных радионуклидов составила 0,24 мЗв/год для городского населения и 0,36 мЗв/год – для сельского населения.

Суммарная годовая доза от естественного радиационного фона для городского населения составила 1,9 мЗв/год, а для сельского – 2,1 мЗв/год.

Суммарная доза от внутреннего и внешнего облучения населения, проживающего в районе расположения Белоярской АЭС, за счёт радионуклидов техногенного происхождения значительно ниже установленного НРБ-99/2009 дозового предела облучения населения 1 мЗв/год, и составляет: 0,13 мЗв/год – для сельского населения и 0,09 мЗв/год – для городского. С учётом облучения от естественного радиационного фона значение среднегодовой эффективной дозы составляет 2,23 мЗв/год для сельского населения и 1,99 мЗв/год – для городского населения.

Оценка суммарных доз облучения населения от атмосферных выбросов Белоярской АЭС и Института реакторных материалов

Газоаэрозольные радиоактивные выбросы в атмосферу на БАЭС осуществляются через вентиляционные трубы высотой 100 метров. Выброс радиоактивных веществ в атмосферу на ИРМ проводится через трубу высотой 40 метров.

Величины активностей инертных радиоактивных газов были рассчитаны исходя из относительного содержания (в %) данных радионуклидов в проектном выбросе реактора БН-800 (Белоярская АЭС, 2012). Для выполнения вычислений были усреднены имеющиеся данные по атмосферным выбросам Белоярской АЭС и ИРМ. Для сопоставления рассматриваемых объектов (Белоярской АЭС и ИРМ) было принято, что выбросы происходили с момента начала работы предприятий, т. е. в течение ~50 лет.

Прогнозирование процессов переноса радионуклидов и оценка доз облучения населения в районе расположения предприятий осуществлялись в точке, где человек может получить максимальную годовую дозу, с учётом направления преобладающего переноса газоаэрозольных выбросов. Оценка проводилась с использованием программного пакета CROM (Suáñez, Robles, 1998).

Доза облучения населения от атмосферных выбросов Белоярской АЭС

Результаты расчётов показали, что эффективная годовая доза облучения населения от выбросов Белоярской АЭС без учёта трития образована преимущественно за счёт потребления продуктов питания (85 %) и составляет 0,59 мкЗв/год. Доза внешнего облучения населения составляет 0,1 мкЗв/год. Вклад ^{41}Ar в дозу облучения от облака составляет 85 %, доза от отложений на почве образована за счет ^{137}Cs (91 %). Значимый вклад в дозу внутреннего облучения без учета ^{3}H вносит доза от потребления продуктов питания, основной вклад в которую происходит за счет ^{137}Cs (50 %) и ^{90}Sr (40 %).

Дозовая нагрузка от трития была рассчитана согласно приложению III документа МАГАТЭ SRS № 19 (IAEA, 2001). Предполагается, что доза от трития сформирована от выброса трития в окружающую среду и его последующего поступления в организм человека через кожу и посредством ингаляции, а также при условии, что тритий, находясь в водяном паре, включается в формирование дождя, тем самым поступая в продукты питания и питьевую воду, которые в свою очередь потребляются населением. Суммарная годовая доза от ^{3}H составляет 15 мкЗв/год, что составляет 95 % от суммарной дозы. Таким образом, с учётом трития вклад в суммарную дозу от выбросов Белоярской АЭС от внутреннего облучения составляет 99 %, а от внешнего – 1 %.

Доза облучения населения от выбросов Института реакторных материалов

Результаты расчётов показали, что эффективная годовая доза облучения населения от выбросов ИРМ образована преимущественно за счёт радионуклидов, содержащихся в приземном слое воздуха, и составляет 109 мкЗв/год. Основной дозообразующий радионуклид – ^{41}Ar, его вклад в дозу

внешнего облучения составляет 85 %, а вклад в суммарную годовую дозу достигает 48 %. Доза внутреннего облучения формируется за счёт ^{137}Cs (71 %) и ^{60}Co (26 %) без учета ^{3}H и ^{14}C.

Доза внутреннего облучения населения за счёт ингаляции, исключая ^{3}H и ^{14}C, составляет 0,015 мкЗв/год. Доза сформирована содержанием ^{60}Co (66 %) и ^{239}Pu (21 %) и ^{137}Cs (9 %) в воздухе. Доза внутреннего облучения населения ввиду поступления радионуклидов с местными продуктами питания составляет 35 мкЗв/год. Критическим продуктом для взрослого населения является мясо, критический радионуклид – ^{137}Cs. Суммарная годовая доза от ^{3}H составляет 0,048 нЗв/год.

Вычисления показали, что годовая доза от ^{14}C составляет 0,012 мЗв/год. Доля ^{14}C в суммарной дозовой нагрузке составляет 11 %. Таким образом, с учётом ^{14}C и ^{3}H вклад в суммарную дозу от выбросов ИРМ от внутреннего облучения составляет 43 %, а от внешнего – 57 %.

Вклад радиационно-опасных объектов в эффективную годовую дозу облучения населения

Анализ дозовых нагрузок, полученных от атмосферных выбросов предприятий, позволяет сделать вывод о том, что Белоярская АЭС не является основным дозообразующим радиационно-опасным объектом в регионе. Максимальный вклад в годовую эффективную дозу у населения вносит Институт реакторных материалов. Суммарная эффективная годовая доза жителей от всех предприятий составляет 124 мкЗв/год. Основные дозообразующие радионуклиды: ^{41}Ar (42 %) ^{137}Cs (23 %), ^{60}Co (13 %), ^{3}H (12 %) и ^{14}C (10 %). Вклад естественного радиационного фона в общую дозу, получаемую населением, составляет 94 %, вклад ИРМ – 5 %, и 1 % от суммарной дозы приходится на Белоярскоую АЭС.

С учётом функционирования рассматриваемых радиационно-опасных объектов суммарная годовая доза составляет 0,1 % от предела годовой эффективной дозы 1 мЗв/год (НРБ-99/2009) и 0,06 % от дозы, получаемой населением от естественного радиационного фона. Суммарная дозовая нагрузка на население от Белоярской АЭС превышает нижнюю границу дозы облучения человека от отдельного радиационного фактора в режиме нормальной эксплуатации атомной станции, равную 10 мкЗв в год, но находится в пределах значения квоты на облучение населения от выбросов, равной 50 мкЗв в год для газоаэрозольных выбросов новых объектов. Дозовая нагрузка от ИРМ также превышает минимально значимую дозу, но находится в пределах допустимых значений квоты от выбросов в атмосферу, которая для действующих предприятий составляет 200 мкЗв в год.

Заключение

Полученные данные позволяют сделать вывод, что Белоярская АЭС не оказывает значимого влияния на радиационную обстановку и дополнительное облучение населения в 30-км зоне влияния. Повышенное содержание техногенных радионуклидов отмечено только на территории Ольховского болота в компонентах природных экосистем в пределах санитарно-защитной зоны атомной станции.

Литература

Анализ загрязнения грунтовых вод в районе расположения площадки БН-800 по химическим веществам и радионуклидам, предварительный прогноз миграции радионуклидов в подземных и поверхностных водах при аварии на энергоблоке, прогноз изменения гидрогеологических условий площадки: Технический отчёт. Этап 2, Том 2. СПбО ИГЭ РАН, 2012.

Белоярская АЭС. Энергоблок № 4. Оценка воздействия на окружающую среду. Том 1. Книга 1, 2. БЛ.4-0-0-ОВОС-001/1, БЛ.4-0-0-ОВОС-001/2. ОАО "СПбАЭП", 2012.

ВП 13.5.13/06-01. Государственная система ветеринарного нормирования Российской Федерации. Радиационная безопасность. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}SR и ^{137}Cs: ветеринарные правила и нормы (утв. Министром сельского хозяйства России 19.12.2000).

Годовой отчёт по экологической безопасности Белоярской АЭС за 2016 год (подгот.

Смышляева О.Ю.; фотоматериалы: Гурина Т.П., Тен С.А., Винце Б.). Заречный: Филиал АО Концерн Росэнергоатом, Белоярская атомная станция, 2017. 40 с.

Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России: монография; 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИздаАТ, 2010. 496 с.

МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с.

Потребление основных продуктов питания в домашних хозяйствах Свердловской области в 2018 году. Пресс-выпуск Свердловскстат. 05.02.2020. URL: http://sverdl.gks.ru (дата обращения 15.06.2020).

Проведение радиационного мониторинга (на уровне глобального фона) воздуха, поверхностных почв, природных вод, компонентов водных экосистем до ввода в эксплуатацию энергоблока БН-800 на БАЭС. Оценка дозовой нагрузки на население от техногенного фона в зоне наблюдения. Проведение экологических исследований (включая радиационные) сельскохозяйственных почв и сельхозпродукции местного производства в зоне наблюдения: отчёт ФГУП "НПО "Радиевый институт им. В.Г. Хлопина", 2012.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2009 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2010. 316 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2011. 282 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году: ежегодник. Обнинск: НПО «Тайфун», 2014. 357 с.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) (утв постановлением Главного государственного санитарного врача РФ Г.Г. Онищенко от 28.04.2003 г. № 69). М., 2003. 36 с.

СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (утв. и введ. в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 № 47): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) (с изменениями на 16 сентября 2013 года) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ Г.Г. Онищенко от 26.04.2010 г. № 40). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. С 83.

Спиридонов С.И., Алексахин Р.М., Спирин Е.В. Интегральные показатели радиационного воздействия объектов открытого и замкнутого топливного цикла на население // Атомная энергия. 2015. Т. 118. Вып. 1. С. 47–54.

IAEA (2001). Safety Reports Series No.19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Vienna: IAEA, 2001. 229 p.

Suáñez A., Robles B. Código CROM V. 1.0, Código de Criba para la Evaluación de Impacto. Guía del Usuario, CIEMAT/DIAE/PIRA/21/98 (1998) (Перевод с испанского языка с разрешением авторов. Международный курс МАГАТЭ, Октябрь 2011).

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ КУРСКОЙ АЭС

Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Андреева Н.В., Нуштаева В.Э., Панов А.В., Санжаров А.И, Гешель И.В., Сидорова Е.В., Курбаков Д.Н., Новикова Н.В., Саруханов А.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии

Представлены результаты радиоэкологического мониторинга района расположения Курской АЭС. Показано, что мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на местности варьируют в пределах фоновых показателей – от 0,09 до 0,17 мкЗв/ч. Загрязнение почвы и урожая сельскохозяйственных культур определяется преимущественно ^{40}K, ^{137}Cs и ^{90}Sr. Ожидаемая годовая эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная поступлением в организм ^{137}Cs и ^{90}Sr с местными продуктами питания, составляет 2,5 и 5,0 мкЗв соответственно. На основания данных радиоэкологического мониторинга, проводимого в течение 17 лет, сделан вывод, что радиационная обстановка в зоне расположения Курской АЭС является стабильной и существенно не изменяется, а радиационный фактор не является ведущим фактором вредного воздействия на наземные экосистемы и здоровье населения.

Курская АЭС, радиоэкологический мониторинг ^{131}I, ^{40}K, ^{137}Cs, ^{90}Sr, природные радионуклиды, воздействие на окружающую среду, продукты питания

Характеристики Курской АЭС как источника воздействия на окружающую среду

Курская АЭС (КуАЭС) является крупнейшей в Центральном Черноземье компанией по производству электроэнергии, обеспечивающей около 90 % промышленного энергопотребления Курской области (рис. 1).

Особенностью Курской АЭС является то, что она являлась одной из первых АЭС с типом реактора РБМК-1000. В состав АЭС входят четыре энергоблока типа РБМК-1000; годы пуска: 1976, 1979, 1983 и 1985, общей мощностью 4 ГВт. В настоящее время рядом с основной площадкой станции идёт строительство Курской АЭС-2 с двумя энергоблоками нового типа ВВЭР-ТОИ (Аксенов, Котельникова, 2012). Ввод в эксплуатацию двух первых энергоблоков АЭС-2 планируется синхронизировать с выводом из эксплуатации энергоблоков № 1 и № 2 действующей АЭС-1.

Рисунок 1. Общая панорама Курской АЭС

Разные стадии строительства и функционирования АЭС определяют не только различные масштабы воздействия, но и отличаются по действующим факторам, которые можно разделить на две группы: факторы нерадиационной природы и радиационные факторы. К нерадиационным факторам воздействия относятся: использование водных ресурсов; подогрев воды и загрязнение водоёма-охладителя химическими веществами и т.п. К радиационным факторам относятся: загрязнение сельскохозяйственных угодий, посевов и источников водоснабжения радиоактивными выбросами и сбросами АЭС; радиационное воздействие на сельскохозяйственные растения и животных.

В период строительства основными являются нерадиационные факторы – отчуждение сельскохозяйственных угодий и лесных массивов под площадку АЭС и т.п. При работе АЭС в штатном режиме влияние оказывают как радиационные факторы, так и нерадиационные, включая химические вещества. При этом происходит поступление в окружающую среду некоторого строго контролируемого количества радионуклидов, которые включаются в пищевые цепочки миграции и формируют дополнительное к естественному фону облучение живых организмов, в том числе человека (Санжарова и др., 2019; СП 151.13330.2012, 2013).

Курская АЭС осуществляет выброс 47 различных химических веществ, основными источниками которых являются очистные сооружения промплощадки и котельные. Однако суммарный валовой выброс вредных химических веществ в атмосферу составил в 2018 г. 14 % от установленных нормативов ПДВ (Доклад …, 2019).

Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды на территории Курской области осуществляются региональной радиометрической сетью Росгидромета, а радиационная обстановка на Курской АЭС и в регионе её расположения контролируется автоматизированной системой контроля радиационной обстановки (АСКРО) и службой внешнего радиационного контроля Курской АЭС.

В 2018 году в 100-километровой зоне Курской АЭС случаев высокого и экстремально высокого загрязнения, а также превышения норм СанПиН (СанПин 2.6.1.2523-09, 2009) не зарегистрировано (Доклад …, 2019; О состоянии …, 2020).

В месячных пробах аэрозольных выпадений в районе г. Курчатова фиксируются как природные элементы (^{7}Be, ^{40}K, ^{22}Na, ^{210}Pb, ^{232}Th, ^{226}Ra), так и техногенные радионуклиды: ^{51}Cr, $^{58–60}$Co, ^{59}Fe, ^{65}Zn, ^{95}Zr, ^{95}Nb, ^{137}Cs (Доклад …, 2019). Вместе с тем максимально наблюдаемые в отдельные периоды времени значения среднегодовой объёмной активности долгоживущего ^{137}Cs в приземном слое атмосферы г. Курчатова до $25–31\times10^{-7}$ Бк/м^3 и среднемесячных значений до $8{,}4\times10^{-6}$ Бк/м^3 на шесть-семь порядков ниже допустимой объёмной активности ^{137}Cs в воздухе для населения по НРБ-99/2009 (Доклад …, 2019; Отчёт …, 2019). По другим радионуклидам максимальные значения радионуклидов ниже предельно допустимых на 4–9 порядков, а среднегодовые – на 5–8 порядков.

Вместе с тем оценка экологической обстановки и состояние почвенного плодородия сельскохозяйственных земель в районах расположения радиационно-опасных объектов не могут быть решены только применением методов дистанционного мониторинга и требуют наземного обследования, что в целом обеспечивает объективную оценку радиационной и токсико-экологической ситуации, выявление тенденций в её изменении и прогноз, на основании которого принимаются решения по оздоровлению экологической обстановки в сфере сельскохозяйственного производства.

Курская АЭС расположена в зоне интенсивного ведения агропромышленного производства. Сельскохозяйственные угодья занимают около 90 % сухопутной части 30-км зоны вокруг АЭС (Кузнецов и др., 2015). При этом среднее значение плотности загрязнения почв Курской области ^{137}Cs за последние пять лет составило 4,9 кБк/м^2, максимальное – 99,0 кБк/м^2 и в значительной степени обусловлено выпадениями в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. (Данные по радиоактивному загрязнению …, 2019).

Поскольку продукты питания местного производства являются существенной составляющей пищевой корзины жителей

региона АЭС, проведение постоянного наблюдения за состоянием агроэкосистем в зоне влияния станции является неотъемлемой частью системы её радиационной безопасности.

Природно-климатическая характеристика района расположения Курской АЭС

Почвенно-климатические характеристики

Курская АЭС расположена в Центрально-Чернозёмной зоне, которая характеризуется большим разнообразием природных комплексов. В ландшафтной структуре региона по гидротермическим характеристикам выделяются зональные (лесостепной, степной) и интразональные типы ландшафтов (луговой, болотный, речной, озёрный) (рис. 2). Для территории Курской области характерны умеренно-континентальные суббореальные равнинные ландшафты с тремя ярусами рельефа: возвышенности, низменности и низины.

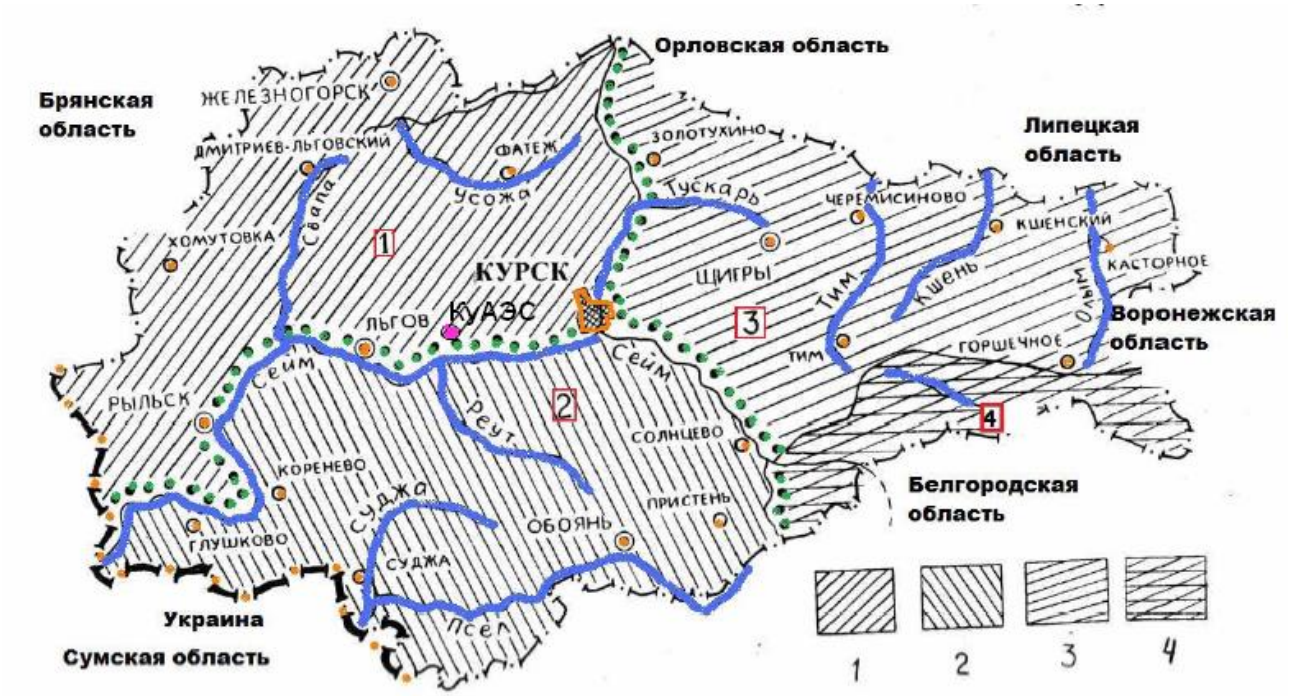


Рисунок 2. Ландшафты Курской области (границы природных районов) (Чертков, Апанасёнок, 2007):
1 – **северо-западный природный район:** *Правобережный Сеймско-Рыльский, Клевенско-Обестинский, Севско-Клевенско-Свапский, Харасейско-Свапский, Осмонь-Черньский, Левобережно-Верхнесвапский, Ваблинско-Рудский, Правобережный Сеймско-Тускарьский, Свапско-Усожский долинный;*
2 – **юго-западный природный район:** *Крепненско-Суджанский, Млодать-Полненский,Запселецкий, Правобережный Псёльско-Рыбинский, Правобережный Псёльско-Олешнянский, Илёкско-Пенский, Солотинский, Долинно-Верхнесеймский, Долинно-Среднесеймский, Долинно-Псёльско-Суджанский;*
3 – **восточный природный район:** *Полево-Сновский, Теребужско-Косоржанский, Ратско-Щигровский, Лещинский, Тимско-Расховецкий, Кшенско-Олымский, Ведугский, Тимско-Олымский, Тускарь-Сновский долинный;*
4 – **юго-восточный природный район:** *Сеймицкий, Оскольский, Ублинский*

На территории Курской области заметно выражены различия физико-географических характеристик, в соответствии с которыми можно выделить две природные зоны: западная охватывает центральную часть лесостепи (1 и 2 физико-географические районы (ФГР), восточная – лесостепная, со значительным преобладанием степи над лесом (3 и 4 ФГР) (рис. 2) (Чертков, Апанасёнок, 2007).

В основе выделения типа ландшафта лежат почвенно-биоклиматические особенности на уровне типов почв и растительных формаций (Чертков, Апанасёнок, 2007). По комплексу природных факторов (рельеф, климат, растительность, почвенный покров) область подразделяется на две природно-сельскохозяйственные подзоны: северо-западную и юго-восточную (Николаев, 1979). В северо-западной подзоне преобладают серые лесные почвы (тёмно-серые, серые, светло-серые и другие), в юго-восточной – различные чернозёмы (выщелоченные, слабовыщелоченные, типичные, оподзоленные и прочие). Ими занято около 2/3 территории. В общий массив чернозёмных и серых лесных почв пятнами вкраплены песчаные, лугово-чернозёмные, болотные и некоторые другие типы почв. По механическому составу чернозёмы относятся к тяжелосуглинистым или глинистым, а серые почвы – к легкосуглинистым и среднесуглинистым.

30-км зона Курской АЭС располагается на территории 1 и 2 физико-географических районов Курской области. Основными природными комплексами являются среднерасчлененные (густота долинно-балочной сети 1,2–1,6 км/км^2) возвышенные и относительно пониженные пологоувалистые равнины с преобладанием чернозёмных или тёмно-серых и серых лесных почв и культурной растительности (Кузнецов и др., 2015).

Природные комплексы долинно-балочных систем представлены надпойменно-террасовыми комплексами с чернозёмными и серыми лесными почвами и преобладанием культурной растительности.

Растительный и животный мир

Характерной зональной растительностью Курской области являются чередующиеся дубравные леса и луговые степи. В настоящее время большая часть земель распахана и занята культурной растительностью. Доля лесов в районе расположения Курской АЭС составляет около 10 % (Кузнецов и др., 2015; Чертков, Апанасёнок, 2007). Основным типом лесов области являются дубравы. На их долю приходится 60 % всех лесных насаждений. Дубовые леса покрывают отдельными массивами водоразделы (водораздельные дубравы), крутые берега речных долин (нагорные дубравы), поймы (пойменные дубравы), балки и овраги (байрачные леса) (Кузнецов и др., 2015; Чертков, Апанасёнок, 2007). В перечне особо охраняемых территорий в 30-км зоне размещения Курской АЭС-2 находится памятник природы «Участок дубового леса».

Луга пойменные и низинно-водораздельные в виде сенокосов и пастбищ занимают 17,5 % территории. Видовой состав лугов зависит от рельефа поймы, гидрологического режима реки, климатических условий и других факторов. Наиболее ценные – пойменные костровые луга, в составе которых костер безостый (*Bromopsisinermis*), мятлик узколистный (*Poaangustifolia)*, овсяница луговая (*Festucapratensis)*, пырей ползучий (*Elytrigiarepens*) и др. (Полуянов, 2005).

Животный мир области очень разнообразен и включает более 300 видов позвоночных и несколько десятков тысяч беспозвоночных животных. В настоящее время в 30-км зоне района расположения Курской АЭС обитает 56 видов млекопитающих, половина из которых относится к промысловым (Рыжков и др., 2009). Местами постоянного нахождения различных видов промысловых зверей, наиболее ценных в Курской области, являются лесные и водно-болотные угодья. Кроме того, здесь много животных (лисица, заяц-русак, летучая мышь), которые приспособлены к жизни в лесах и в открытых ландшафтах.

Сельское хозяйство

Сельскохозяйственное производство – одно из основополагающих в структуре отраслей экономики Курчатовского района. Сельское хозяйство является многоотраслевым, в котором сочетается интенсивное развитие земледелия с продуктивным животноводством.

Всеми видами сельскохозяйственных угодий занято до 90 % сухопутной части 30-км зоны Курской АЭС. В связи с этим контроль радиационной обстановки на сельскохозяйственных территориях является одним из важных элементов обеспечения экологической безопасности региона АЭС. Наиболее реально воздействие выбросов и сбросов

Курской АЭС-2 на аграрные экосистемы может проявляться в 15-км зоне, где расположено 3 сельскохозяйственных предприятия, административно относящихся к Курчатовскому району Курской области: филиал «Курчатовский свекловод» ООО «Курск-Агро», ООО «АПК Курской АЭС» и ООО «Дружное».

Рисунок 3. Схема размещения сельскохозяйственных предприятий в 15-км зоне Курской АЭС

Одним из факторов, определяющих миграционную подвижность радионуклидов и химических токсикантов в аграрных экосистемах, являются свойства почв. Почвенный покров сельскохозяйственных угодий в 15-км зоне Курской АЭС-2 относится к двум почвенным зонам: зоне серых лесных почв и чернозёмной зоне (табл. 1).

В почвенном покрове преобладают выщелоченные и типичные чернозёмы, занимающие до 70–80 % сельхозугодий. В ООО «Дружное» на долю чернозёмных почв приходится до 73,4 %, а в филиале «Курчатовский свекловод» ООО «Курск-Агро» – 83,3 %. Территория ООО «АПК Курской АЭС» относится к зоне серых лесных почв, доля которых составляет более 90 %. В структуре землепользования сельскохозяйственных предприятий преобладают пахотные земли – 72,3 %.

Продукция растениеводства и животноводства является одним из основных компонентов рациона населения, определяющим дозу внутреннего облучения. На территории землепользования всех хозяйств возделываются зерновые колосовые (яровая и озимая пшеница, рожь, овёс, ячмень), пропашные (картофель, кукуруза, свекла сахарная и кормовая), многолетние и однолетние травы.

Средняя урожайность зерновых культур в хозяйствах 15-км зоны КуАЭС составляла в 2018 г. 29–43 ц/га. Животноводческая отрасль наиболее развита в филиале «Курчатовский свекловод» ООО «Курск-Агро» и ООО «АПК КАЭС». В 2018 г. в обоих хозяйствах произведено 33947 ц молока, 1625 ц свинины и 2351 ц говядины.

Таблица 1

Структура почвенного покрова пахотных и кормовых угодий в 15-км зоне Курской АЭС, % от площади сельскохозяйственных угодий

Тип (подтип) почвы	Хозяйства		
	ООО «Курск-Агро»	ООО «КАЭС»	ООО «Дружное»
Светло-серая лесная	–	7,4	–
Серая лесная	–	43,2	1,8
Тёмно-серая лесная	6,9	41,1	6,9
Оподзоленный чернозём	1,5	0,6	1,3
Выщелоченный чернозём	31,0	–	45,5
Типичный чернозём	51,0	–	23,5
Карбонатный чернозём	–	–	3,1
Пойменные луговые	3,8	2,0	–
Пойменные болотные	1,3	0,7	–
Иловато-перегнойные	–	–	1,4
Лугово-болотные и луговые оглеенные	0,6	1,0	9,0
Болотные	–	0,5	2,6
Аллювиально-делювиальные днища балок	1,0	1,0	0,8
Пески	–	–	0,5
Почвы на балочных склонах	2,9	2,5	3,6

Мониторинг содержания радионуклидов в природных объектах

Радиационная обстановка в регионах Российской Федерации, в том числе и Курской области, обуславливается радиоактивными выпадениями после испытаний атомного оружия, радиационных аварий на предприятиях ЯТЦ, а также строго контролируемыми аэрозольными выпадениями в результате работы атомных станций. На территории Курской области насчитывается 147 радиационно-опасных объектов, использующих в своей деятельности источники ионизирующего излучения. К объектам I категории (по ОСПОРБ-99/2010) относится Курская АЭС, а остальные 146 – к IV категории, в основном это учреждения лечебно-профилактического профиля (Аксенов, Котельникова, 2012).

Оценка радиоэкологической обстановки в районе размещения Курской АЭС проводилась на основе данных радиоэкологического мониторинга (Санжарова и др., 2010). В соответствии с п. 7.4.1.2 СП 151.13330.2012 радиационно-экологический мониторинг в рамках инженерно-экологических изысканий на стадии разработки проектной документации проводится в пределах выбранной площадки размещения АЭС и в зоне наблюдения радиусом 30 км (СП 151.13330.2012, 2013).

Основными элементами системы радиоэкологического мониторинга является сеть контрольных участков на сельскохозяйственных угодьях, прилегающих к району размещения Курской АЭС (рис. 4).

Организация сети мониторинга была проведена в 2003 г. на основе методических указаний «Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов» (МУ-13.5.13-00, 2000).

Площадь пашни, где были заложены контрольные участки КУ-1-КУ-10, варьировала от 100 до 250 га, а участок для выпаса сельскохозяйственных животных на пастбище (КУ-11) включал 578 га. Первоначально обследуемая площадь каждой постоянной пробной площади составляла 20 га (МУ-13.5.13-00, 2000; Санжарова и др., 2010). Для дальнейшего постоянного наблюдения выбирался наиболее представительный участок размером 50×50 м.

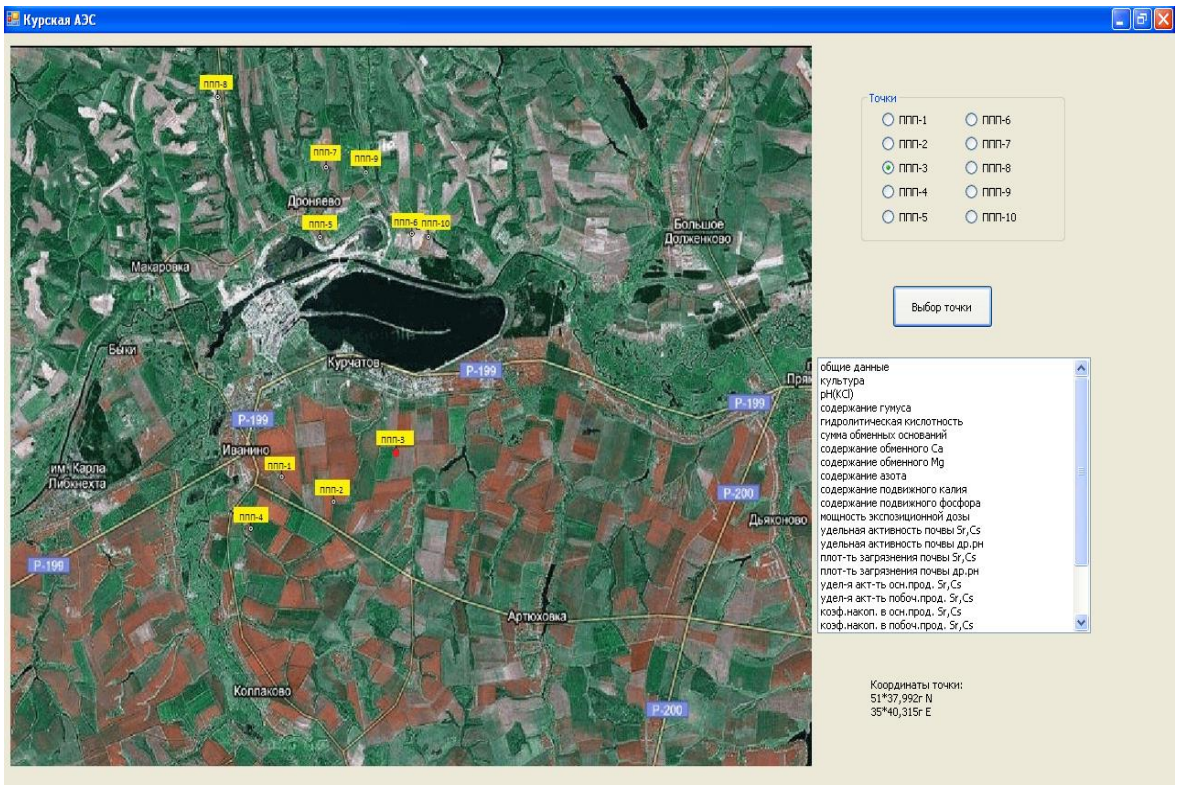


Рисунок 4. Размещение контрольных участков на ГИС радиоэкологического мониторинга агроэкосистем зоны расположения Курской АЭС

Исследования проводились методом экспедиционного обследования района расположения Курской АЭС в период уборки урожая основных сельскохозяйственных культур. Дополнительно отбирались пробы почв и овощных культур на частных подворьях и садовых участках, расположенных в 15-км зоне АЭС (табл. 2). В животноводческом контрольном пункте проводился отбор проб почвы на пастбище и компонентов рациона сельскохозяйственных животных.

Таблица 2

Объём мониторинговых исследований продуктов питания местного производства в регионе размещения Курской АЭС

Продукт питания	Общее количество проб	Год отбора проб
Баклажан	2	2013, 2018
Кабачки	4	2004–2005, 2010, 2018
Капуста	9	2004–2006, 2009–2012, 2018–2019
Картофель	9	2004–2006, 2009–2012, 2018–2019
Лук	13	2004–2006, 2009–2013, 2018–2019
Морковь	4	2011–2012, 2018–2019
Огурцы	2	2004–2005
Перец	8	2004–2005, 2009–2013, 2018
Свекла	5	2004–2006, 2018-2019
Томаты	9	2004–2005, 2009–2013, 2018
Молоко	27	2003–2006, 2008–2009, 2011–2013, 2018–2019
Говядина	2	2018–2019
Утка	1	2019

Сеть наблюдений мониторинга учитывала как ландшафтные, так и почвенные характеристики территории, включая специфику ведения сельского хозяйства. Контрольные участки выбирались таким образом, чтобы на почвах основных типов располагались наиболее распространённые в регионе сельскохозяйственные культуры и типичные севообороты (табл. 3).

В число основных задач радиоэкологического мониторинга в районе расположения Курской АЭС входило:

- регистрация основных природных и хозяйственных характеристик агроэкосистем, наблюдение и выявление тенденций в их изменении;
- регистрация текущего уровня радиоактивного загрязнения агроэкосистем, наблюдение и выявление тенденций в его изменении;
- выявление основных путей радиоактивного загрязнения агроэкосистем;
- установление перечня приоритетных загрязнителей;
- оценка состояния агроэкосистем и прогноз возможных негативных последствий воздействия атомной электростанции.

Таблица 3

Характеристика сети радиоэкологического мониторинга в регионе Курской АЭС

Контр. участок	Напр. и расст. от АЭС, км	Населенный пункт	Хозяйство	Угодье, почва
КУ-1	Ю-В, 3,7	пгт. Иванино	ООО «Курск-Агро»	Пашня, чернозём типичный
КУ-2	Ю-В, 9,5	д. Лукашевка	ООО «Курск-Агро»	Пашня, чернозём типичный
КУ-3	Ю-В, 6,0	д. Комякино	ООО «Курск-Агро»	Пашня, чернозём типичный
КУ-4	Ю, 9,5	д. Дружное	ООО «Дружное»	Пашня, чернозём выщелоч.
КУ-5	С-В, 6,2	д. Мосолово	ОАО «АПК КАЭС»	Пашня, светло-серая лесная
КУ-6	С-В, 7,2	д. Мосолово	ОАО «АПК КАЭС»	Пашня, светло-серая лесная
КУ-7	С, 4,0	п. Дроняево	ОАО «АПК КАЭС»	Пашня, серая лесная
КУ-8	С, 8,0	п. Кожля	ОАО «АПК КАЭС»	Пашня, серая лесная
КУ-9	С, 6,5	с. Макаровка	ОАО «АПК КАЭ»	Пашня, темно-серая лесная
КУ-10	Ю-З, 8,0	п. К-Либнехта	ОАО «АПК КАЭС»	Пашня, темно-серая лесная
КУ-11	С-В, 7,5	д. Мосолово	ОАО «АПК КАЭС»	Пастбище, аллюв. дерновая

Радиационный фон в районе расположения Курской АЭС

Определение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения на местности за весь период исследований показало, что указанные значения варьируют в пределах фоновых показателей – от 0,09 до 0,17 мкЗв/ч (табл. 4).

Анализ результатов измерения МАЭД не выявил достоверных отличий в величине мощности дозы во времени и на различном расстоянии от Курской АЭС. Полученный диапазон данных МАЭД соответствует изменчивости радиационного фона с учётом свойств почв, вида угодий, чернобыльских выпадений и не превышает нормативных значений (ОСПОРБ-99/2010). Минимальные значения МАЭД наблюдаются на обрабатываемых пахотных угодьях с более лёгким механическим составом почв, максимальные – на целинных тяжелосуглинистых почвах. Размах варьирований за все годы исследований был незначительным. Близкие результаты измерений МАЭД для исследуемого региона получены в рамках Единой государственной автоматизированной системы мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО) на территории Российской Федерации и хорошо согласуются с результатами других исследований, проведённых в зоне влияния Курской АЭС (Колесов и др., 2011; Радиационная обстановка ..., 2019).

Таблица 4

Содержание радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий в регионе размещения Курской АЭС, Бк/кг

Контрольный участок	МАЭД, мкЗв/ч	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{90}Sr	^{137}Cs
КУ-1	0,13* 0,11–0,15	578 465–682	25,3 18,6–35,2	36,8 29,3–42,4	3,8 1,3–5,5	26,3 13,5–36,4
КУ-2	0,13 0,11–0,16	596 460–725	25,5 18,4–31,6	37,4 32,1–43,3	3,3 1,3–4,2	23,0 15,3–32,4
КУ-3	0,12 0,09–0,14	574 497–643	24,8 19,3–30,3	39,2 29,1–53,1	3,6 0,9–6,1	27,3 9,8–40,0
КУ-4	0,11 0,09–0,13	565 477–677	23,0 10,0–29,6	36,5 30,9–47,4	4,5 1,4–6,7	24,1 16,5–31,9
КУ-5	0,13 0,11–0,16	481 394–605	23,0 15,5–32,8	31,3 20,7–41,1	3,6 0,8–5,6	36,5 25,4–44,0
КУ-6	0,13 0,09–0,17	503 388–605	20,6 13,4–30,4	28,2 23,2–32,7	3,1 0,9–5,1	34,6 26,4–42,2
КУ-7	0,14 0,12–0,17	624 486–701	27,4 14,6–41,0	36,6 22,0–46,0	4,2 1,6–6,2	22,7 14,1–33,0
КУ-8	0,13 0,11–0,17	622 520–689	28,8 22,5–36,0	37,5 31,3–44,8	2,7 1,4–4,3	14,6 9,3–25,5
КУ-9	0,15 0,13–0,17	625 422–940	29,5 20,6–40,7	37,5 27,8–50,5	2,9 1,2–4,8	19,2 9,9–25,9
КУ-10	0,12 0,10–0,16	534 440–678	25,8 17,5–36,7	35,7 27,4–46,4	3,7 0,9–6,7	32,5 23,9–41,3
КУ-11	0,15 0,12–0,17	594 472–673	26,4 23,1–29,6	33,6 29,9–38,0	3,8 0,8–6,3	40,8 25,1–53,3
Среднее в РФ (UNSCEAR, 2000)	–	520 100–1400	27 1–76	30 2–79	–	–
Радиационная обстановка …, 2019	0,13 0,08–0,18	–	–	–	–	–
Колесов и др., 2011	0,12 0,11–0,15	–	–	–	–	–

* В числителе указаны средние, в знаменателе минимальные и максимальные значения.

Содержание радионуклидов в почве и растительности

В результате исследований установлено, что радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий 5 и 10-км зон Курской АЭС обуславливается содержанием искусственных и естественных радионуклидов. Спектр искусственных радионуклидов определяется долгоживущими ^{137}Cs и ^{90}Sr. Радионуклиды наведённой активности (^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{60}Co), а также ^{131}I и ^{134}Cs не обнаружены. За 17-летний рассматриваемый период средняя удельная активность ^{90}Sr в почвах агроэкосистем 10-км зоны Курской АЭС варьировала в пределах 2,7–4,3 Бк/кг, а ^{137}Cs – 14,6–40,8 Бк/кг. Вариабельность данных по контрольным участкам составляла 3,1–7,5 раза для ^{90}Sr и 1,6–4,1 раза для ^{137}Cs. При этом не было обнаружено трендов на увеличение во времени содержания техногенных радионуклидов в почве ни на одном из контрольных участков сети мониторинга. В тоже время, обычное соотношение между радионуклидами «глобальными» ^{137}Cs и ^{90}Sr было нарушено влиянием аварийных выбросов Чернобыльской АЭС.

Обследование 15-км зоны Курской АЭС показало, что частота распределения значений удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах 5 и 15-км зон Курской АЭС приближается к логнормальному распределению (рис. 5).

Это говорит о том, что 68 % всех значений находятся в диапазоне ±1σ стандартного отклонения от среднего, а диапазон ±2σ

стандартного отклонения содержит 95 % всех значений, или, другими словами, частота значений меньше ±2σ от среднего значения составляет не более 5 %. Таким образом, при закладке сети контрольных участков в регионе размещения Курской АЭС-2 не было необходимости учитывать фактор неравномерности загрязнения.

Наблюдаемое варьирование значений содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах определяется в основном характером распределения радионуклидов по слоям почвы и, соответственно, видом сельскохозяйственных угодий. На пахотных угодьях за счёт многократно проводимых механических обработок почвы все суммарное количество ^{137}Cs и ^{90}Sr достаточно равномерно распределено в слое 0–25 см. На целинных же участках, основное количество радионуклидов находилось в верхнем 0–10 см слое почвы, что оказывает влияние как на размеры накопления ^{137}Cs в растениях, так и на характер определяемой в момент отбора проб мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, что указывает на важность учёта вида сельскохозяйственных угодий при проведении обследования.

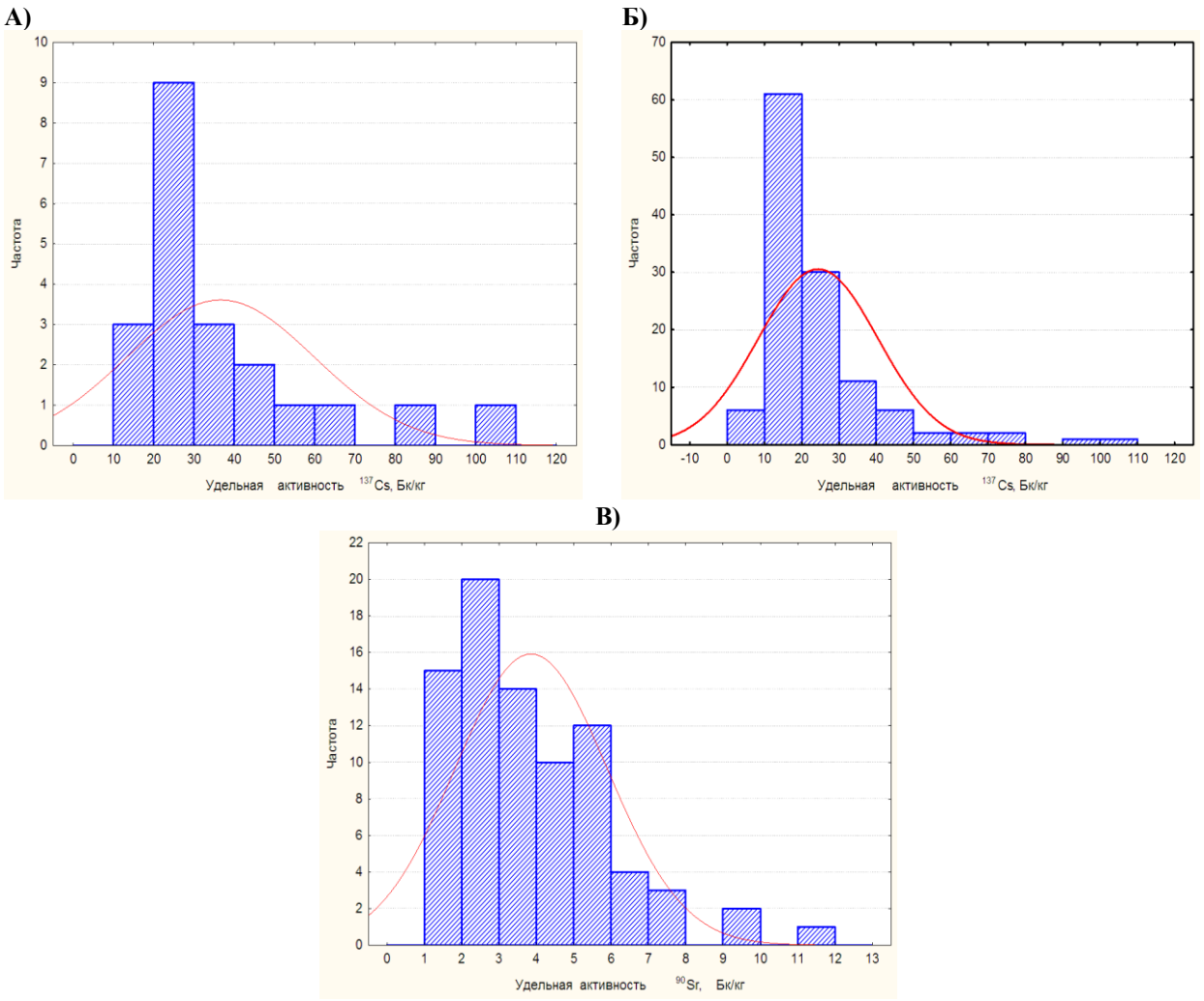


Рисунок 5. Распределение ^{137}Cs в почвах 5-км зоны **(А)** и ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах 15-км **(Б, В)** зоны Курской АЭС

На рисунке 6 приведён пример отбора проб для изучения характеристик почв и вертикального распределения радионуклидов. Характер распределения радионуклидов по слоям почв определяется почвенно-климатическими условиями, геоморфологией участков, свойствами радионуклидов и временем, прошедшим после их выпадений. Максимумы запасов ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве целинного контрольного участка 10

сосредоточены в слоях 5–10 и 10–15 см соответственно (рис. 7).

Рисунок 6. Почвенный разрез на контрольном участке 11, расположенном около Курской АЭС

А) **Б)**

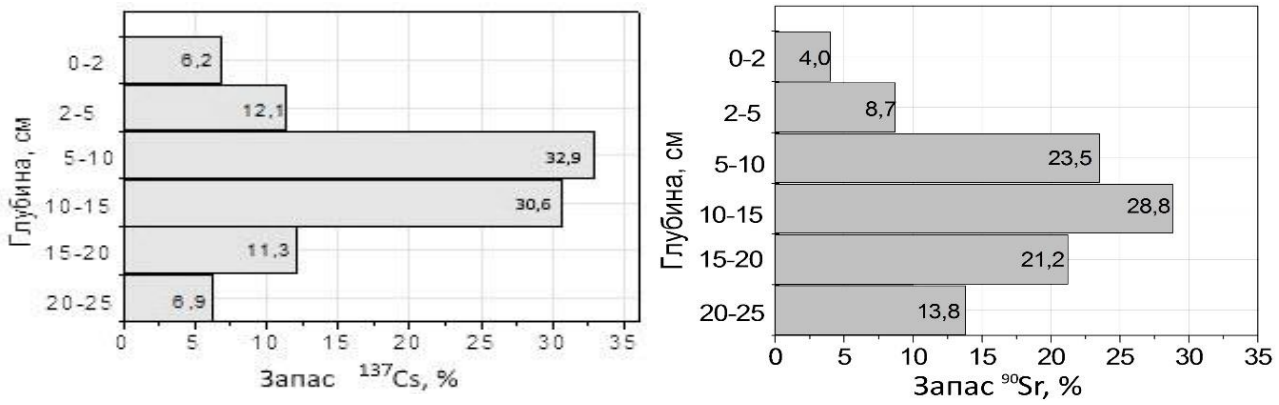


Рисунок 7. Распределение запаса ^{137}Cs **(А)** и ^{90}Sr **(Б)** по глубине почвенного профиля пастбища

Различия обусловлены особенностями миграционной подвижности ^{137}Cs и ^{90}Sr. Также установлено, что содержание естественных радионуклидов в районе исследований соответствует обычному радионуклидному составу поверхностных слоёв почв, характерных для Европейской части Российской Федерации (UNSCEAR, 2000). При этом среднее содержание ^{40}K,^{226}Ra и ^{232}Th составляет $(5,8\pm0,9)\times10^{2}$, $(3,1\pm0,7)\times10^{1}$ и $(3,4\pm0,5)\times10^{1}$ соответственно (рис. 8).

Средняя удельная активность радионуклидов в продовольственном зерне озимых и яровых культур за период наблюдений 2003–2019 гг. была в пределах: для ^{40}K – 120–160 Бк/кг, для ^{90}Sr – 0,24–0,43 Бк/кг и для ^{137}Cs – 0,19–0,37 Бк/кг (табл. 5). Некоторые отличия в накоплении радионуклидов зерновыми были обусловлены видовыми особенностями растений, погодными условиями в период вегетации, а также дозами применяемых агромелиорантов, что влияло на миграцию радионуклидов.

При этом не были отмечены тренды по увеличению во времени содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в данном виде сельскохозяйственной продукции.

Даже максимальные уровни содержания техногенных радионуклидов в продовольственном зерне (^{90}Sr – 0,99 и ^{137}Cs – 0,70 Бк/кг) были в 44 раза по ^{90}Sr и в 85 раз по ^{137}Cs ниже действующих нормативов СанПин (СанПин

2.3.2.1078-01, 2002; СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010).

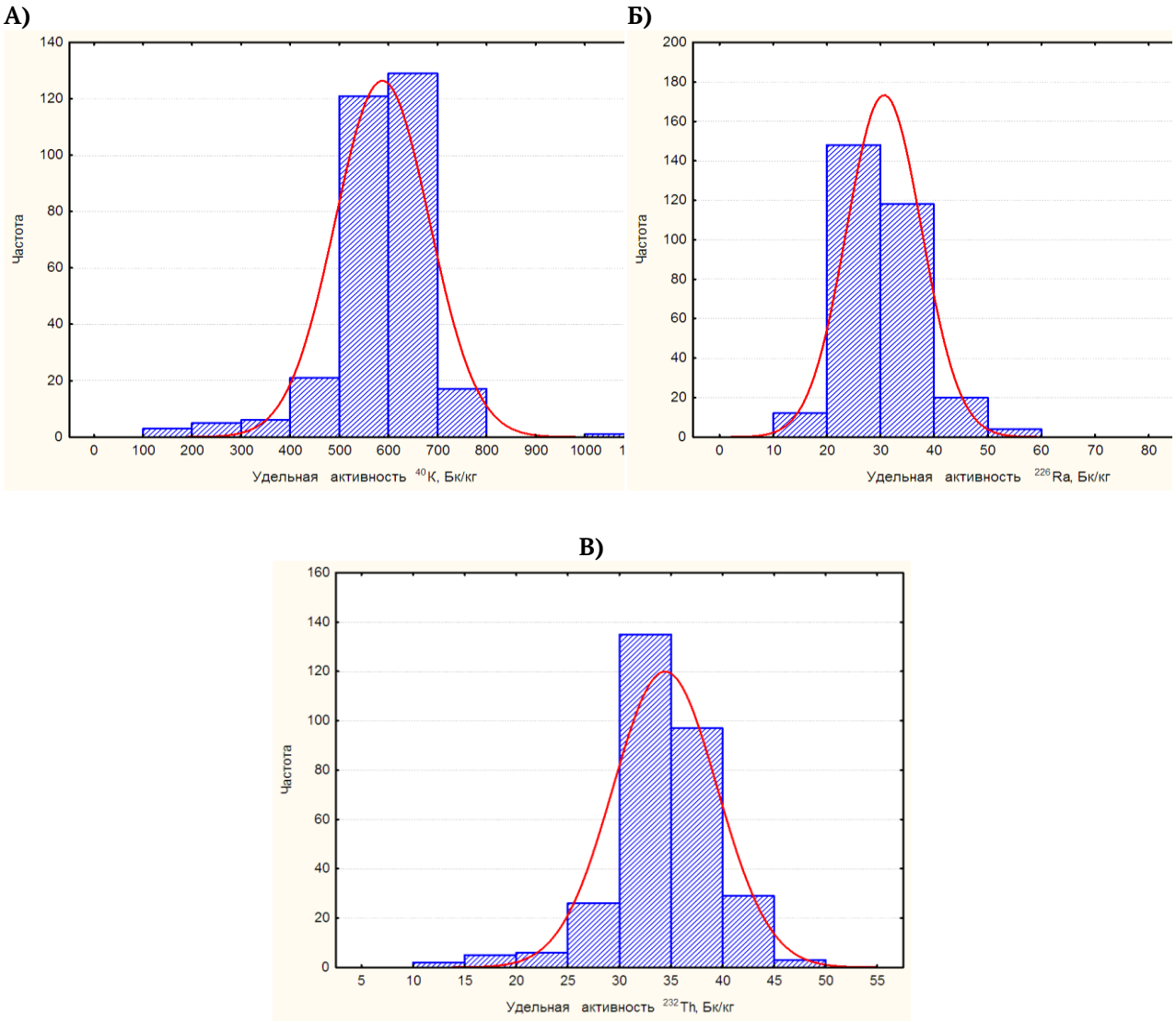


Рисунок 8. Распределение ^{40}К **(А)**, ^{226}Ra **(Б)** и ^{232}Th **(В)** в почвах 15-км зоны Курской АЭС

Корма сельскохозяйственных животных (солома, естественные и сеяные травы, а также силос) в большей степени накапливают радионуклиды по сравнению с зерном, что связано с биологическими особенностями растений. В соломе среднее содержание ^{90}Sr находится в пределах 0,8–2,2 Бк/кг, а ^{137}Cs – 0,7–2,6 Бк/кг, т. е. в 2–7 раз выше по сравнению с зерном (табл. 5). Накопление искусственных радионуклидов в сеяных травах несколько ниже по сравнению с естественными. При этом в надземной массе кормовых культур средняя удельная активность ^{90}Sr находится в диапазоне 1,5–2,1 Бк/кг, а ^{137}Cs – 0,7–2,1 Бк/кг.

За весь период наблюдений максимальные уровни содержания ^{90}Sr в соломе были в 50 раз ниже норматива для данного вида кормов (180 Бк/кг по ВП (ВП 13.5.13/06-01, 2000), а по ^{137}Cs эта разница составила более 100 раз (норматив 400 Бк/кг). Максимально зафиксированная за весь период наблюдений удельная активность ^{90}Sr в травах была более чем в 35 раз ниже норматива, а ^{137}Cs – более чем в 100 раз.

Таблица 5

Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции в регионе размещения Курской АЭС в 2003–2013 гг. и 2018–2019 гг., Бк/кг

Сельскохозяйственная культура	Хозяйственно-ценная часть	Общее количество проб	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs
Озимая пшеница	Зерно	15	145* 90–231	0,3 0,1–0,7	0,2 0,04–0,5
	Солома	1	350	0,9	0,9
Яровая пшеница	Зерно	10	125 78–167	0,4 0,1–0,6	0,2 0,05–0,4
	Солома	8	218 125–410	0,9 0,5–1,8	0,9 0,2–1,9
Озимая рожь	Зерно	6	116 95–144	0,2 0,1–0,4	0,4 0,2–0,6
	Солома	1	280	0,8	2,6
Ячмень	Зерно	28	163 107–228	0,4 0,1–1,0	0,3 0,1–0,7
	Солома	9	276 190–390	2,2 0,7–3,6	1,3 0,3–1,7
Овес	Солома	1	549	2,0	0,7
Соя	Надземная сухая масса	3	722 388–929	2,0 0,8–3,7	0,7 0,2–1,5
Сеяные травы	Надземная сухая масса	36	519 166–975	1,53 0,2–4,9	1,9 0,1–3,3
Естественные травы	Надземная сухая масса	10	436 130–640	1,6 0,2–3,1	2,07 0,2–3,4
Кукуруза	Надземная сухая масса	19	438 110–697	1,7 0,4–2,8	1,1 0,3–1,8
Подсолнечник	Надземная сухая масса	3	575 458–742	2,1 1,90–2,30	1,2 0,6–2,2
Свекла кормовая	Корнеплод	5	14,4 13,0–15,8	0,1 0,04–0,2	0,05 0,03–0,06
Растительность (Радиационная обстановка ..., 2019)	Надземная сухая масса	9	557 428–683	–	1,1 0,3–2,5

* В числителе указаны средние, в знаменателе минимальные и максимальные значения.

Учитывая, что продукты питания местного производства могут вносить существенный вклад в формирование дополнительной дозовой нагрузки у населения, проживающего в регионе Курской АЭС, был проведён анализ данных по содержанию радионуклидов в картофеле, овощах, молоке и мясе на соответствие их радиологическим стандартам СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002; СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010) (табл. 6).

При нормативах на содержание в овощах, картофеле и бахчевых ^{90}Sr – 40 Бк/кг и ^{137}Cs – 80 Бк/кг (СанПиН 2.3.2.1078-01, 2002) максимальные удельные активности этих техногенных радионуклидов в пищевой продукции растениеводства, произведённой в зоне наблюдения Курской АЭС, были более чем в 160 раз ниже установленных лимитов.

Полученные в ходе многолетних мониторинговых исследований результаты показывают, что производимая в регионе размещения Курской АЭС сельскохозяйственная продукция соответствует радиологическим нормативам.

Таблица 6

Содержание радионуклидов в продуктах питания, произведённых в районе Курской АЭС в 2003–2019 гг., Бк/кг(л)

Продукт питания	Наши данные			СанПиН, 2010		Колесов и др., 2011	
	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Баклажаны	3,9* 3,5–4,3	0,03 0,01–0,05	0,012 0,01–0,02	40	80	0,9–7,2	0,7–1,7
Кабачки	4,5 3,4–5,9	0,05 0,02–0,07	0,07 0,03–0,12	–	–	–	–
Капуста	6,7 3,7–9,3	0,09 0,05–0,15	0,07 0,03–0,13	–	–	–	–
Картофель	35,3 16,2–54,7	0,05 0,02–0,08	0,08 0,01–0,48	–	–	–	0,6
Лук перо	9,3 5,6–15,8	0,07 0,02–0,12	0,06 0,010–0,12	–	–	0,9–7,2	0,7–1,7
Лук репка	6,6	0,01	0,02	–	–	–	–
Лук шелуха	17,7 14,0–21,0	0,48 0,07–0,73	0,67 0,05–1,00	–	–	–	–
Морковь	12,6 8,5–20,7	0,09 0,04–0,15	0,07 0,05–0,09	–	–	0,9–7,2	0,7–1,7
Огурцы	–	0,04 0,04–0,04	0,045 0,04–0,05	–	–	–	–
Перец	7,4 2,9–12,7	0,04 0,02–0,06	0,05 0,02–0,11	–	–	–	–
Свёкла столовая	14,4 13,0–15,8	0,14 0,014–0,23	0,11 0,03–0,20	–	–	–	–
Томаты	3,6 1,5–5,6	0,02 0,006–0,05	0,03 0,01–0,08	–	–	–	–
Молоко	38,4 22,0–56,0	0,021 0,006–0,046	0,14 0,02–0,30	25	100	–	1,2–1,5
Говядина	55,6 31,1–80,0	0,078 0,015–0,14	0,23 0,22–0,23	–	200	3,3–4,8	0,6–1,6
Утка мясо	47,0	0,043	0,08	–	–	–	–
Утка кости	60,0	0,54	0,29	–	–	–	–

* В числителе указаны средние, в знаменателе минимальные и максимальные значения.

Содержание природных и техногенных радионуклидов в продукции животноводства (молоко, мясо, птица) также было на очень низком уровне за весь период наблюдений. Например, в молоке как из общественного сектора ОАО «АПК КАЭС», где расположен контрольный участок (КУ-11), так и из частного сектора населённых пунктов, максимальные уровни содержания ^{90}Sr были более чем в 85 раз ниже норматива СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) (25 Бк/кг), а по ^{137}Cs (норматив 100 Бк/кг) эта разница составила 50 раз.

В СанПиН 2.3.2.2650-10 ^{90}Sr в мясе не нормируется, однако, если сравнить максимальную удельную активность этого радионуклида в пробах говядины из района Курской АЭС с действующим ранее нормативом СанПин 2.3.2.1078-01 (50 Бк/кг), то она окажется в более чем 50 раз ниже установленного тогда лимита. В мясе птицы эта разница ещё выше – более чем в 300 раз. Максимальное содержание ^{137}Cs в говядине ниже норматива СанПиН 2.3.2.2650-10 по данному радионуклиду (200 Бк/кг) более чем в 850 раз. При этом не удалось выделить какие-либо виды продукции с повышенными уровнями накопления радионуклидов или имеющими тенденцию к такому увеличению во времени.

Полученные результаты радиоэкологического мониторинга по содержанию

техногенных радионуклидов в продуктах питания местного производства из региона Курской АЭС, достаточно хорошо согласуются с данными аналогичных исследований, представленных в работе (Колесов и др., 2011). Таким образом, пищевые продукты, произведённые в зоне влияния Курской АЭС, полностью соответствуют установленным в СанПиН нормативам по содержанию радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs и не оказывают значимого влияния на формирование дополнительных дозовых нагрузок у населения.

Вклад выбросов Курской АЭС в загрязнение продуктов питания и облучение населения

Проведённые расчёты доз внутреннего облучения населения от нормализованных многолетних выбросов Курской АЭС и данных радиоэкологического мониторинга показали, что за счёт потребления продуктов питания, производящихся в 10-км зоне наблюдения Курской АЭС, в рацион питания местного населения поступает около 70 Бк/год ^{90}Sr и 195 Бк/год ^{137}Cs, что почти в 400 раз по ^{137}Cs (0,25 % от ПГП) и в 200 раз по ^{90}Sr (0,52 % от ПГП) ниже предела годового поступления (ПГП), установленного НРБ-99/2009 (табл. 7). При этом ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная поступлением в организм ^{137}Cs и ^{90}Sr, за год составляет 2,5 и 5,0 мкЗв соответственно (Кузнецов и др., 2019). Основной вклад в формирование дозы внутреннего облучения населения от сельскохозяйственных продуктов, содержащих ^{137}Cs, вносят молоко (46 %), мясо (31 %), картофель и овощи (14 %), а содержащих ^{90}Sr – молоко (13 %) и продукты растениеводства (картофель, овощи, хлеб) – до 78 %.

Таблица 7

Поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs с местными продуктами питания в рацион населения, проживающего в регионе расположения Курской АЭС

Компоненты	Поступление радионуклидов, Бк/год	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Мясо (говядина)	0,5	56
Мясо (птица)	0,02	3,4
Молоко	8,5	90,3
Яйцо	0,004	0,04
Рыба	6,0	4,1
Картофель	15,5	8,0
Капуста	5,5	6,0
Огурцы, помидоры	8,5	7,3
Лук репка и зелень	2,2	3,0
Морковь, свекла	4,1	3,5
Хлеб	16,3	13,0
Крупа	–	–
Всего	67,1 (0,52 % от ПГП)	194,6 (0,25 % от ПГП)
ПГП с пищей	13000	77000

При функционировании Курской АЭС в штатном режиме через 30 лет эксплуатации уровни загрязнения сельскохозяйственной продукции за счёт станционного ^{137}Cs увеличатся для молока и мяса не более, чем на 2 %, а для картофеля, озимой пшеницы и овощей – от 9 до 20 %. При этом уровни накопления в сельскохозяйственной продукции ^{137}Cs станционного происхождения будут в 20–350 раз ниже, чем за счёт глобальных выпадений. Вклад их составляет 0,23–2,4 % и через 30 лет функционирования АЭС увеличится от 0,61 до 5,9 % (табл. 8).

Таблица 8

Сравнительная оценка загрязнения сельскохозяйственной продукции за счёт различных источников поступления ^{137}Cs, Бк кг$^{-1}$

Вид продукции	Глобальные выпадения		Выбросы АЭС	
	1-ый год	30-ый год	1-ый год	30-ый год
Пшеница озимая	0,43	0,18	0,23	0,61
Картофель	0,07	0,04	0,71	1,48
Молоко	0,05	0,02	2,2	5,2
Мясо	0,20	0,08	2,4	5,9

Оценки дозовых нагрузок на население от существующего облучения на основе данных радиоэкологического обследования района расположения Курской АЭС (МР 2.6.1.0063-12, 2013) и информации о газоаэрозольных выбросах станции приведены в таблице 9.

Таблица 9

Годовая доза облучения населения от облучения существующими техногенными радионуклидами и газоаэрозольными выбросами Курской АЭС, мкЗв/год

Радионуклид	Доза облучения			
	От облака	От поверхности почвы	От ингаляции	От продуктов питания
Существующее облучение от радионуклидов, накопленных в окружающей среде: 14,3 мкЗв/год				
^{60}Co	$1,5\times10^{-3}$	$6,6\times10^{-6}$*	$2,4\times10^{-5}$	$1,9\times10^{-9}$**
^{90}Sr	–	–	–	1,4
^{137}Cs	$5,1\times10^{-4}$	$1,2\times10^{1}$	$3,5\times10^{-5}$	1,2
Сумма	$2,6\times10^{-3}$	$1,2\times10^{1}$	$5,9\times10^{-5}$	2,6
Облучение от газоаэрозольных выбросов Курской АЭС: 1,5 мкЗв/год				
	1,2	$1,2\times10^{-1}$	$4,3\times10^{-4}$	$1,9\times10^{-1}$

* Концентрация в почве ^{60}Co рассчитана исходя из концентрации в воздухе (IAEA, 2001).

** Концентрация ^{60}Co в продуктах питания рассчитана с использованием коэффициентов накопления (IAEA, 2010) исходя из оцененной по (IAEA, 2001) концентрации в почве.

Дозу внутреннего облучения от продуктов питания оценивали, используя данные об их потреблении населением, проживающем в регионе расположения Курской АЭС (МТ 1.2.1.15.1176-2016, 2016). Дозу облучения от атмосферных выбросов АЭС рассчитывали по усредненным показателям за последние 5 лет (табл. 10) на настоящее время с момента введения в эксплуатацию первого энергоблока (IAEA, 2001). Расчёт проводили в рамках точечного консервативного подхода, рассчитывая дозу облучения в точке, где наблюдаются максимальные приземные активности радионуклидов в результате газоаэрозольных выбросов из вентиляционных труб высотой 150 м.

Из данных таблицы 9 видно, что среди путей существующего облучения доминирует доза внешнего облучения от радионуклидов, находящихся в почве (83 %), существенным является и вклад дозы от потребления продуктов питания (17 %), а вклад остальных путей незначителен. Основным дозообразующим радионуклидом является ^{137}Cs, что во многом объясняется Чернобыльскими выпадениями, затронувшими, хотя и в небольшом масштабе, Курскую область.

Таблица 10

Выбросы радионуклидов в атмосферу Курской АЭС, Бк/год
(Радиационная обстановка ..., 2014–2019)

Радионуклид	Годы						Среднее
	2018	2017	2016	2015	2014	2013	
^{60}Co	$1{,}1\times10^{8}$	$1{,}9\times10^{8}$	$9{,}6\times10^{7}$	$1{,}5\times10^{8}$	$1{,}2\times10^{8}$	$3{,}1\times10^{8}$	$1{,}6\times10^{8}$
^{131}I	$1{,}1\times10^{9}$	$1{,}0\times10^{9}$	$1{,}3\times10^{9}$	$1{,}5\times10^{9}$	$1{,}0\times10^{9}$	$3{,}1\times10^{9}$	$1{,}5\times10^{9}$
^{134}Cs	$1{,}3\times10^{7}$	$1{,}3\times10^{7}$	$5{,}4\times10^{6}$	$1{,}4\times10^{7}$	$7{,}0\times10^{6}$	$3{,}3\times10^{7}$	$1{,}4\times10^{7}$
^{137}Cs	$3{,}8\times10^{7}$	$4{,}3\times10^{7}$	$2{,}9\times10^{7}$	$5{,}0\times10^{7}$	$3{,}4\times10^{7}$	$7{,}6\times10^{7}$	$4{,}5\times10^{7}$
^{41}Ar	$1{,}5\times10^{12}$	$1{,}4\times10^{12}$	9,3×1011	$1{,}3\times10^{12}$	$1{,}4\times10^{12}$	$7{,}3\times10^{11}$	$1{,}2\times10^{12}$
^{85}Kr	$3{,}4\times10^{12}$	$3{,}4\times10^{12}$	$2{,}2\times10^{12}$	$3{,}1\times10^{12}$	$3{,}3\times10^{12}$	$1{,}7\times10^{12}$	$2{,}8\times10^{12}$
^{85m}Kr	$3{,}2\times10^{13}$	$3{,}2\times10^{13}$	$2{,}0\times10^{13}$	$2{,}9\times10^{13}$	$3{,}1\times10^{13}$	$1{,}6\times10^{13}$	$2{,}7\times10^{13}$
^{87}Kr	$6{,}5\times10^{13}$	$6{,}4\times10^{13}$	$4{,}1\times10^{13}$	$5{,}9\times10^{13}$	$6{,}2\times10^{13}$	$3{,}3\times10^{13}$	$5{,}4\times10^{13}$
^{88}Kr	$9{,}0\times10^{13}$	$8{,}9\times10^{13}$	$5{,}7\times10^{13}$	$8{,}2\times10^{13}$	$8{,}6\times10^{13}$	$4{,}5\times10^{13}$	$7{,}5\times10^{13}$
^{133}Xe	$1{,}7\times10^{14}$	$1{,}7\times10^{14}$	$1{,}1\times10^{14}$	$1{,}6\times10^{14}$	$1{,}6\times10^{14}$	$8{,}6\times10^{13}$	$1{,}4\times10^{14}$
^{135}Xe	$1{,}2\times10^{14}$	$1{,}2\times10^{14}$	$7{,}8\times10^{13}$	$1{,}1\times10^{14}$	$1{,}2\times10^{14}$	$6{,}2\times10^{13}$	$1{,}0\times10^{14}$
Сумма ИРГ	$4{,}9\times10^{14}$	$4{,}8\times10^{14}$	$3{,}1\times10^{14}$	$4{,}4\times10^{14}$	$4{,}7\times10^{14}$	$2{,}4\times10^{14}$	$4{,}0\times10^{14}$

Примечание. Активности ИРГ рассчитаны исходя из суммарной активности на основе их процентного содержания в выбросе реактора (Бекман, 2005).

Дозы облучения населения от атмосферных выбросов Курской АЭС определяются внешним облучением от радионуклидов (ИРГ), находящихся в облаке (~40 %). Значим вклад ^{131}I (пероральный путь – 5 %) и ^{60}Co (внешнее облучение от радионуклидов на поверхности почвы ~4 %). Вклад газоаэрозольных выбросов примерно в 10 раз ниже, чем от существующего загрязнения окружающей среды техногенными радионуклидами. Вклад продуктов питания в облучение населения показан на рисунке 9.

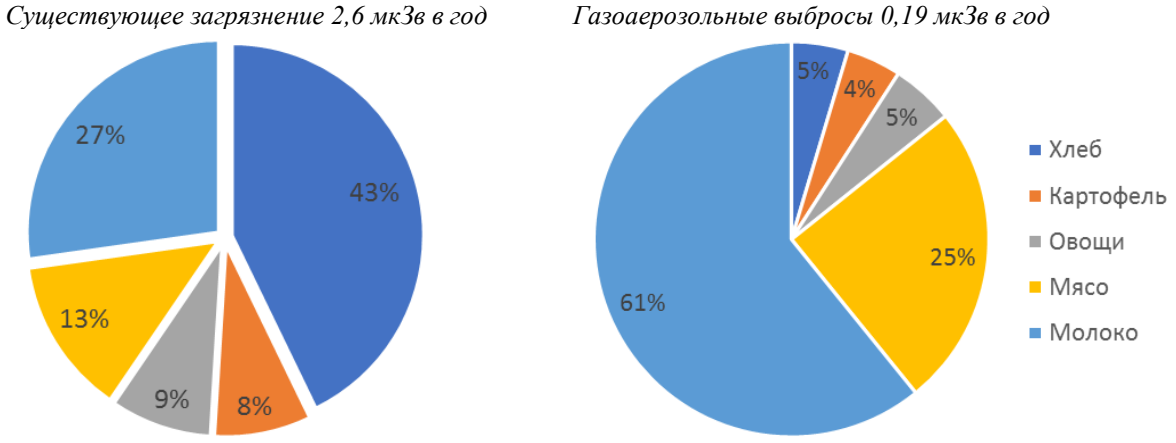


Рисунок 9. Процентный вклад продуктов питания в облучение взрослого населения в районе расположения Курской АЭС

Вклад облучения от потребления продуктов питания в рассматриваемых ситуациях примерно одинаков. Значимыми продуктами питания в ситуации существующего облучения, не связанного с радионуклидами станционного происхождения, являются хлебные продукты. Дозы облучения от зерновых объясняются высокими значениями

удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в них по сравнению с остальными продуктами в районе расположения Курской АЭС. "Критическим" продуктом питания в результате газоаэрозольных выбросов АЭС будет являться молоко. Главным дозообразующим радионуклидом при пероральном поступлении является ^{131}I в связи с достаточно высокой активностью этого радионуклида в выбросах Курской АЭС по сравнению с изотопами цезия и ^{60}Co. В связи с отсутствием данных по содержанию в продуктах питания, а также в информации о газоаэрозольных выбросах Курской АЭС таких биофильных элементов, как ^{14}C и ^{3}H, возможна недооценка дозы облучения.

В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что функционирование Курской АЭС в нормальном режиме эксплуатации не приведёт к ухудшению радиационной обстановки в районе размещения станции. Формирование дозовых нагрузок на местное население за счёт потребления сельскохозяйственных продуктов, получаемых с сельскохозяйственных угодий, не превышает установленных нормативных значений и не будет их превышать в будущем.

Заключение

Анализ экспериментальных данных показал, что в последние 17 лет радиационная обстановка на территории Курской области была стабильной и существенно не менялась, а радиационный фактор не являлся ведущим фактором вредного воздействия на окружающую среду и здоровье населения. Максимально наблюдаемые в отдельные периоды времени значения среднегодовой объёмной активности ^{137}Cs в приземном слое атмосферы г. Курчатова до $25–31\times10^{-7}$ Бк/м^3 и среднемесячных значений до 84×10^{-7} Бк/м^3 на шесть-семь порядков ниже допустимой объёмной активности ^{137}Cs в воздухе для населения (ДОАНАС) по НРБ-99/2009 (Доклад …, 2019; Отчёт …, 2018). По другим радионуклидам максимальные значения радионуклидов ниже предельно допустимых на 4–9 порядков, а среднегодовые – на 5–8 порядков. Радиоактивность почв сельскохозяйственных угодий 5 и 10-км зон Курской АЭС обуславливается содержанием искусственных и естественных радионуклидов. Спектр искусственных радионуклидов определяется долгоживущими ^{137}Cs и ^{90}Sr. Радионуклиды наведённой активности (^{54}Mn, ^{59}Fe, ^{60}Co), а также ^{131}I и ^{134}Cs в почвах и урожае сельскохозяйственных культур не обнаружены.

Среднее значение плотности загрязнения почв Курской области ^{137}Cs за последние пять лет составило 4,9 кБк/м^2, максимальное – 99,0 кБк/м^2 и в значительной степени обусловлено выпадениями в результате аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. (Данные по радиоактивному загрязнению …, 2019). Определение мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на местности за 17-летний период мониторинговых исследований показало, что указанные значения варьируют в пределах фоновых показателей – от 0,09 до 0,17 мкЗв/ч. Полученные значения полностью согласуются с данными региональной радиометрической сети Росгидромета и службой внешнего радиационного контроля Курской АЭС, которые показывают, что во всех режимах эксплуатации Курской АЭС варьирование МАЭД происходит в диапазоне 0,08–0,12 мкЗв/ч (при норме до 0,3 мкЗв/час, установленной «Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010) (Доклад …, 2019; Отчёт …, 2018). Проведённые расчёты доз внутреннего облучения населения в 10-км зоне наблюдения Курской АЭС показали, что ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, обусловленная поступлением в организм ^{137}Cs и ^{90}Sr с местными продуктами питания, составляет за год 2,5 и 5,0 мкЗв соответственно. При этом формирование дозовых нагрузок на местное население за счёт потребления сельскохозяйственных продуктов, получаемых с сельскохозяйственных угодий, не превышает установленных нормативных значений.

Полученные результаты подтверждаются материалами федеральных и областных министерств, организаций и учреждений, участвующих в проведении радиационного и социально-гигиенического мониторингов. По данным радиологической лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Курской области», за период наблюдения с

2011 по 2019 годы превышений гигиенических нормативов содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в пищевых продуктах питания местного производства не обнаружено (Отчёт ..., 2019). Среднегодовые эффективные дозы облучения населения Курской области составили в 2018 г. – 3,15 мЗв/год из которых 2,65 мЗв приходится на природные источники, 0,009 мЗв – на выпадения в результате аварии на Чернобыльской АЭС и 0,005 мЗв – на глобальные выпадения.

Вместе с тем следует отметить, что оценка экологической обстановки и состояние почвенного плодородия сельскохозяйственных земель в районах расположения радиационно-опасных объектов возможно только при условии комплексного мониторинга наземных природных и аграрных экосистем. При этом системный радиационно-экологический мониторинг в регионе Курской АЭС необходимо продолжить с расширением перечня контролируемых биофильных радионуклидов, включая ^{3}H, ^{14}C.

Литература

Аксенов В.А., Котельникова О.Б. Источники радиационной опасности в Курской области // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия техника и технологии. 2012. № 2, Ч. 2 С. 179–182.

Бекман И.Н. Ядерная индустрия: курс лекций. М.: МГУ, 2005. 867 с.

ВП 13.5.13/03-00. Государственная система ветеринарного нормирования Российской Федерации. Радиационная безопасность. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения (утв. Главным государственным ветеринарным инспектором РФ 25.05.2001). М.: Минсельхозпрод России, 2000.

Данные по радиоактивному загрязнению территории населённых пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-(239+240): ежегодник. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2019. 228 с.

Доклад «О состоянии и охране окружающей среды на территории Курской области в 2018 году». Курск: Администрация Курской области, 2019. 214 с.

Колесов А.Н. и др. Радиационная и экологическая обстановка в районе размещения Курской атомной станции // Медицина экстремальных ситуаций. 2011. № 2. С. 65–71.

Кузнецов В.К. и др. Структура базы данных агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения в регионе размещения Курской АЭС // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2015. № 1. С. 52–57.

Кузнецов В.К. и др. Радиационно-экологический мониторинг агроэкосистем в зоне воздействия АЭС: методология и результаты исследований // Медицинская радиология. Радиационная безопасность. 2019. Т. 64. № 4. С. 25–31.

МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: Мелодические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с.

МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух: методика. Обнинск: НПО «Тайфун», 2016, 76 с.

МУ-13.5.13-00. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов: Методические указания (утв. Министерством сельского хозяйства РФ 7 августа 2000 г.). М., 2000. 28 с.

Николаев В.А. Проблемы регионального ландшафтоведения. М.: Изд-во МГУ, 1979. 160 с.

О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Курской области в 2019 году: материалы государственного доклада. Курск, Администрация Курской области, 2020. 241 с.

Отчёт по экологической безопасности Курской АЭС за 2018 г. Курчатов: АО «Концерн Росэнергоатом», филиал «Курская атомная станция», 2019. 48 с.

Полуянов А.В. Флора Курской области. Курск: Курский гос. ун-т, 2005. 265 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2014. 357 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2015. 350 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.:

Метеоагентство Росгидромета, 2016. 346 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2017. 396 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2018. 360 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2019. 324 с.

Рыжков О.В., Власов А.А., Золотухин Н.И. и др. Биологическое разнообразие техногенных ландшафтов Курской АЭС. М., 2009. 283 с.

Санжарова Н.И. и др. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 276 с.

Санжарова Н.И., Панов А.В., Кузнецов В.К. и др. Комплексный радиационно-экологический мониторинг в районе расположения радиационно опасных объектов как составная часть единой системы государственного экологического мониторинга // Известия Вузов. Ядерная энергетика. 2019. № 1. С. 131–142.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (утв. и введ. в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 № 47): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 28.06.2010 г. № 71). М., 2010. 22 с.

СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010) (с изменениями на 16 сентября 2013 года) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ Г.Г. Онищенко от 26.04.2010 г. № 40). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. С 83.

СП 151.13330.2012. Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Ч. II Инженерные изыскания для разработки проектной и рабочей документации и сопровождения строительства (утв. приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. № 110/ГС). М., 2013. 155 с.

Чертков Н.В., Ананасёнок С.В. Ландшафт как объект геоэкологической оценки Курской области // Геоэкологические исследования и их отражение в географическом образовании / Курск: Курск. гос. ун-т, 2007. С. 45–48.

IAEA (2001). Safety Reports Series No.19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Vienna: IAEA, 2001. 229 p.

IAEA (2010). Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments. Techn. Rep. Ser. № 472. Vienna: IAEA, 2010.

UNSCEAR (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations, 2000. P. 84–156.

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Цыгвинцев П.Н.[1], Нуштаева В.Э.[1], Душин В.Л.[2], Анисимов В.С.[1], Бондаренко Л.Г.[2], Кузнецов В.К.[1], Исамов Н.Н.[1]

1 – ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии
2 – АО Радиевый институт им. В.Г. Хлопина

Радиоэкологическая обстановка в районе расположения ЛАЭС характеризуется сложным характером радиоактивных выпадений, обусловленных в основном радиоактивным следом после аварии на ЧАЭС. Несмотря на низкие уровни внешнего облучения и невысокий уровень (на порядки ниже нормативного) радионуклидного загрязнения основных продуктов питания населения, дикорастущие грибы и ягоды, особенно на болоте и заболоченных участках леса, могут содержать ^{137}Cs в концентрации, достигающей предельных нормативов СанПиН. Отмечен повышенный уровень содержания ^{3}H и ^{14}C в сельскохозяйственной продукции. В продуктах питания населения концентрация данных радионуклидов составляет десятки Бк/кг. Суммарная годовая доза облучения населения от атмосферных выбросов ЛАЭС-2 значительно (на несколько порядков) меньше допустимой дозовой нагрузки.

Ленинградская АЭС, радиоэкологический мониторинг ^{137}Cs, ^{90}Sr, природные радионуклиды, воздействие на окружающую среду, продукты питания

Введение

Северо-западный регион России является одним из самых насыщенных в нашей стране регионов по расположению радиационно-опасных объектов. Регион подвергся радиоактивному загрязнению после Чернобыльской аварии и поэтому проблемы радиационной безопасности, помимо научного и практического значения, приобрели выраженную социально-политическую окраску. Среди вредных факторов, создающих угрозу для среды обитания живых организмов и человека, особенное беспокойство у населения вызывает потенциальное радиоактивное загрязнение природной среды и обусловленное им радиационное воздействие.

Ленинградская АЭС была головной АЭС с реакторами типа РБМК. Первый блок ЛАЭС РБМК-1000 сдан в эксплуатацию в 1973 году. В 1975 году был сдан 2 такой же энергоблок и начато строительство второй очереди. Третий и четвёртый блоки были сданы в 1979 и 1981 гг., и общая мощность АЭС достигла 4000 МВт (рис. 1). В настоящее время ЛАЭС и ЛАЭС-2 включают 6 энергоблоков. Блок № 1 РБМК-1000 остановлен для вывода из эксплуатации 21 декабря 2018 года после 45 лет работы. Блоки №2, 3, 4 РБМК-1000 и блок № 5 ВВЭР-1200 – в работе. Блок № 6 ВВЭР-1200 – в стадии сооружения (пуск в 2020 году).

Район расположения ЛАЭС (побережье Копорской губы Финского залива) находится на приграничной территории Российского побережья Балтийского моря на западе Ленинградской области. Площадка занимает территорию в Ломоносовском районе Ленинградской области, в юго-восточной части промышленной зоны города Сосновый Бор, в 2 км от побережья Копорской губы Финского залива, в 4,37 км к юго-западу от жилой застройки Сосновоборского городского округа (рис. 2).

Район характеризуется доминированием в промышленности предприятий атомной энергетики, в сельском хозяйстве – развитием кормопроизводства и животноводства; повышенным содержанием в природной среде радионуклидов естественных семейств урана-тория и техногенных радионуклидов трансграничного переноса аварийного выброса Чернобыльской АЭС в 1986 году, включившихся в процесс биогеохимической миграции в наземных экосистемах.

В пределах одной санитарно-защитной зоны в данном районе расположено несколько радиационно-опасных объектов. Ленинградская АЭС и ЛАЭС-2, строящейся на

замену выводимой из эксплуатации ЛАЭС, НИТИ им. А.П. Александрова, ЛОФ СЗТО ФГУП «РосРАО» (ЛСК «Радон»), ЗАО «Эко-мет-С», которые имеют общую зону воздействия их «рутинных» выбросов в атмосферу и сбросов вод, содержащих радионуклиды и химические вещества, в прибрежные воды Копорской губы (Комплексное экологическое обследование …, 2013; Радиационная обстановка …, 2006).

Рисунок 1. Панорама Ленинградской АЭС со стороны Финского залива

Рисунок 2. Район расположения ЛАЭС (Комплексное экологическое обследование …, 2013)

Практически всё население зоны наблюдения (ЗН) сосредоточено в приустьевой части долины реки Коваши, в 6 км к востоку-северо-востоку от площадки, с подветренной от источника стороны, в городе Сосновый Бор с населением около 61,0 тысяч человек. Территория между реками Воронка и Коваши (к востоку от площадки) занята

болотами, практически непригодна для сельскохозяйственной деятельности и крайне редко населена. В направлении преобладающих ветров (в северо-восточном секторе) на удалении свыше 4,0 км от площадки ЛАЭС-2 расположены садоводства (около 6000 участков) и огороды (около 3000 участков). Интенсивное производство сельскохозяйственных продуктов ведётся также к югу и востоку на расстояниях 10–15 км от ЛАЭС-2. Радиоэкологические исследования в районе размещения ЛАЭС были выполнены в 2013–2014 годах.

Характеристики Ленинградской АЭС как источника воздействия на окружающую среду

На рассматриваемой территории основными источниками техногенных радионуклидов в окружающей среде являются:

– Чернобыльские выпадения. В апреле-мае 1986 года на квадратный километр площади водосборного бассейна Копорской губы поступило в среднем около 8,5 ГБк долгоживущего ^{137}Cs, что составляет примерно 92 % от годовой (9,3 кБк/м^2) величины; концентрации ^{131}I в аэрозольной компоненте воздуха г. Сосновый Бор 29–30 апреля (а в питьевой воде – 1–6 мая 1986 года) достигали допустимой для ограниченной части населения. На фоне быстрого снижения загрязненности воздуха в первый период после аварии резкие увеличения концентраций ^{131}I, ^{103}Ru, ^{137}Cs происходили 3, 9, 13 и 26 мая 1986 года. Удельная активность ^{137}Cs в депонирующих звеньях экосистем (почва, сельскохозяйственные продукты питания местного производства, мох, грибы, донные отложения, рыба) в настоящее время зачастую превышает уровни 1985 г.;

– Глобальные выпадения. Основными радионуклидами, поступившими в окружающую среду после испытаний ядерного оружия, являются ^{137}Cs и ^{90}Sr при их соотношении – 1,6. 1982–1985 годы характеризовались минимальным с начала испытаний ядерного оружия уровнем глобальных выпадений радионуклидов на территорию региона;

– Локальные радиационные объекты – филиал ОАО Концерн Энергоатом Ленинградская атомная станция (ЛАЭС), ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, Ленинградское отделение Филиала "Северо-западный территориальный округ" ФГУП РосРАО (бывший ЛСК Радон), ЗАО Экомет-С (рис. 2) (Комплексное экологическое обследование ..., 2013).

В состав ЛАЭС входят четыре энергоблока РБМК-1000, комплекс по переработке и битумированию жидких радиоактивных отходов, хранилище отработавших тепловыделяющих сборок. Основной источник поступления радиоактивных веществ в окружающую среду – газоаэрозольные радиоактивные выбросы в атмосферу на ЛАЭС, которые осуществляются через три вентиляционных трубы (первой, второй очереди и комплекса переработки отходов). Данные о газоаэрозольных выбросах ЛАЭС в 2010–2013 г. приведены в таблице 1 (Радиационная обстановка ..., 2010; Радиационная обстановка ..., 2011; Радиационная обстановка ..., 2012; Радиационная обстановка ..., 2013; Радиационная обстановка ..., 2014).

Таблица 1

Выброс радионуклидов в атмосферу на ЛАЭС за 2010–2013 гг., Бк

Наименование радионуклида	Допустимый выброс	Фактический выброс			
		2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
^{60}Co	$2{,}5\times10^{9}$	$2{,}5\times10^{8}$	$1{,}32\times10^{8}$	$1{,}01\times10^{8}$	$7{,}50\times10^{7}$
^{131}I	$9{,}3\times10^{10}$	нп*	$2{,}24\times10^{7}$	$2{,}27\times10^{7}$	нп
^{134}Cs	$1{,}4\times10^{9}$	$1{,}79\times10^{7}$	$1{,}87\times10^{6}$	$3{,}74\times10^{5}$	$3{,}13\times10^{6}$
^{137}Cs	$4{,}0\times10^{9}$	$4{,}0\times10^{7}$	$3{,}02\times10^{7}$	$3{,}29\times10^{7}$	$8{,}13\times10^{6}$
Сумма ИРГ	$3{,}7\times10^{15}$	$2{,}29\times10^{14}$	$9{,}13\times10^{13}$	$5{,}65\times10^{13}$	$7{,}30\times10^{13}$

* Ниже установленного на ЛАЭС уровня регистрации.

Из данных, приведённых в таблице 1, видно, что годовые выбросы радионуклидов на ЛАЭС в 2011 г. по сравнению с 2010 г. снизились практически по всем контролируемым радионуклидам и не превышали допустимых. Снижение выбросов радиоактивных газов и аэрозолей Ленинградской АЭС в атмосферу в 2012 г. связано с остановкой энергоблока № 1 и переводом его в режим без генерации. Увеличение выбросов ^{137}Cs в 1,1 раза по сравнению с 2011 годом связано с проведением работ по утилизации демонтированных шахт перегрузки ОТВС с загрузкой их в контейнеры (Радиационная обстановка …, 2013). Годовые выбросы радионуклидов на ЛАЭС в 2013 г. по сравнению с 2012 г. снизились по ^{137}Cs – в 4 раза, ^{60}Co – в 1,3 раза, выбросы ^{131}I в атмосферу в 2013 г. не были зарегистрированы.

Выбросы инертных радиоактивных газов (ИРГ) в 2013 году увеличились по сравнению с уровнем 2012 года в 1,3 раза, что объясняется рекордно низкими значениями выбросов ИРГ в 2012 году, связанными с переводом энергоблока № 1 в режим без генерации. Вместе с тем следует отметить, что выбросы ИРГ за 2013 год не превысили аналогичных значений за предыдущие 2004–2011 гг. Выбросы ^{134}Cs выросли почти в 9 раз, что составляет 0,22 % от допустимого выброса. Все выбросы по контролируемым радионуклидам не превышали допустимых.

Сбросы очищенных дебалансных вод на ЛАЭС, которые представляют собой избыточный спецдоочищенный конденсат, образующийся при очистке трапных вод, производятся в Копорскую губу Финского залива. Слива дебалансных вод и, соответственно, поступления радионуклидов со сбросами в Копорскую губу Финского залива в 2012–2013 гг. не было. Данные о сбросах радионуклидов со сточными водами ЛАЭС в 2010 г. приведены в таблице 2 (Радиационная обстановка …, 2010).

Таблица 2

Сброс радионуклидов в Копорскую губу Финского залива на ЛАЭС, Бк

Наименование радионуклида	Допустимый сброс	Фактический сброс, 2010г.
^{54}Mn	$4{,}3\times10^{10}$	$3{,}45\times10^{5}$
^{60}Co	$3{,}9\times10^{9}$	$7{,}43\times10^{5}$
^{58}Co	$1{,}8\times10^{10}$	$7{,}5\times10^{4}$
^{51}Cr	$1{,}4\times10^{12}$	$1{,}85\times10^{6}$
^{137}Cs	$1{,}1\times10^{9}$	$6{,}75\times10^{5}$

НИТИ им. А.П. Александрова с рядом экспериментальных реакторов небольшой мощности, работающих в исследовательских режимах с длительными стоянками. Искусственные радионуклиды поступают через системы охлаждения в прибрежную зону Копорской губы. При работе реакторов выброс в атмосферу осуществляется через трубу высотой 100 м. Величины сбросов и выбросов с ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова приведены в таблице 3 по данным НПО «Тайфун» (Радиационная обстановка …, 2010; Радиационная обстановка …, 2011; Радиационная обстановка …, 2012; Радиационная обстановка …, 2013).

Ленинградское отделение филиала «Северо-западный территориальный округ" ФГУП РосРАО (бывший Ленинградский специализированный комбинат Радон) – предприятие по переработке и временному хранению радиоактивных отходов низкой и средней активности в приповерхностных хранилищах. Был введён в эксплуатацию в феврале 1962 года. Основными источниками выбросов долгоживущих радионуклидов в атмосферу являются установки сжигания и битумирования радиоактивных отходов и градирня – основной путь поступления ^{3}H в атмосферу. Источники выбросов низкие (не выше 26 м над поверхностью земли) (Радиационная обстановка …, 2012). Величины сбросов и выбросов с ЛО ФГУП РосРАО приведены в таблице 4 по данным НПО Тайфун (Радиационная обстановка …, 2010; Радиационная обстановка …, 2012; Радиационная обстановка …, 2014).

Таблица 3

Выброс и сброс радионуклидов с ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова, Бк

Наименование радионуклида	Допустимый выброс	Фактический выброс			
		2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.
Выбросы в атмосферу					
^{89,90}Sr	$5{,}92\times10^{7}$	$1{,}5\times10^{4}$	$1{,}8\times10^{4}$	$8{,}4\times10^{4}$	$19{,}3\ 10^{4}$
^{137}Cs	$1{,}74\times10^{8}$	$1{,}9\times10^{4}$	$7{,}5\times10^{4}$	$1{,}4\times10^{5}$	$4{,}4\ 10^{5}$
Сумма ИРГ	$1{,}2\times10^{13}$	$6{,}0\times10^{11}$	$1{,}1\times10^{12}$	$9{,}6\times10^{11}$	$7{,}8\ 10^{11}$
Сбросы в открытую гидрографическую сеть					
^{60}Co	$6{,}1\times10^{6}$	$2{,}4\times10^{3}$	$5{,}9\times10^{2}$	н/д	$1{,}6\times10^{4}$
^{89,90}Sr	$1{,}3\times10^{6}$	$2{,}6\times10^{5}$	$2{,}1\times10^{5}$	$1{,}4\times10^{5}$	$3{,}0\times10^{5}$
^{134}Cs	$7{,}6\times10^{5}$	–	–	$1{,}3\times10^{5}$	$3{,}6\times10^{4}$
^{137}Cs	$8{,}0\times10^{5}$	$5{,}7\times10^{5}$	$7{,}0\times10^{5}$	$5{,}5\times10^{5}$	$3{,}0\times10^{5}$
^{3}H	$2{,}4\times10^{12}$	$1{,}6\times10^{11}$	$1{,}2\times10^{11}$	$2{,}5\times10^{8}$	$7{,}1\times10^{9}$

Таблица 4

Выброс и сброс радионуклидов с ЛО ФГУП РосРАО, Бк

Наименование радионуклида	Допустимый выброс	Фактический выброс, Бк				Изменение (+)/(-) 2013 г./2012 г.
		2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	
^{90}Sr	$4{,}21\times10^{8}$	$3{,}8\times10^{7}$	$3{,}9\times10^{7}$	$37{,}2\times10^{7}$	$3{,}4\times10^{8}$	$-2{,}80\times10^{7}$
^{137}Cs	$5{,}26\times10^{8}$	$4{,}8\times10^{7}$	$4{,}9\times10^{7}$	$4{,}7\times10^{8}$	$4{,}3\times10^{8}$	$-3{,}50\times10^{7}$
^{210}Po	$1{,}75\times10^{7}$	$1{,}1\times10^{7}$	$1{,}2\times10^{7}$	$1{,}1\times10^{7}$	$0{,}50\times10^{7}$	$-5{,}50\times10^{6}$
Σ изотопов плутония	$1{,}76\times10^{7}$	$1{,}1\times10^{7}$	$1{,}2\times10^{7}$	$1{,}1\times10^{7}$	$0{,}50\times10^{7}$	$-5{,}50\times10^{6}$
^{210}Pb	$3{,}7\times10^{15}$	$9{,}7\times10^{6}$	$1{,}1\times10^{8}$	$9{,}3\times10^{7}$	$8{,}6\times10^{7}$	$-7{,}00\times10^{6}$
^{3}H	$2{,}4\times10^{13}$	$8{,}7\times10^{11}$	$7{,}9\times10^{11}$	$1{,}4\times10^{12}$	$4{,}3\times10^{12}$	$-6{,}30\times10^{11}$
Σ α-активных нуклидов	$4{,}6\times10^{7}$	$2{,}6\times10^{7}$	$2{,}3\times10^{7}$	$2{,}47\times10^{7}$	$2{,}4\times10^{7}$	0,00
Σ β-активных нуклидов	$1{,}2\times10^{9}$	–	$7{,}7\times10^{7}$	$1{,}6\times10^{8}$	$1{,}6\times10^{8}$	0,00

С 1995 г. в санитарно-защитной зоне ЛАЭС (на территории ЛСК Радон – ЛО СЗТО РосРАО, а позже – на территории ЛАЭС) закрытым акционерным обществом Экомет-С начаты работы по переплавке и дезактивации медно-никелевых металлических отходов, содержащих радиоактивные вещества. С 2001 г. в приземную атмосферу с газоаэрозольными выбросами ЗАО Экомет-С в разрешённых пределах стал поступать ^{226}Ra, разрешён также выброс смеси изотопов $^{238+235}$U (Радиационная обстановка ..., 2012).

Анализ данных о фактических поступлениях радиоактивных веществ в приземную атмосферу с локальных радиационных объектов рассматриваемой территории показывает, что газоаэрозольные выбросы локальных РО были ниже допустимых/разрешённых уровней. Ежегодные выбросы инертных радиоактивных газов с локальных радиационных объектов (РО) на несколько порядков величины превышают выброс других радионуклидов; основным локальным источником поступления в приземную атмосферу ИРГ являются выбросы действующих энергоблоков ЛАЭС.

Основным нуклидом, поступающим в прибрежные воды Копорской губы Финского залива с локальных радиационных объектов, является ^{3}H. Сбрасываемая активность ^{3}H

существенно (на 5-6 порядков) превышает активность других (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{60}Co,) нуклидов.

Основными источниками сброса ^{3}H в природные воды являются НИТИ и ЛО СЗТО «РосРАО», с которых ^{3}H поступает примерно в одинаковых количествах. Данных по поступлениям в Копорскую губу ^{3}H с ЛАЭС нет (Комплексное экологическое обследование ..., 2013).

Как уже отмечалось, после снятия с эксплуатации 4 блоков РБМК-1000 в эксплуатации будут находиться 4 блока ВВЭР 1200 (ЛАЭС-2). Это существенно изменит суммарные газоаэрозольные выбросы в окружающую среду и изменит радиоэкологическую ситуацию в районе АЭС. Планируемые выбросы ЛАЭС-2 приведены в таблице 5.

Таблица 5

Планируемые выбросы радионуклидов в атмосферу на ЛАЭС-2, ГБк

Радионуклиды	Выброс, ГБк/год	Радионуклиды	Выброс, ГБк/год
H-3	$1{,}6\times10^{4}$	I-131	$3{,}0\times10^{-1}$
C-14	$1{,}2\times10^{3}$	I-132	$4{,}2\times10^{-1}$
Kr-83m	$2{,}8\times10^{3}$	I-133	$5{,}9\times10^{-1}$
Kr-85m	$9{,}1\times10^{3}$	I-134	$2{,}7\times10^{-1}$
Kr-85	$1{,}4\times10^{3}$	I-135	$4{,}8\times10^{-1}$
Kr-87	$5{,}8\times10^{3}$	Cr-51	$3{,}2\times10^{-4}$
Kr-88	$2{,}1\times10^{4}$	Mn-54	$2{,}0\times10^{-5}$
Xe-131m	$1{,}0\times10^{3}$	Co-60	$1{,}3\times10^{-4}$
Xe-133	$1{,}1\times10^{5}$	Sr-89	$1{,}4\times10^{-3}$
Xe-135	$3{,}1\times10^{4}$	Sr-90	$2{,}6\times10^{-6}$
Xe-138	$1{,}2\times10^{3}$	Cs-134	$8{,}4\times10^{-2}$
Σ ИРГ	$1{,}9\times10^{5}$	Cs-137	$1{,}3\times10^{-1}$

Суммарная активность газоаэрозольных выбросов радионуклидов составит $1{,}9\times10^{5}$, при этом вклад ИРГ в выбросе будет составлять около 95 %. В целом, выбросы ЛАЭС-2 должны остаться на уровне выбросов ЛАЭС при увеличении суммарной мощности АЭС примерно на 20 %.

Природно-климатическая характеристика района расположения Ленинградской АЭС

Геоботаническое районирование

По геоботаническому районированию Нечерноземья Европейской части РСФСР (1989) территория 30-км зоны вокруг ЛАЭС относится к Прибалтийско-Ленинградскому округу полосы южно-таёжных лесов Северо-двинско-Верхнеднепровской подпровинции Североевропейской таёжной провинции. Округ расположен между берегом Финского залива и Балтийско-Ладожским уступом (глинтом) и представляет террасированную равнину.

Для низкой литориновой террасы характерно участие в растительном покрове сосновых (*Pinus sylvestris*) лесов сухотравных, брусничных (*Vaccinium vitis-idaea*), вересковых (*Calluna vulgaris*), отчасти лишайниковых на песчаных береговых валах и небольших дюнах. Еловые (*Picea abies*) леса кисличные (*Oxalis acetosella*) и черничные (*Vaccinium myrtillus*) сохранились местами лишь в западной части округа. Кое-где встречаются остатки широколиственных рощ с дубом (*Quercus robur*), клёном (*Acer platanoides*), липой (*Tilia cordata*) и ольхой чёрной (*Alnus glutinosa*).

Естественная растительность 2-й и 3-й террас в районе Санкт-Петербурга и его окрестностей почти полностью уничтожена и большей частью заменена парками, садами, пашнями и лугами, отчасти

мелколиственными лесами. В западной части округа естественный растительный покров сохранился лучше. Здесь на 2-й и 3-й террасах широко распространены долгомошные (*Polytrichum*) и сфагновые (*Sphagnum*) еловые леса и встречаются крупные сфагновые верховые болота. К наиболее приподнятым междуречьям, сложенным мореной, приурочены ельники, преимущественно черничные и кисличные, нередко с липой, клёном, лещиной (*Corylus avellana*), реже с дубом и ясенем (*Fraxinus excelsior*). Песчаные участки на междуречьях заняты сухими сосновыми борами, а в полосе, прилегающей к Ордовикскому плато, произрастают сложные сосняки с дубом, липой и участием дубравных элементов в травяном покрове. У подножия глинта и в долинах рек встречаются ельники и черноольшаники с крупнотравьем и кустарниками, а по склонам террас – остатки еловых лесов с участием липы, вяза (*Ulmus laevis*), лещины, дуба. На склоне глинта распространены мелколиственные леса, в основном сероольщанники (*Alnus incana*). В долинах рек, текущих по склону на выходах известняков, встречаются участки вязовых лесов с липой, лещиной, неморальными травянистыми видами.

Средняя лесистость Ломоносовского района – около 50 %; под сельскохозяйственными землями занята около ¼ территории. Болота занимают не более 5 % площади. Они сосредоточены главным образом на местах бывших озёр на верхней террасе предглинтовой равнины.

Луга в районе главным образом суходольные и пойменные, в прибрежной полосе имеются большие заросли тростника (*Phragmites australis*), камыша (*Scirpus sylvaticus*) и осок (*Carex*).

Обследованная территория 30-км зоны вокруг ЛАЭС характеризуется давней освоенностью и довольно активным хозяйственным и рекреационным использованием. В зоне находятся несколько разрабатываемых карьеров строительных материалов, в которых ведутся активные работы. Некоторые старые, обводнённые карьеры используются как зоны отдыха.

Леса, близко расположенные к населённым пунктам, дачным участкам и зонам отдыха, активно посещаются рекреантами. Местами они замусорены, много кострищ, есть обгоревшие деревья. Болота с ягодниками также активно посещаются населением.

Таким образом, растительный покров территории зоны мониторинга соответствует зонально-провинциальным условиям Прибалтийско-Ленинградского округа полосы южно-таёжных лесов.

Существующая степень нарушенности растительности связана с рекреационной деятельностью, дачным строительством и разработкой карьеров. В настоящее время рекреационная нагрузка на экосистемы территории и, в том числе, на растительность, усиливается. В целом степень нарушенности растительных сообществ можно считать умеренной, о чём косвенно свидетельствует нахождение охраняемых видов во многих обследованных сообществах. Исключение составляют участки активного отдыха, здесь отмечена замусоренность и вытоптанность напочвенного покрова лесных сообществ; рядом с дачными участками есть стихийные свалки мусора.

Характеристика почвенного покрова

Согласно почвенно-географическому районированию Европейской части России, территория исследования принадлежит к подзоне дерново-подзолистых почв южной тайги и относится к Прибалтийской провинции дерново-подзолистых слабогумусированных и болотно-подзолистых почв.

Основной фон почвенного покрова составляют дерново-подзолистые почвы и дерново-подзолы различной степени оподзоленности, а структура и состав почвенных компонентов (болотно-подзолистых, болотных, дерново-глеевых, дерново-карбонатных, аллювиальных и болотных почв) определяются орографическими и литологическими особенностями местности.

Особенностями условий почвообразования в зоне наблюдения ЛАЭС являются:

• разнообразие геоморфологических условий, господство на западе низменных равнин, что обусловливает широкое развитие гидроморфных и полугидроморфных почв;

• пестрые почвообразующие породы – озёрно-ледниковые, древнеаллювиальные и современные аллювиальные отложения, моренные суглинистые отложения и флювиогляциальные завалуненные супеси, ордовикские известняки;

• промывной тип водного режима почв, формирование водозастойного режима на плоских поверхностях, постилаемых плотными породами;

• растительность представлена хвойно-широколиственными лесами, вторичными березняками и осинниками; на песчаных отложениях развиты сосняки с примесью ели, берёзы и осины; к заболоченным территориями приурочены угнетённые берёзово-сосновые леса со сплошными сфагновым напочвенным покровом;

• формирование почв происходит под действием трёх основных почвообразующих процессов: подзолистого (альфегумусового), дернового и болотного, которые накладываются друг на друга;

• земледельческая освоенность района достаточно высокая на востоке в пределах Ижорского плато, где сельскохозяйственные угодья и залежные земли приурочены к населённым пунктам.

Условия почвообразования тесно связаны с почвообразующими породами, поэтому почвенный покров территории исследования может быть разделён на два основных участка: Ижорскую возвышенность с господством дерново-подзолистых суглинистых почв и морскую (предглинтовую) равнину с фоновыми почвами – дерново-подзолами, сформировавшимися на песках разного генезиса. Болотные почвы распространены особенно широко на морской равнине, хотя встречаются и на выположенной возвышенности.

Анализ радиоэкологической обстановки в районе размещения Ленинградской АЭС

Радиационный фон в зоне ЛАЭС

Мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в зоне наблюдения измерялась в точках отбора проб с использованием ДРГ-01Т и на различном расстоянии от АЭС с использованием дозиметра МКС-01 «Сталкер», установленного на транспортном средстве со скоростью в среднем 40–60 км/ч, с регистрацией значений МАЭД по маршруту (рис. 3).

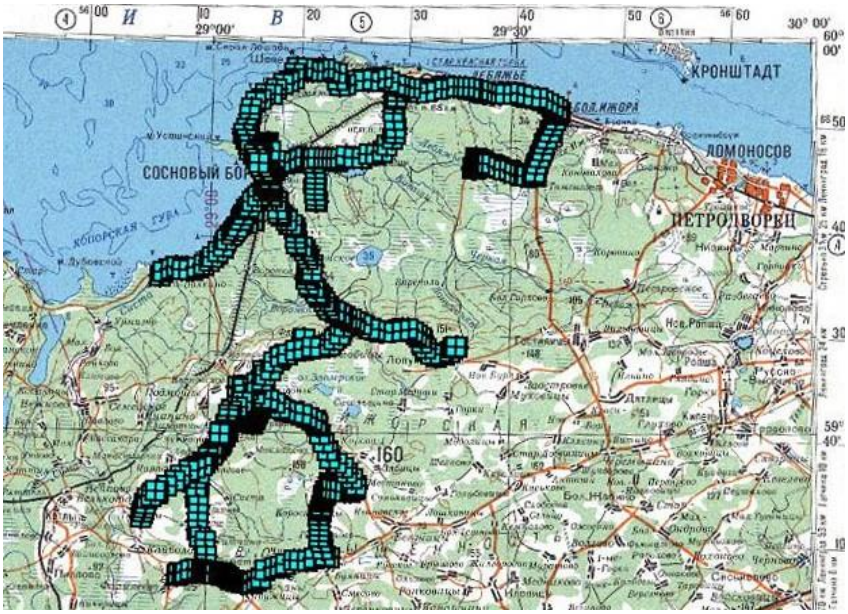


Рисунок 3. Карта точек измерения МАЭД с использованием дозиметра МКС-01 «Сталкер»

Маршрут определялся в соответствии с масштабом съёмки обследуемой территории, технической возможностью и местными условиями измерения МАЭД на территории зоны наблюдения не выявили достоверных различий в величине мощности

дозы (Проведение комплексного ..., 2013). Уровень МАЭД гамма-излучения на территории в радиусе 30 км от ЛАЭС-2 находится в пределах 0,09–0,14 мкЗв/ч. Наблюдается незначительное (до 10 %) увеличение средних значений МАЭД в южном и юго-западном направлении на расстоянии свыше 20 км от ЛАЭС. Данное увеличение обусловлено как геофизическим фактором (повышенное содержание естественных радионуклидов на Ижорской возвышенности), так и следом чернобыльских выпадений.

Содержание радионуклидов в почвах и растительности

По данным гамма-спектрометрического анализа проб почвы, проведённого лабораторией внешней дозиметрии ЛАЭС (Радиационная обстановка ..., 2010; Радиационная обстановка ..., 2011; Радиационная обстановка ..., 2012; Радиационная обстановка ..., 2013; Радиационная обстановка ..., 2014), основным техногенным радионуклидом в почве санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения является ^{137}Cs. В ЗН, непосредственно возле площадки ЛАЭС, содержание ^{137}Cs составляет 2,3–2,9 кБк/м^2, что соответствует уровням глобального выпадения на настоящее время (1,1–3,7 кБк/м^2). Содержание ^{40}Co в пробах почвы было ниже минимально детектируемой активности.

Содержание естественных радионуклидов в почвах сельскохозяйственных угодий составляет для ^{40}K – 750–990 Бк/кг, для ^{226}Ra – 19–57 Бк/кг, для ^{232}Th – 22–45 Бк/кг сухой массы. При этом наименьшее содержание ^{226}Ra и ^{232}Th отмечено для супесчаной почвы, а более высокие – для суглинистой почвы. Уровень загрязнения сельскохозяйственных почв в 30-км зоне наблюдения ^{137}Cs обусловлен чернобыльскими выпадениями и составляет для ЗАО «Копорье» 8–15 кБк/м^2, для ЗАО «Котельское» в районе МТФ Удосолово – 20 кБк/м^2, для ЗАО «Гомонтово» в районе МТФ Местаново – 22 кБк/м^2.

Содержание природных радионуклидов (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) в почве менее вариабельно, чем содержание ^{137}Cs, что обусловлено влиянием чернобыльских выпадений, особенно заметных по направлению к югу и юго-западу от ЛАЭС-2 и характерно увеличивающихся до 20 кБк/м^2 при удалении от ЛАЭС-2 (рис. 4). В процессе полевых исследований заложены площадки мониторинга в зоне воздействия АЭС. Сеть мониторинга включает 9 площадок в естественных наземных экосистемах, выбранных по результатам обследования территории в зоне наблюдения АЭС, с некоторыми дополнениями и корректировками.

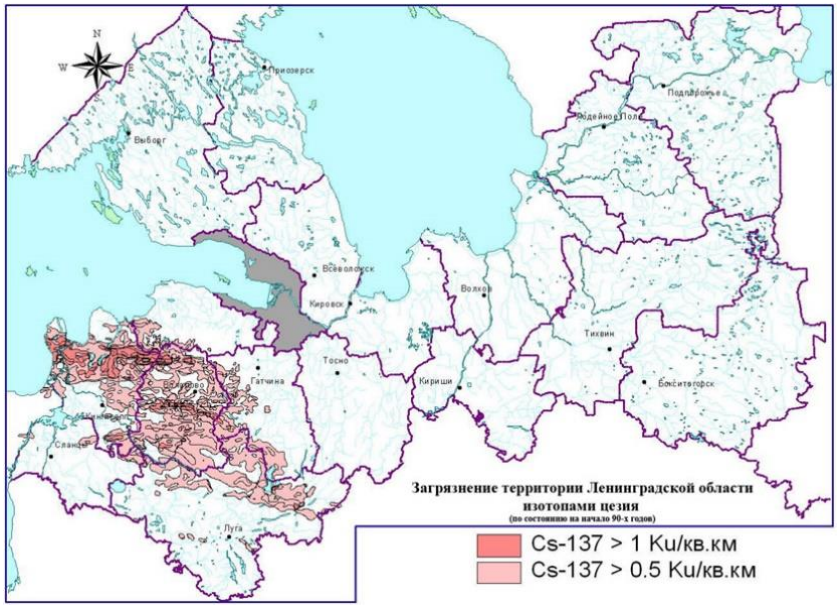


Рисунок 4. Радиоактивное загрязнение ^{137}Cs Ленинградской области в результате чернобыльских выпадений (Техногенная радиоактивность ..., 2020)

Площадки заложены в пяти лесных, двух луговых и двух болотных экосистемах, расположенных в зоне воздействия АЭС на разном удалении от станции (рис. 5).

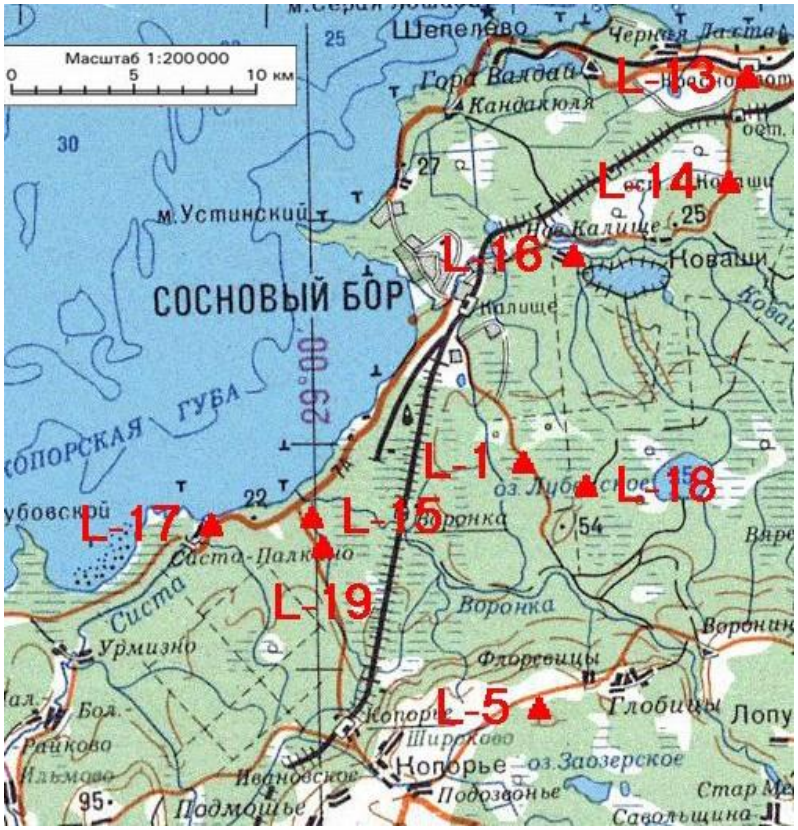


Рисунок 5. Расположение ППП мониторинга природных наземных экосистем. Масштаб 1:200000

Площадки фиксировались на местности. На каждой площадке составлялась картосхема (в масштабе 1:100), на которой отмечалось положение древесных и кустарниковых пород, а также микрогруппировок нижних ярусов.

- Точка L-1. Лес липово-еловый с единичной березой, широкотравно-кисличный.
- Точка L-5. Лес осиново-берёзовый, с ольхой серой во втором ярусе, с густым подростом рябины, широкотравный с папоротниками.
- Точка L-13. Сосняк с единичной берёзой марьянниково-черничный зеленомошный.
- Точка L-14. Болото осоково-пушицевое с кустарничками сфагновое с единичной сосной (Сюрьевское).
- Точка L-15. Долинный ольшаник с единичной черёмухой, с густым подростом черёмухи и ольхи, с малиной в окнах, хвощёво-звездчатковый.
- Точка L-16. Пойменный луг высокотравный (р. Коваши).
- Точка L-17. Сосняк с дубом и ольхой чёрной с густым подростом рябины, черничник с ландышем и кислицей (побережье залива, рекреационная зона).
- Точка L-18. Болото осоково-пушицевое с кустарничками сфагновое (в районе озера Лубенское).
- Точка L-19. Пойменный луг высокотравный (р. Копорка).

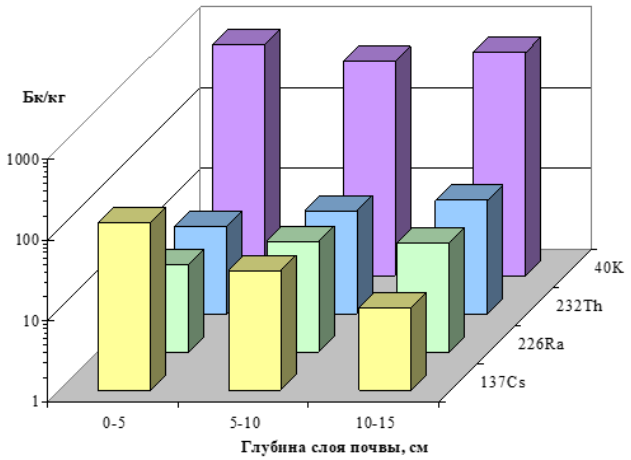
Выбранные площадки характеризуют основные растительные сообщества территории зоны воздействия (рис. 6 и 7).

Результаты определения удельной активности радионуклидов в пробах почвы позволили определить плотность загрязнения пробных площадок ^{137}Cs и проанализировать вертикальную миграцию радионуклидов на пробных площадках (рис. 8).

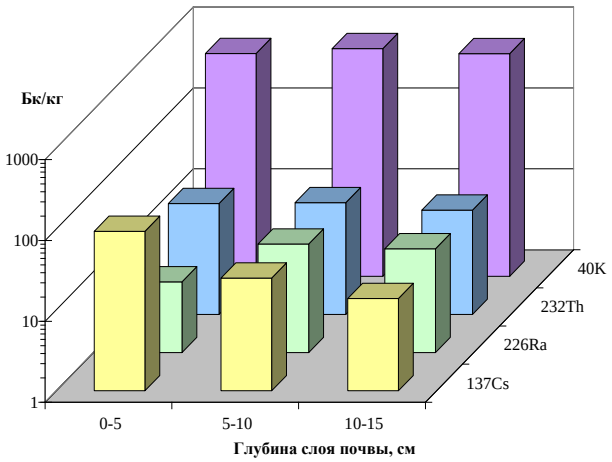
Рисунок 6. Площадка L-1. Отбор проб и геоботаническое описание площадки

Рисунок 7. Площадка L-18. Отбор проб растительности

L-13 *– Сосняк чернично-мшистый*



L-15 *– Ольшаник на террасе реки Копорки*



L-16 *– Пойменный луг, высокотравный*

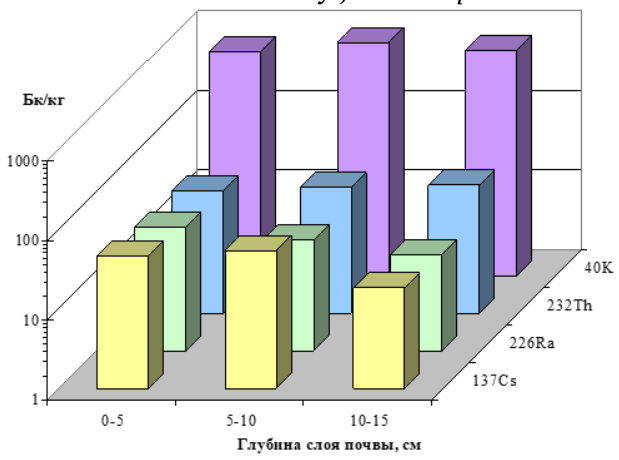


Рисунок 8. Вертикальное распределение радионуклидов по профилю почвы для пробных площадок на естественных угодьях

Из рисунка видно, что распределение естественных радионуклидов по слоям почвы относительно равномерно, а для ^{137}Cs распределение по профилю почвы обусловлено процессами миграции. На склонах и в пойме рек повышенная вертикальная миграция привела к более равномерному распределению радионуклида в верхнем 20 см слое почвы. Постоянный процесс торфообразования на болотах привёл к равномерному распределению ^{137}Cs на глубину до 40 см. Следует отметить и неравномерность загрязнения ^{137}Cs после чернобыльских выпадений (табл. 6).

^{90}Sr показывает значительно большую подвижность при вертикальной миграции, чем ^{137}Cs. Так, в ольшанике на террасе реки Копорка ^{90}Sr равномерно распределён в верхнем 15 см слое (табл. 7), в то время как 90 % ^{137}Cs находится в верхнем 4 см слое почвы (рис. 8). Другие точки отбора также показывают равномерное распределение по глубине почвы до 15 см, а для верховых болот и до глубины 30–40 см.

В лесных экосистемах миграция, распределение и накопление радионуклидов имеют свои особенности. В начальный период после выпадения радиоактивных веществ преобладает миграция «сверху-вниз», т.е. перемещение радионуклидов из крон под полог леса. Через некоторое время основная масса радионуклидов концентрируется в верхней органической части или в подстилке и начинается миграция из подстилки в минеральные слои почвы.

Таблица 6

Плотность загрязнения почвы ^{137}Cs, кБк/м^2

Место отбора	Характеристика	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Сред.	Станд. откл.	Коэф. вариации, %	Мин.–Макс.
L-13	Сосняк чернично-мшистый	5	3,4	1,5	3,6	1,4	38	1,8–5,4
L-14	Верховое болото	3	1,6	1,2	1,6	0,3	20	1,3–2,0
L-15	Ольшаник на террасе реки Копорки	4	8,0	1,2	8,2	2,4	29	6,8–11,8
L-16	Пойменный луг, высокотравный	5	5,2	1,1	5,2	0,6	12	4,4–6,0
L-17	Сосняк сложный (чернично-кисличный с ландышем)	5	8,0	1,4	8,6	3,5	41	5,5–13,0
L-18	Верховое болото	3	2,2	1,1	2,2	0,2	7	2,0–2,3
L-19	Высокая пойма. Злаково-таволговое высокотравье	5	11	1,2	11,1	1,6	14	8,4–12,2
L-1	Лес липово-еловый	4	3,4	1,9	4,1	2,6	64	1,3–7,6
L-5	Лес берёзово-ольховый на водоразделе	5	8,2	1,2	8,4	1,8	21	5,9–10,4

Таблица 7

Удельная активность $^{239,\,240}$Pu и ^{90}Sr в пробах почвы зоны наблюдения ЛАЭС-2, Бк/кг

Место отбора	Характеристика	Вид пробы	Концентрация, Бк/кг	
			$^{239,\,240}$Pu	^{90}Sr
LEN-11	Заболоченный сосняк	Почва, 0–20 см	0,41±0,03	2,7±0,2
LEN-14	Верховое болото	Почва, глубина 20 см	0,11±0,01	3,1±0,4
L-14	Верховое болото	Почва 0–10 см	–	39,2±5,5
L-14	Верховое болото	Почва 10–20 см	–	34,3±4,8
L-14	Верховое болото	Почва 20–30 см	–	28,7±4,0
L-15	Ольшаник на террасе реки	Почва 0–5 см	–	5,4±0,8
L-15	Ольшаник на террасе реки	Почва 5–10 см	–	7,3±1,0
L-15	Ольшаник на террасе реки	Почва 10–15 см	–	6,4±0,9
L-17	Сосняк	Почва 0–5 см	–	1,5±0,2
L-17	Сосняк	Почва 5–10 см	–	2,7±0,4
L-17	Сосняк	Почва 10–15 см	–	2,3±0,3
L-18	Верховое болото	Почва 0–10 см	–	19,1±2,7
L-18	Верховое болото	Почва 10–20 см	–	25,5±3,6
L-18	Верховое болото	Почва 20–30 см	–	23,3±3,3
L-18	Верховое болото	Почва 30–40 см	–	34,7±4,9

На миграцию радионуклидов вглубь по профилю почвы влияют следующие факторы:

- плотность загрязнения лесного массива (с увеличением плотности загрязнения миграция возрастает, например, ^{137}Cs поразному мигрирует в почвах-грунтах в зависимости от того, в каком количестве

находится в них: поведение цезия в системе необменное при микроконцентрациях и обменное в области макроконцентраций);

• химические свойства радионуклидов (интенсивность миграции ^{90}Sr значительно выше, чем ^{137}Cs, так как ^{90}Sr находится в более подвижных формах);

• толщина и степень сформированности лесной подстилки (в молодых лесах с плохо разложившейся подстилкой идёт активнее);

• состав и возраст насаждений (в лиственных лесах происходит ежегодный сброс листьев и быстрая минерализация опада);

• гранулометрический состав почвы (в лесах, произрастающих на песчаных и торфяных почвах, миграция интенсивнее);

• режим увлажнения (на гидроморфных почвах с хорошим торфяным слоем идёт активная миграция из подстилки в минеральные слои почвы).

Плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs в почве зоны наблюдения варьирует от 1,7 до 19,8 кБк/м^2. Превышения уровня глобального фона обусловлены в основном чернобыльскими выпадениями, что подтверждается высоким соотношением содержания ^{137}Cs к ^{90}Sr в почве. Результаты анализа точек мониторинга по плотности загрязнения почв ^{137}Cs зоны наблюдения представлены выше в таблице 6 и на рисунке 9.

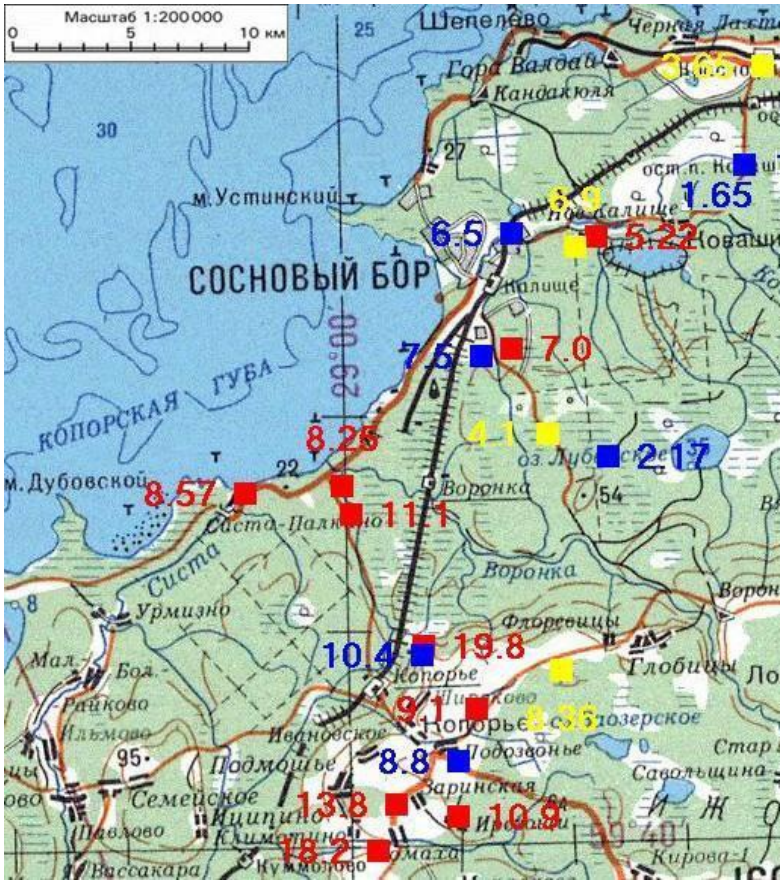


Рисунок 9. Плотности поверхностного загрязнения ^{137}Cs в зоне наблюдения ЛАЭС, кБк/м^2.
Синим цветом *представлены точки отбора, для которых соотношение содержания в почве ^{137}Cs к содержанию ^{90}Sr меньше 7,* ***красным цветом*** *– больше 10,* ***жёлтым цветом*** *представлены точки, для которых содержание ^{90}Sr не определялось*

Содержание радионуклидов в компонентах естественных экосистем обусловлено уровнем загрязнения почвы. И в ближайшей окрестности от ЛАЭС (до 5 км) удельная активность ^{137}Cs в пробах соответствует уровню глобальных выпадений. Однако в зоне наблюдения АЭС содержание ^{137}Cs в компонентах наземных экосистем уже обусловлено фактором чернобыльских выпадений. Наибольшие концентрации ^{137}Cs в

компонентах естественных экосистем отмечены для грибов на болоте – до 5,4 кБк/кг сухой массы, на этом же уровне находится накопление и в ягодах: морошка – 4,7 кБк/кг, черника – 1,7 кБк/кг сухой массы при плотности загрязнения территории ^{137}Cs 9 кБк/м^2.

В гидроморфных условиях леса накопление ^{137}Cs в данных компонентах экосистемы чуть ниже, для плотности загрязнения территории 4 кБк/м^2 содержание в грибах составляет 1,2 кБк/кг сухой массы. А в автоморфных условиях при плотности загрязнения территории 9 кБк/м^2 содержание в грибах составляет только 0,15 кБк/кг сухой массы Рассчитанные по представленным данным коэффициенты перехода ^{137}Cs для компонентов лесных экосистем представлены в таблице 8.

Таблица 8

Коэффициенты перехода ^{137}Cs для компонентов лесных экосистем, n×10^{-3} м^2/кг

Вид пробы	Условия произрастания		
	Болото	Переувлажнённый лес	Сухой лес
Грибы	593	178–269	17,2
Морошка	509	–	–
Черника	190	35,9	31,1
Мох	87–147	–	18,1
Кустарнички	–	–	25,3
Травянистая растительность	88–124	8,3–85	0,16–1,69
Хвоя сосны 1 год	–	13,7	1,16
Хвоя 2 года	–	4,9	0,72
Хвоя 3 года	–	2,9	0,30
Ветки сосны	–	2,3	0,89

Наибольшие коэффициенты накопления характерны для грибов и ягод, произрастающих на болоте. В целом гидроморфные условия произрастания увеличивают коэффициенты перехода ^{137}Cs в несколько раз. Для автоморфных условий коэффициенты перехода ^{137}Cs для грибов, ягод и кустарничков находятся на уровне 17–31×10^{-3} м^2/кг, для травянистой растительности – 0,16–1,69×10^{-3} м^2/кг, для хвои сосны в зависимости от возраста – 0,3–1,16×10^{-3} м^2/кг.

Результаты определения удельной активности радионуклидов в пробах сельскохозяйственной продукции и кормах представлены в таблицах 9–10.

В результате исследований местной сельскохозяйственной продукции и кормов, очевидно, что содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в среднем на несколько порядков ниже установленных нормативов по СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002; СанПин 2.3.2.2650-10, 2010). Обращает на себя внимание достаточно высокое содержание ^{3}H и ^{14}C, достигающее десятков Бк/кг в продукции. Результаты анализа содержания природных и техногенных радионуклидов в местных продуктах питания в зоне наблюдения представлены в таблицах 11–12. Содержание ^{137}Cs в молоке не превышает 0,21 Бк/кг, ^{90}Sr – 0,15 Бк/кг. Содержание данных радионуклидов в сене и кормовых травах находится в пределах 0,1–6,1 Бк/кг и 0,06–1,2 Бк/кг соответственно. В зерне 0,1–0,7 Бк/кг и 0,1–0,68 Бк/кг соответственно.

Содержание радионуклидов в силосе соответствует содержанию в кормовых травах с учётом влажности. В пробах растительности отмечено содержание ^{7}Be в пределах 44–135 Бк/кг. Удельное содержание ^{90}Sr и ^{239,240}Pu в травостое соответствует содержанию данных радионуклидов в травянистой растительности автотрофных естественных экосистем. Все пробы заведомо не превышают нормативов СанПиН (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) и ВП (ВП 13.5.13/06-01, 2000).

Таблица 9

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в пробах сельскохозяйственной продукции, Бк/кг естественной влажности

Радионукл.	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Среднее	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{137}Cs	Молоко	6	0,07	2,20	0,10	0,07	0,03	0,21
^{90}Sr		6	0,07	1,52	0,08	0,04	0,04	0,15
^{3}H		6	9,2	2,4	13,6	12,8	3,1	34
^{14}C		5	21,9	2,1	27,1	16,2	5,4	51
^{40}K		7	48,2	1,1	48,4	3,7	43	55
^{226}Ra		1	–	–	0,2	–	–	–
^{228}Ra		1	–	–	0,3	–	–	–
^{137}Cs	Свинина	3	0,2	1,2	0,2	0,06	0,19	0,30
^{90}Sr		1	–	–	0,38	–	–	–
^{3}H		1	–	–	8,1	–	–	–
^{14}C		1	–	–	33	–	–	–
^{40}K		3	86,7	1,0	86,8	5,0	82	92
^{137}Cs	Зерно (пшеница)	2	0,2	–	0,2	0,0	0,2	0,2
^{90}Sr		3	0,30	2,25	0,40	0,29	0,10	0,68
^{3}H		1	–	–	98	–	–	–
^{40}K		2	128		128	1,4	127	129
^{239,240}Pu		1	–	–	$5,4\times10^{-3}$	–	–	–
^{137}Cs	Зерно злаковых	3	0,3	2,0	0,4	0,3	0,1	0,7
^{90}Sr		4	0,51	1,09	0,51	0,05	0,47	0,59
^{3}H		1	–	–	81,7	–	–	–
^{40}K		3	151	1,1	151	19,7	139	174
^{239,240}Pu		1	–	–	$5,3\times10^{-3}$	–	–	–

Таблица 10

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в пробах кормов, Бк/кг естественной влажности

Радионукл.	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Среднее	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{137}Cs	Сено	4	1,4	2,7	2,3	2,6	0,4	6,1
^{90}Sr		4	0,95	1,26	0,97	0,23	0,65	1,20
^{3}H		1	–	–	92,2	–	–	–
^{14}C		2	92,9	–	95,4	30,2	74,0	116,7
^{40}K		4	561	1,4	600	246,8	351	893
^{239,240}Pu		2	$8,8\times10^{-3}$	–	$9,1\times10^{-3}$	$3,1\times10^{-3}$	$6,9\times10^{-3}$	$11,3\times10^{-3}$
^{137}Cs	Силос	4	0,6	2,5	1,0	1,2	0,3	2,8
^{90}Sr		5	0,12	2,17	0,17	0,15	0,06	0,40
^{3}H		4	52,2	1,4	55,5	22,8	31,9	86,7
^{14}C		3	83,6	1,3	86,1	24,1	60,0	107,4
^{40}K		4	55	1,7	62	32,8	26	103
^{239,240}Pu		2	$3,6\times10^{-3}$	–	$3,9\times10^{-3}$	$1,8\times10^{-3}$	$2,\times10^{-3}$	$5,1\times10^{-3}$
^{137}Cs	Зелёная масса	13	0,3	2,7	0,4	0,4	0,1	1,3
^{90}Sr		7	0,58	1,48	0,63	0,27	0,36	1,03
^{3}H		1	–	–	31,2	–	–	–
^{14}C		2	–	–	65	–	65	65
^{40}K		13	163	1,4	173	66,2	88	314
^{239,240}Pu		1	–	–	$46,8\times10^{-3}$	–	–	–

Таблица 11

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в сельскохозяйственных продуктах местного производства, 2013 г., Бк/кг

Радионукл.	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Сред.	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{137}Cs	Картофель	11	0,3	2,5	0,5	0,37	0,07	1
^{90}Sr		8	0,29	2,05	0,37	0,30	0,10	0,99
^{3}H		6	19,2	2,7	29,3	27,5	4,1	80,2
^{14}C		6	78,8	1,5	84,6	31,1	36,3	118,1
^{40}K		13	128	1,3	132	31,4	62	190
^{226}Ra		1	–	–	0.25	–	–	–
^{228}Ra		1	–	–	0.5	–	–	–
^{239,240}Pu		2	$2,4\times10^{-3}$	–	$2,8\times10^{-3}$	$2,1\times10^{-3}$	$1,3\times10^{-3}$	$4,3\times10^{-3}$
^{137}Cs	Свёкла	4	0,2	2,3	0,3	0,2	0,1	0,5
^{90}Sr		4	0,42	3,22	0,77	0,90	0,08	2,09
^{14}C		1	–	–	46	–	–	–
^{40}K		5	209	1,5	231	128,4	139	454
^{137}Cs	Лук зелён.	6	0,1	3,6	0,2	0,3	0,01	0,7
^{90}Sr		5	0,54	1,65	0,61	0,32	0,28	1,05
^{3}H		1	–	–	40,2	–	–	–
^{14}C		1	–	–	8,7	–	–	–
^{40}K		7	75	1,2	76	16,2	55	104
^{137}Cs	Огурцы	2	0,4	–	0,4	0,3	0,22	0,6
^{90}Sr		1	–	–	0,3	–	–	–
^{3}H		4	10,6	1,2	10,9	2,4	7,4	13,0
^{14}C		1	–	–	5,4	–	–	–
^{40}K		2	81	–	81	4,5	78	84
^{137}Cs	Редис	2	0,2	–	0,2	0,01	0,15	0,2
^{90}Sr		2	0,61	–	1,13	1,34	0,18	2,08
^{14}C		1	–	–	6,3	–	–	–
^{40}K		3	107	1,2	109	23,7	95	136
^{137}Cs	Морковь	2	0,3	–	0,3	0,13	0,20	0,4
^{90}Sr		2	0,51	–	0,53	0,18	0,40	0,65
^{14}C		1	–	–	61	–	–	–
^{40}K		2	124	–	125	21,1	110	140
^{226}Ra		1	–	–	0,2	–	–	–
^{228}Ra		1	–	–	0,6	–	–	–
^{137}Cs	Земл. сад.	3	0,1	2,4	0,2	0,11	0,03	0,2
^{90}Sr		2	0,28	–	0,28	0,01	0,27	0,29
^{40}K		3	33	1,5	35	14,6	20	49
^{3}H	Малина	1	–	–	5,5	–	–	–
^{14}C		1	–	–	109,1	–	–	–
^{137}Cs	Салат лист.	1	–	–	0,28	–	–	–
^{3}H		1	–	–	83,2	–	–	–
^{14}C		1	–	–	120	–	–	–
^{40}K		1	–	–	220	–	–	–
^{137}Cs	Укроп	2	0,3	–	0,6	0,68	0,11	1,1
^{90}Sr		1	–	–	4,27	–	–	–
^{3}H		1	–	–	5,7	–	–	–
^{14}C		1	–	–	11	–	–	–

Таблица 12

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в продуктах леса, 2013 г., Бк/кг

Нуклид	Вид пробы	Число проб	Геом. сред.	Геом. станд. откл.	Сред.	Станд. откл.	Диапазон	
							Мин.	Макс.
^{137}Cs	Морошка	3	339	1,8	410	316	188	772
^{90}Sr		1	–	–	0,28	–	–	–
^{3}H		1	–	–	5,1	–	–	–
^{40}K		2	91	–	91	13,2	82	100
^{228}Ra		1	–	–	6,4	–	–	–
^{137}Cs	Черника	8	39	2,1	57	69	18	224
^{90}Sr		1	–	–	0,13	–	–	–
^{3}H		4	7,6	1,6	8,6	5,6	5,2	17,1
^{14}C		3	21,6	2,4	32,5	35,4	9,0	73,2
^{40}K		5	35	1,3	36	7,9	22	40
^{239,240}Pu		1	–	–	$2{,}0\times10^{-3}$	–	–	–
^{137}Cs	Грибы	12	54	2,6	84	99	10	386
^{3}H		2	37	–	66	77	11,4	120
^{14}C		3	179	1,6	203	133	122	357
^{40}K		8	107	1,5	119	68,5	67	280
^{239,240}Pu		1	–	–	$2{,}4\times10^{-3}$	–	–	–

Как видно из представленных данных, содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в продуктах питания местного производства составляет в основном десятые доли Бк/кг, что на два порядка ниже установленных нормативов, за исключением дикорастущих грибов и ягод. В них концентрация ^{137}Cs может составлять десятки и сотни Бк/кг, иногда превышая нормативные значения. $^{239,\ 240}$Pu содержится в продуктах питания местного производства в незначительных количествах $(2{,}0–2{,}8)\times10^{-3}$ Бк/кг, соответствующих по содержанию в растительности после глобальных выпадений, в то же время содержание трития и углерода-14 может составлять десятки Бк/кг.

Дозы облучения населения

Оценка дозовых нагрузок была сделана на население, проживающее в непосредственной близости от площадки АЭС (МР 2.6.1.0063-12, 2013; IAEA, 2001). Дозовые нагрузки оценивались от каждого радионуклида через 45–50 лет нормальной эксплуатации атомной станции, предполагая, что в этот период вклад радионуклидов станционного происхождения будет максимальным. Для расчётов использовались данные по предполагаемым плановым и существующим газоаэрозольным выбросам, данные радиоэкологического мониторинга. Дозы облучения населения рассчитывали для двух сценариев работы ЛАЭС, включающих работу 4 энергоблоков типа РБМК-1000 (ЛАЭС) и 4 блоков ВВЭР-1200 (ЛАЭС-2). Оценка дозы внутреннего облучения за счёт ингаляционного и перорального поступления радионуклидов была выполнена также для различных возрастных групп населения. Среднегодовой объём вдыхаемого воздуха был принят равным 8400 м^3/год для взрослых старше 17 лет, 7336 м^3/год – для детей 12–17 лет, 5200 м^3/год – для детей 8–12 лет, 3197 м^3/год – для детей 2–7 лет и 1900 м^3/год – для детей в возрасте 1–2 год. Для оценки дозы облучения от перорального пути были использованы соотношения вкладов групп продуктов в рацион питания взрослых и детей (МТ 1.2.1.15.1176-2016, 2016; НТД 38.220.56-84, 1984).

Оценка доз существующего облучения на основе радиоэкологического обследования

Эффективные дозы облучения населения различных возрастных групп в районе расположения Ленинградской АЭС, рассчитанные на основе данных

радиоэкологического мониторинга, приведены в таблице 13, а вклад отдельных продуктов питания в формирование этих доз показан в таблице 14.

Таблица 13

Годовая доза облучения населения от техногенных радионуклидов в регионе расположения Ленинградской АЭС, мкЗв/год

Доза облучения	Городское население			Сельское население		
	>17 лет	8–12 лет	1–2 года	>17 лет	8–12 лет	1–2 года
от облака	$1{,}9\times10^{-2}$	$1{,}9\times10^{-2}$	$1{,}8\times10^{-2}$	$2{,}9\times10^{-2}$	$2{,}7\times10^{-2}$	$4{,}0\times10^{-2}$
от поверхности почвы	$2{,}1\times10^{1}$	$2{,}0\times10^{1}$	$2{,}0\times10^{1}$	$3{,}2\times10^{1}$	$2{,}9\times10^{1}$	$3{,}3\times10^{1}$
от погружения в воду*	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$
от продуктов питания	$4{,}3\times10^{1}$	$3{,}9\times10^{1}$	$4{,}2\times10^{1}$	$5{,}8\times10^{1}$	$4{,}8\times10^{1}$	$4{,}4\times10^{1}$
от ингаляции	$4{,}0\times10^{-2}$	$2{,}2\times10^{-2}$	$1{,}6\times10^{-2}$	$4{,}7\times10^{-2}$	$3{,}3\times10^{-2}$	$2{,}5\times10^{-2}$
Сумма	$6{,}5\times10^{1}$	$6{,}0\times10^{1}$	$6{,}3\times10^{1}$	$9{,}1\times10^{1}$	$7{,}7\times10^{1}$	$7{,}7\times10^{1}$

* И нахождении на поверхности воды

Данные таблиц 13 и 14 описывают ситуацию «существующего облучения», то есть реального облучения от техногенных радионуклидов, характерного для района расположения Ленинградской АЭС в настоящее время. Из приведённых данных видно, что определяющий вклад в формирование дозы вносят радионуклиды, находящиеся в верхнем слое почвы (внешнее облучение) – 32 % от суммарной дозы и радионуклиды, содержащиеся в продуктах питания – 67 %. Вклад других путей облучения: от радионуклидов, находящихся в нижних слоях атмосферы (включая дозу от облака и ингаляцию) и от радионуклидов в водной среде составляет менее 2 %.

Как для городского, так и для сельского населения наибольшие дозы получает взрослое население (старше 17 лет), что связано как с особенностями питания, так и большей значимостью ингаляционного пути облучения (Потребление продуктов питания …, 2013).

Таблица 14

Годовая доза облучения населения от потребления продуктов питания местного производства, мкЗв/год

Продукт питания	Городское население			Сельское население		
	>17 лет	8–12 лет	1–2 года	>17 лет	8–12 лет	1–2 года
Хлебные продукты	1,70	2,84	1,96	1,88	3,26	1,83
Картофель	4,99	6,03	$1{,}02\times10^{1}$	6,42	9,72	$1{,}02\times10^{1}$
Овощи и бахчевые	5,08	6,82	4,71	5,43	6,04	4,71
Мясо и мясопродукты	2,53	3,30	2,59	2,70	3,45	3,81
Молоко и мол. продукты	7,45	$1{,}06\times10^{1}$	$2{,}03\times10^{1}$	7,74	$1{,}34\times10^{1}$	$2{,}03\times10^{1}$
Рыба и рыбопродукты	$7{,}09\times10^{-1}$	$2{,}47\times10^{-1}$	$1{,}97\times10^{-1}$	$9{,}93\times10^{-1}$	$4{,}95\times10^{-1}$	$3{,}69\times10^{-1}$
Вода	$2{,}44\times10^{-1}$	$1{,}56\times10^{-1}$	$2{,}09\times10^{-1}$	$2{,}44\times10^{-1}$	$1{,}56\times10^{-1}$	$2{,}09\times10^{-1}$
Ягоды	$1{,}12\times10^{1}$	$8{,}81\times10^{-1}$	$2{,}16\times10^{-1}$	$2{,}24\times10^{1}$	1,76	$4{,}32\times10^{-1}$
Грибы	8,54	8,17	1,72	$1{,}03\times10^{1}$	9,53	1,72
Сумма	$4{,}3\times10^{1}$	$3{,}9\times10^{1}$	$4{,}2\times10^{1}$	$5{,}8\times10^{1}$	$4{,}8\times10^{1}$	$4{,}4\times10^{1}$

Из данных таблицы 13 видно, что дозы обучения от техногенных радионуклидов сельского населения на 30–40 % выше, чем городского. Как для сельского, так и городского населения, большие дозы облучения характерны для взрослого населения и детей младшего возраста. Более низкие дозы облучения отмечены для возрастной группы 8–12 лет. В первую очередь, отмеченные различия объясняются различным составом рациона питания разных возрастных групп и, в частности, более высоким потреблением взрослым население продуктов леса. Определённое влияние на отмеченные различия в дозах облучения оказывает и режим поведения населения.

Учитывая высокий вклад перорального пути в облучение населения, вклад пищевых продуктов в формирование облучения был рассмотрен более детально (табл. 14). Из данных таблицы 14 видно, что основной вклад в дозу перорального облучения взрослого населения вносят продукты леса.

По вкладу в дозу пищевые продукты можно представить в виде ряда: ягоды > грибы > молоко > овощи > картофель > мясо > хлеб > рыба > вода (рис. 10). Этот ряд представителен как для сельского, так и городского населения при условии, что в рационе питания будет дикорастущая ягода (морошка, черника), собранная на территории радиоактивного следа после чернобыльских выпадений. Садовая ягода содержит ^{137}Cs в незначительных концентрациях. Отмеченные закономерности можно объяснить отсутствием крупных населённых пунктов в зоне наблюдения Ленинградской АЭС, что делает различия в рационе питания в этой зоне менее выраженными.

Вклад основных дозообразующих радионуклидов в облучение городского и сельского населения показан на рисунке 11.

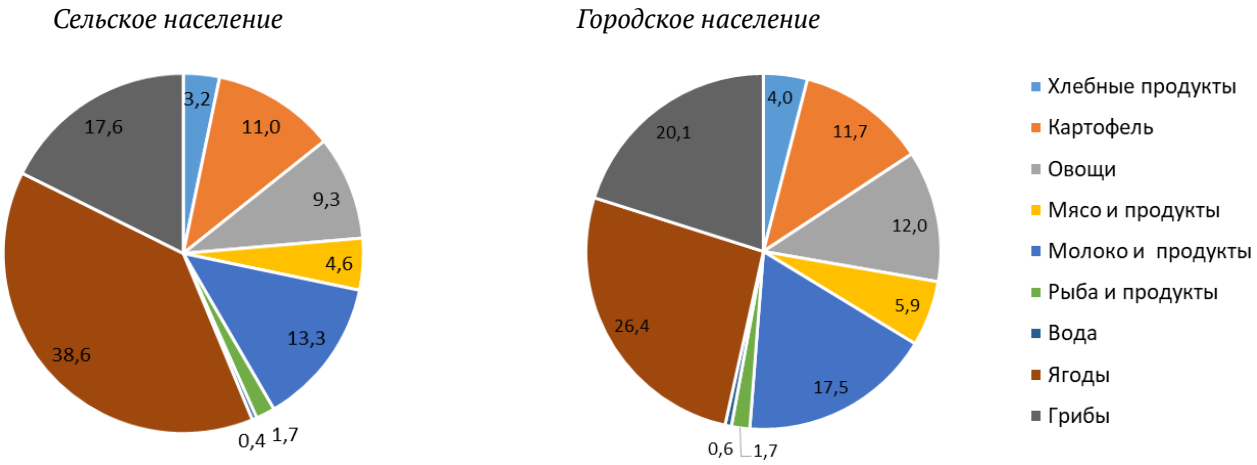


Рисунок 10. Вклад в дозу существующего облучения от основных продуктов питания и воды, %

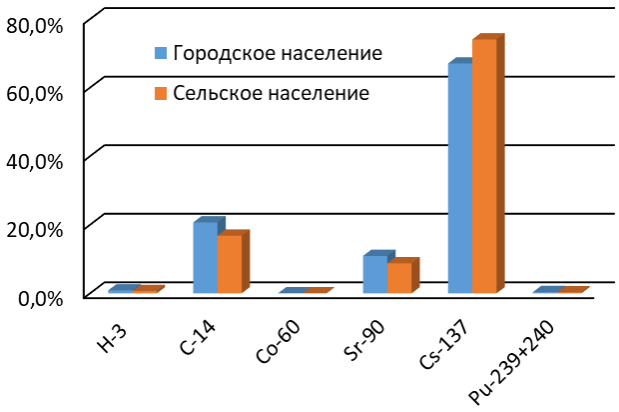


Рисунок 11. Процентный вклад дозообразующих техногенных радионуклидов в существующее облучение взрослого населения

Из рисунка 11 видно, что среди техногенных радионуклидов наибольший вклад (67 % – для городского населения и 74 % – для сельского населения) в существующее облучение вносит ^{137}Cs, в основном Чернобыльского происхождения. Вклад глобального ^{90}Sr существенно меньше и составляет 11 % для городского населения. Обращает на себя внимание довольно большой вклад в облучение, вносимый ^{14}C, который может быть как природного, глобального (в результате испытаний ядерного, термоядерного оружия) так и реакторного происхождения (Исследование содержания …, 2012).

Вклад ЛАЭС в существующее облучение населения

Существующее облучение населения определяется естественным радиационным фоном, формируемым внешним космическим излучением, природными радионуклидами (внешнее и внутреннее облучение) и техногенными радионуклидами, входившими в состав глобальных выпадений и продуктов деления, поступивших в окружающую среду в результате аварий. Одной из составляющей этого облучения является облучение населения в результате выбросов и сбросов АЭС. Ситуация существующего облучения включает все три этих компонента, и оценка воздействия действующего радиационно-опасного предприятия основывается на оценке вклада доз, формируемых станционными радионуклидами на фоне двух других источников облучения (Комплексная экологическая …, 2011). Важным источником облучения населения в зоне расположения ЛАЭС являются четыре ядерных энергоблока РБМК-1000, выбросы которых приведены в таблице 1. Годовые дозы от атмосферных выбросов ЛАЭС, усреднённых за 2008–2018 годы, приведены в таблице 15, а вклад продуктов питания в дозу внутреннего облучения показан в таблице 16.

Из данных таблицы 15 видно отсутствие существенных различий между дозами на сельское и городское население и дозами на различные возрастные группы, что связано с тем, что дозиметрическая модель, используемая в коде CROM, даёт консервативную оценку, которая близка для рассматриваемых сценариев облучения. Вклад в дозу различных путей облучения сопоставим, за исключением ингаляционного пути, вклад которого в эффективную дозу составляет менее процента.

Таблица 15

Годовая доза облучения населения от газоаэрозольных выбросов Ленинградской АЭС, мкЗв/год

Доза облучения	1–2 года	2–7 лет	7– 12 лет	12–17 лет	>17 лет
			Городское население		
от облака	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
от поверхности почвы	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$
от ингаляции	$7{,}7\times10^{-4}$	$7{,}7\times10^{-4}$	$8{,}5\times10^{-4}$	$8{,}9\times10^{-4}$	$8{,}9\times10^{-4}$
от продуктов питания	1,7	1,4	1,1	1,2	1,0
Сумма	4,7	4,4	4,1	4,3	4,0
			Сельское население		
от облака	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
от поверхности почвы	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$	$7{,}8\times10^{-1}$
от ингаляции	$7{,}7\times10^{-4}$	$7{,}7\times10^{-4}$	$8{,}5\times10^{-4}$	$8{,}9\times10^{-4}$	$8{,}9\times10^{-4}$
от продуктов питания	1,9	1,5	1,2	1,4	1,1
Сумма	4,9	4,6	4,3	4,4	4,1

Таблица 16

Годовая доза облучения за счёт перорального поступления радионуклидов с продуктами питания в результате газоаэрозольных выбросов Ленинградской АЭС, мкЗв/год

Продукт питания	1–2 года	2–7 лет	7– 12 лет	12–17 лет	>17 лет
			Городское население		
Хлеб и хлебопродукты	$4,8\times10^{-2}$	$4,9\times10^{-2}$	$4,7\times10^{-2}$	$4,9\times10^{-2}$	$4,8\times10^{-2}$
Мясо	$3,2\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$3,5\times10^{-1}$	$4,5\times10^{-1}$	$3,9\times10^{-1}$
Молоко	1,1	$8,9\times10^{-1}$	$5,0\times10^{-1}$	$5,6\times10^{-1}$	$4,1\times10^{-1}$
Овощи, фрукты	$2,3\times10^{-1}$	$1,8\times10^{-1}$	$1,8\times10^{-1}$	$1,8\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$
Сумма	1,7	1,4	1,1	1,2	1,0
			Сельское население		
Хлеб и хлебопродукты	$4,5\times10^{-2}$	$5,1\times10^{-2}$	$5,4\times10^{-2}$	$6,5\times10^{-2}$	$5,3\times10^{-2}$
Мясо	$4,7\times10^{-1}$	$3,7\times10^{-1}$	$3,6\times10^{-1}$	$4,9\times10^{-1}$	$4,2\times10^{-1}$
Молоко	1,1	$8,7\times10^{-1}$	$6,3\times10^{-1}$	$5,5\times10^{-1}$	$4,2\times10^{-1}$
Овощи, фрукты	$3,1\times10^{-1}$	$2,5\times10^{-1}$	$1,9\times10^{-1}$	$2,4\times10^{-1}$	$1,7\times10^{-1}$
Сумма	1,9	1,5	1,2	1,4	1,1

Оценка доз планового (прогнозируемого) облучения населения при работе ЛАЭС-2

Оценки эффективной дозы планового облучения населения для случая введения в эксплуатацию ЛАЭС-2 с 4 блоками ВВЭР-1200 приведены в таблице 17. По классификации публикации МКРЗ 103 «ситуация планового облучения» относится к прогнозируемому облучению, которое оценивается на этапе проектирования ядерной установки. Вследствие этого основным критерием безопасности ядерной установки, реактора или технологии является соответствие «планового облучения» определённой дозовой квоте, которая вводится регулятором на основе приемлемости риска от использования ядерной технологии или установки (СанПиН 2.6.1.24-03, 2003). В качестве такой квоты для АЭС установлено 10 мкЗв в год.

Таблица 17

Годовая эффективная доза облучения населения от газоаэрозольных выбросов четырёх энергоблоков с ВВЭР-1200 на 50-й год, мкЗв/год

Доза облучения	Возрастная группа				
	1–2 года	2–7 лет	7– 12 лет	12–17 лет	>17 лет
			Городское население		
от облака	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
от поверхности почвы	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$
от ингаляции	$7,3\times10^{-3}$	$6,7\times10^{-3}$	$8,5\times10^{-3}$	$8,0\times10^{-3}$	$9,3\times10^{-3}$
от продуктов питания	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Сумма	6,2	6,1	6,1	6,2	6,1
			Сельское население		
от облака	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
от поверхности почвы	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$	$1,5\times10^{-1}$
от ингаляции	$7,3\times10^{-3}$	$6,7\times10^{-3}$	$8,5\times10^{-3}$	$8,0\times10^{-3}$	$9,3\times10^{-3}$
от продуктов питания	5,0	4,9	4,9	5,0	4,9
Сумма	6,3	6,2	6,2	6,3	6,3

Для оценки доз планового облучения населения обычно используется консервативный подход, основанный на документе МАГАТЭ, описывающем общую дозиметрическую модель оценки воздействия выброса радионуклидов в окружающую среду (IAEA, 2001). Расчёты выполнены на 50 год работы ЛАЭС-2 для 5 возрастных групп городского и сельского населения, то есть для периода времени, когда вклад ЛАЭС-2 в загрязнение окружающей среды будет максимальным.

Полученные результаты показывают, что дозы облучения городского и сельского населения довольно близки и находятся на уровне 6,0–6,3 мкЗв в год. Эти величины находятся на уровне 60 % от дозовой квоты и примерно в 10 раз ниже облучения населения от существующего облучения, формированного техногенными радионуклидами.

Также как и для ситуации существующего облучения, основной вклад в дозу будет определяться радионуклидами, содержащимися в продуктах питания (рис. 12). Однако, в отличие от ситуации существующего облучения, вторым по значимости путём облучения будет облучение от облака, формируемого в основном ИРГ (рис. 12), а вклад внешнего облучения от радионуклидов, выпавших на поверхности почвы достаточно мал.

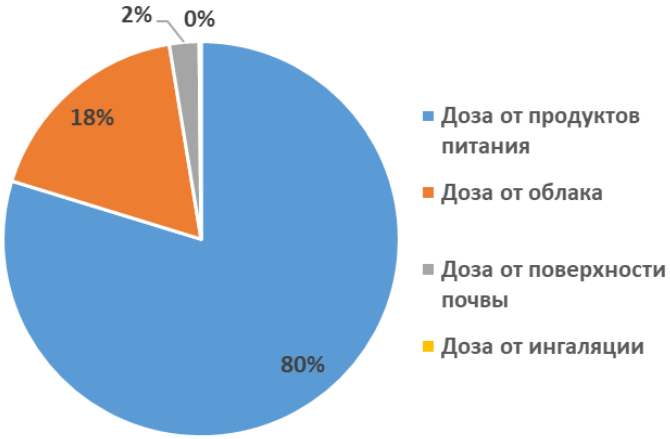


Рисунок 12. Вклад путей облучения в дозы на население от газоаэрозольных выбросов ЛАЭС, %

Основной вклад в формирование дозы по всем путям облучения (63 %) вносит ^{14}C, значим вклад ИРГ (18 %) и ^{3}H (11 %). Вклад радиоцезия (^{134}Cs+^{137}Cs), определяющего более 80 % дозы существующего облучения от техногенных радионуклидов, составляет, в случае планового облучения, менее 8 % (рис. 13).

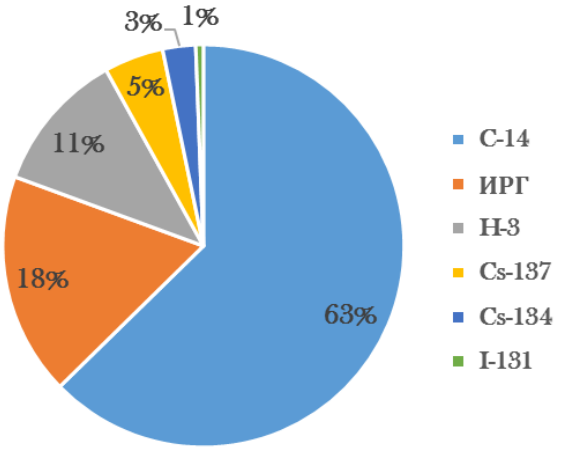


Рисунок 13. Вклад дозообразующих техногенных радионуклидов в плановое облучение от эксплуатации 4 энергоблоков с ВВЭР-1200

Вклад в эффективную годовую дозу отдельных продуктов питания показан в таблице 18. Видно, что как для городского, так и для сельского населения, вклад продуктов питания в облучение населения довольно близок.

Таблица 18

Годовая эффективная доза облучения населения в результате перорального поступления радионуклидов с продуктами питания в результате газоаэрозольных выбросов четырёх энергоблоков с ВВЭР-1200, мкЗв/год

Доза облучения	Возрастная группа				
	1–2 года	2–7 лет	7– 12 лет	12–17 лет	>17 лет
	Городское население				
Хлеб	1,1	1,2	1,3	1,2	1,3
Мясо	$8{,}5\times10^{-1}$	$7{,}2\times10^{-1}$	1,1	1,3	1,3
Молоко	1,8	1,7	1,2	1,3	1,2
Овощи, фрукты	1,3	1,2	1,3	1,1	1,1
Сумма	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
	Сельское население				
Хлеб	$9{,}8\times10^{-1}$	1,3	1,5	1,6	1,5
Мясо	1,3	1,1	1,2	1,4	1,4
Молоко	1,7	1,7	1,5	1,3	1,2
Овощи, фрукты	1,8	1,6	1,3	1,5	1,2
Сумма	4,3	5,7	5,5	5,8	5,3

Различия вкладов радионуклидов в дозовые нагрузки, формируемые по различным путям облучения, обусловлены физико-химическими свойствами элементов, влияющими на их миграционные особенности, а также характеристиками радиоактивных изотопов.

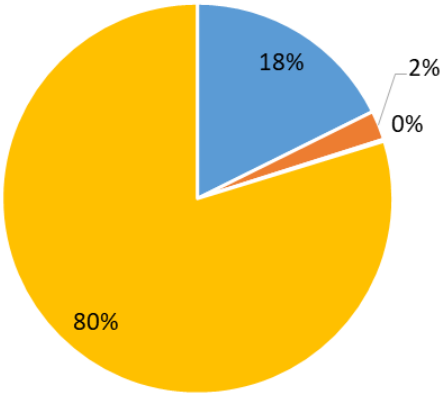
Вклад ^{3}H преобладает при облучении, обусловленном поступлением радионуклидов в организм человека за счёт дыхания. При облучении от поверхности почвы наибольший вклад вносят ^{134}Cs и ^{137}Cs, а при потреблении продуктов питания помимо ^{134}Cs и ^{137}Cs определённый вклад по сравнению с остальными радионуклидами в летний период может вносить ^{131}I.

Сравнительный анализ потенциальных и существующих источников облучения в районе расположения Ленинградской АЭС

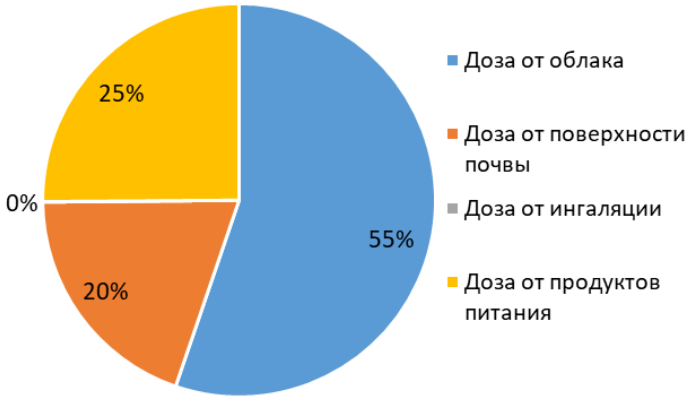
Анализ данных, характеризующих вклад в дозу от различных источников облучения, показывает существенное различие значимости этих путей (рис. 14).

Так, для ситуации облучения населения техногенными радионуклидами, не связанными с работой ЛАЭС, вкладом ингаляционного облучения можно пренебречь. Он определяется радионуклидами, поступившими в атмосферу в результате ветрового подъёма, то есть далеко не основным путём миграции радионуклидов в окружающей среде. Вклад доз внутреннего облучения от радионуклидов в продуктах питания и внешнего облучения составляет около 100 %. Напротив, для облучения населения радионуклидами газоаэрозольных выбросов АЭС, вклад внешнего облучения от облака, которое формируется летучими радионуклидами ИРГ, ^{14}C, ^{3}H, достаточно велик и варьирует от 18 до 55 %. Очень значим во всех ситуациях облучения вклад перорального пути, то есть вклад от внутреннего облучения от радионуклидов, поступающих в организм человека с пищевыми продуктами.

Дозы от выбросов ЛАЭС-2: 6,1 мкЗв



Дозы от выбросов ЛАЭС: 4,1 мкЗв



Дозы от существующего техногенного загрязнения: 64 мкЗв

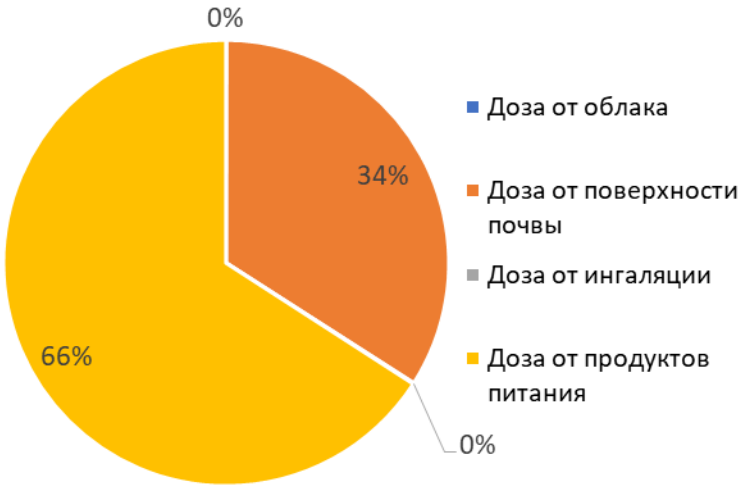


Рисунок 14. Вклад путей облучения населения, связанные с различными источниками техногенного загрязнения

Вклад доз внешнего облучения от радионуклидов, находящихся на поверхности почвы, существенным образом зависит от сценария загрязнения. Максимальный вклад (до 34 %) отмечается для ситуации устоявшегося техногенного облучения и для ситуации загрязнения окружающей среды выбросами ЛАЭС (реакторы типа РБМК-1000). Кардинально вклад внешнего облучения от радионуклидов станционного происхождения снизится в случае замены ядерно-энергетических установок РБМК на реакторы проекта АЭС-2006, что объясняется существенным снижением активности в газоаэрозольном выбросе относительно долгоживущих гамма-излучающих радионуклидов (АЭС-2006, 2011).

Годовые эффективные дозы облучения населения от радионуклидов станционного происхождения составляют 4,1 мкЗв при эксплуатации 4 реакторов типа РБМК (ЛАЭС) и 6,3 (ЛАЭС-2) мкЗв при использовании 4 реакторов ВВЭР-1200. Годовые дозы существующего облучения в районе размещения Ленинградской АЭС составляют 65 мкЗв и 91 мкЗв для городского и сельского взрослого населения. Таким образом, существующий вклад газоаэрозольных выбросов от ЛАЭС составляет 6,3 % от существующей дозы от техногенного загрязнения. Учитывая то, что по данным Санкт-Петербургского Института Радиационной Гигиены, природный

радиационный фон составляет 3,31 мЗв в год, вклад ЛАЭС в формирование радиационного фона составляет 0,13 % и не может быть измерен с помощью инструментальных методов.

Следует отметить, что при вводе в эксплуатацию новых реакторов ВВЭР-1200, вклад радионуклидов ЛАЭС-2 несколько увеличится и составит около 0,2 % от природного радиационного фона.

Заключение

Таким образом, радиационная обстановка в районе расположения ЛАЭС характеризуется сложным характером радиоактивных выпадений, обусловленных в основном радиоактивным следом после аварии на ЧАЭС. Несмотря на низкие уровни внешнего облучения и невысокий уровень (на порядки ниже нормативного) радионуклидного загрязнения основных продуктов питания населения, дикорастущие грибы и ягоды, особенно на болоте и заболоченных участках леса, могут содержать ^{137}Cs в концентрации, достигающей предельных нормативов СанПиН.

Вклад ЛАЭС в формирование существующего радиационного фона составляет 0,13 % и не может быть определён с помощью инструментальных методов. Следует отметить, что при вводе в эксплуатацию четырёх новых реакторов ВВЭР-1200, вклад радионуклидов ЛАЭС-2 несколько увеличится и составит около 0,2 % от природного радиационного фона. Основной вклад в формирование дозы от ВВЭР-1200 по всем путям облучения вносит ^{14}C (63 %), значим вклад ИРГ (18 %) и ^{3}H (11 %).

Литература

АЭС-2006. Ленинградская АЭС-2. Предварительная многофакторная оценка экологического риска при одновременной (нормальной) эксплуатации ЛАЭС-2 и ЛАЭС: окончательный технический отчёт. LN2O.B.110.S.002. HG. 0019. ОАО "СПбАЭП", 2011.

ВП 13.5.13/06-01. Государственная система ветеринарного нормирования Российской Федерации. Радиационная безопасность. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs: ветеринарные правила и нормы (утв. Министром сельского хозяйства России 19.12.2000).

Исследование содержания ^{14}C в объектах окружающей среды в районе расположения ЛАЭС-2. Радиоэкологический мониторинг наземных (включая аграрные) и водных экосистем в 30 км зоне ЛАЭС-2 на уровне глобального фона. Техническая спецификация на оборудование (включая лабораторное), методическое обеспечение радиационного мониторинга в ЗН ЛАЭС-2: заключительный отчёт по результату I и II этапа ОАО "Радиевый Институт" № 3667-ИК, по договору № LEN2/2697 от 07.06.2012 г.

Комплексная экологическая экспертная оценка техногенного воздействия на население и окружающую среду объектов атомной энергетики, расположенных на территории Сосновоборского городского округа: отчёт по теме 18_65006301/650. Договор № 650-651-63-11/Ц-ПЗ/ИФ05-411-200/11 от 14.11.2011 г.

Комплексное экологическое обследование природных наземных и водных экосистем, оценка и прогноз радиационной обстановки в регионе размещения площадки строительства ЛАЭС-2: промежуточный отчёт ОАО "Радиевый Институт" № 3811-ИК. СПб: ОАО "Радиевый Институт", 2013.

МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: Мелодические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с.

МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух: методика. Обнинск: НПО "Тайфун", 2016, 76 с.

НТД 38.220.56-84. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Том. 1. Безопасность в атомной энергетике. Ч. 1. Общие положения безопасности АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1984.

Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах Ленинградской области (по итогам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств): статистический бюллетень. Санкт-Петербург: Петростат, 2013. 43 с.

Проведение комплексного экологического обследования наземных (аграрных, лесных, луговых) и водных экосистем на уровне глобального фона. Наблюдения, оценка и прогноз радиационной обстановки в регионе размещения площадки строительства Ленинградской АЭС-2: заключительный технический отчёт ГНУ ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии № 969. Обнинск: ВНИИСХРАЭ Россельхозакадемии, 2013.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2005 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 274 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2009 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2010. 316 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2011. 282 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2012. 298 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2013. 344 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2014. 367 с.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.04.2003 г.; введ в действие с 20.06.2003 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.04.2003 г. № 69). М.: Минздрав РФ, 2003. 36 с.

СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 28.06.2010 г. № 71). М., 2010. 22 с.

Техногенная радиоактивность и Чернобыльский след. Карта Чернобыльского следа в Ленинградской области. URL: http://www.cottagesspb.ru/ekologiya/chernobyl/ (дата обращения 27.07.2020).

IAEA (2001). Safety Reports Series No.19. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. Vienna: IAEA, 2001. 229 p.

РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ЗОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ РОСТОВСКОЙ АЭС

Исамов Н.Н., Санжарова Н.И., Нуштаева В.Э., Панов А.В., Кузнецов В.К., Губарева О.С., Алешкина Е.Н., Гешель И.В., Сидорова Е.В., Емлютина Е.С., Фадеев М.Ю., Музалевская И.А., Урсу Н.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии

Дана оценка влияния Ростовской АЭС (в составе 4-х блоков с реакторами ВВЭР-1000) на радиоэкологическую обстановку в регионе размещения станции в течение 18 лет с момента пуска первого энергоблока. На основе наблюдений на созданной в 2000 г. сети радиационно-экологического мониторинга, включающей 7 контрольных участков и 5 контрольных пунктов, проведён анализ содержания природных и техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды, сельскохозяйственной продукции и продуктах питания. Показано, что продукция растениеводства, производящаяся в регионе Ростовской АЭС, полностью соответствовала радиологическим нормативам в течение всего периода наблюдений. Минимальными коэффициентами перехода (КП) радионуклидов характеризуются овощные культуры. КП ^{90}Sr в овощи в зависимости от вида продукции находятся в диапазоне 0,04–0,17, а для ^{137}Cs – в пределах 0,008–0,2 (Бк/кг)/(кБк/м^2). Максимальные КП радионуклидов отмечены в сено. Отмечено, что все виды культур накапливают в среднем в 2–5 раз больше ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs. Показано, что эксплуатация АЭС в штатном режиме и ввод в действие новых энергоблоков не привёл к увеличению содержания техногенных радионуклидов в продукции сельского хозяйства, продуктах питания и объектах окружающей среды.

Ростовская атомная электростанция, радиационно-экологический мониторинг, радионуклиды, сельскохозяйственная продукция, аграрные экосистемы, водные экосистемы

Характеристики Ростовской АЭС как источника воздействия на окружающую среду

Филиал АО Концерн «Росэнергоатом Ростовская атомная станция» (далее Ростовская АЭС) расположен на юге России в степном районе Ростовской области на южном берегу Цимлянского водохранилища, созданного в нижнем течении р. Дон, примерно в 13,5 км восточнее г. Волгодонска (рис. 1).

Рисунок 1. Панорама Ростовской АЭС

До 2010 г. на Ростовской АЭС эксплуатировался энергоблок № 1 с реакторной установкой ВВЭР-1000, введённый в эксплуатацию в 2001 г. В декабре 2009 г. состоялся физический пуск энергоблока № 2, ознаменовавший начало этапа опытно-промышленной эксплуатации. Энергетический пуск энергоблока № 2 состоялся 18 марта 2010 г. Разрешение на промышленную эксплуатацию подписано 10 декабря 2010 г., а 5 января 2011 г. энергоблок № 2 включён в сеть. Физический пуск энергоблока № 3 состоялся 14 ноября 2014 г., а энергетический пуск – 27 декабря 2014 г. Менее чем через год, 17 сентября 2015 г., энергоблок № 3 приняли в промышленную эксплуатацию.

Физический пуск четвёртого энергоблока был начат 6 декабря 2017 года, с последующим выводом на минимально контролируемый уровень мощности, который состоялся 29 декабря, а 1 февраля 2018 года генератор турбины четвёртого энергоблока был синхронизирован с сетью (Радиационная обстановка …, 2019).

Таким образом, в 2018 г. в эксплуатации находились 4 энергоблока Ростовской АЭС с реакторами ВВЭР-1000, введёнными в промышленную эксплуатацию соответственно: энергоблок № 1 – 2001 г., № 2 – 2010 г., № 3 – 2015 г., № 4 – 2018 г.

Сельскохозяйственная продукция (и в первую очередь продукты питания), производимая в регионе размещения АЭС, во всех случаях является одним из основных источников поступления радионуклидов в организм человека, проживающего на территории, прилегающей к атомной электростанции. Это обуславливает особое внимание к аграрным экосистемам, как объекту воздействия на население предприятий ядерной энергетики (МУ-13.5.13-00, 2000). Учитывая, что в Российской Федерации в 30-км зонах влияния АЭС от 50 до 90 % территории занимают сельскохозяйственные угодья, становится очевидной необходимость организации системы радиационно-экологического мониторинга аграрных экосистем в регионах размещения атомных электростанций для обеспечения безопасного проживания населения и снабжения его продуктами питания, соответствующими санитарно-гигиеническим нормативам (Радиационно-экологическая обстановка …, 2008). Для исследования была выбрана Ростовская (с 2001 по 2010 гг. Волгодонская) АЭС суммарной мощностью 4,03 ГВт, которая является крупнейшим на аграрном юге России предприятием энергетики, вырабатывая около 30 % годового регионального объёма электроэнергии.

Вокруг Ростовской АЭС установлены санитарно-защитная зона (СЗЗ) радиусом 3 км и зона наблюдения (ЗН) радиусом 30 км. Средняя плотность населения в зоне наблюдения составляет 83 человека на 1 км^2, общая численность населения – 224 тыс. человек. Численность населения г. Волгодонска, расположенного в 13,5 км от АЭС, составляет около 171 тыс. человек, г. Цимлянска, находящегося в 21 км от Ростовской АЭС, – около 15 тыс. человек.

В административном отношении площадка Ростовской АЭС расположена в Дубовском районе Ростовской области в 13,5 км от г. Волгодонска и в 19 км от г. Цимлянска. Ближайшие населённые пункты (хутор Хорсеев и хутор Подгоренская) расположены вне санитарно-защитной зоны АЭС на расстоянии 3,5 и 5 км. Тридцатикилометровая зона Ростовской АЭС, занимающая площадь 282,6 тыс. га (из которых вода занимает площадь 91,3 тыс. га), охватывает западную часть Цимлянского водохранилища, его северное побережье, включающее г. Цимлянск, посёлок Крутой, станицы Хорошевская, Терновская, Калининская. Западная часть включает станицу Романовскую, хутора Парамонов и Лагутники, западную и юго-западную части г. Волгодонска. Южная часть 30-км зоны простирается до р. Сая и далее к югу, захватывая западную часть Верхнесальского канала и низовья р. Малая Куберле. В тридцатикилометровую зону входят сельскохозяйственные земли Волгодонского, Цимлянского, Зимовниковского и Дубовского районов. Два города (Волгодонск и Цимлянск) и 38 сельских поселений находятся в зоне влияния АЭС.

Площадка АЭС расположена на левом берегу Цимлянского водохранилища, созданного в нижнем течении р. Дон в 1952 г. Площадь зеркала Цимлянского

водохранилища при нормальном подпорном уровне 36,0 абс. м составляет 2700 км^2, а полный его объём близок к объёму среднегодового стока р. Дон и составляет около 24 км^3. Расстояние от главных корпусов до Цимлянского водохранилища около 2 км, граница водохранилища отделена от промплощадки дамбой водоёма-охладителя.

Природно-климатическая характеристика района расположения Ростовской АЭС

Геология и почвообразующие породы

Территория площадки Ростовской АЭС относится к палеогеновой системе: пески, песчаники, глины, мергели, а также неогеновой системе, представленной глинами, песками, ракушечниками. Современная гидрографическая сеть заполнена четвертичными отложениями (песками, глинами) и древнечетвертичными отложениями (песками, глинами, ракушечником). Большинство почвообразующих пород засолены. Преобладающим характером засоления является сульфатное, оно составляет 44,1 %. Второе место по распространению (27,4 %) занимает хлоридно-сульфатный тип засоления. Менее распространены следующие типы засоления почвообразующих пород: сульфатно-содовое и содово-сульфатное, хлоридно-сульфатно-содовое – 8,1 %, сульфатно-хлоридно-содовое и хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатное – 4,8 %.

Рельеф и гидрография

Территория 30-км зоны Ростовской АЭС включает аккумулятивные равнины, аллювиальные пойменные, аллювиальные террасовые нерасчленённые, лёссовые плоские с овражно-балочным расчленением и пологоступенчатые с просадочными формами. Большая часть изучаемой территории занята Доно-Сальским водоразделом и долиной реки Дон, а меньшая часть – Доно-Кумгуацким водоразделом и долиной реки Сал. Большинство водораздельных склонов имеют волнистое строение. Плато межбалочных водоразделов узкие: ширина их 510–700 м, длина – до 2 км. По физико-географическому районированию территория относится к Нижнее-Донскому району. В морфологическом отношении этот район представляет, в основном, пойму Дона, а на отдельных участках – останцы надпойменных террас. Ширина центральной части поймы Дона составляет 4–6 км. Притеррасная часть поймы приурочена преимущественно к левобережью, где она располагается вдоль уступа первой надпойменной террасы. Ширина её составляет 0,5–1,5 км. Склоны рек Дона и Сая прорезаны балками и оврагами. Овраги приурочены к береговым обрывам Цимлянского водохранилища и склонам балок. Длина их от 40–70 м до 1–2 км, ширина верхней части 7–300 м, по днищу 0,5–6 м, глубина от 5 до 30 м.

Климат

Климат района Ростовской АЭС континентальный, с недостаточным увлажнением, резкими суточными и годовыми колебаниями температур, жарким и сухим летом, сравнительно продолжительной и холодной зимой с частыми оттепелями и туманами. Средняя температура воздуха составляет плюс 8,2 °С. Абсолютный минимум отмечен в январе, он равен минус 34 °С. Абсолютный максимум наблюдался в августе – плюс 40 °С. Среднее годовое количество осадков 380–430 мм/год. Большая часть атмосферных осадков выпадает в тёплый период (апрель-октябрь). Максимум осадков в районе исследования приходится на июнь. Среднемесячная относительная влажность воздуха с мая по сентябрь не превышает 50 %, причём в летние месяцы она менее 48 %.

Почвенный покров

Почвенный покров представлен несколькими зональными подтипами степных и сухостепных почв: тёмно-каштановыми, каштановыми почвами и южными чернозёмами. Среди этих подтипов выделяются роды: солонцеватые, солончаковатые, эродированные, дефлированные, карбонатные. Видовые признаки почв большей частью связаны со степенью солонцеватости (слабо, средне и сильно). Распределение почв по гранулометрическому составу представлено

в таблице 1. Каштановые почвы и чернозёмы тяжелого гранулометрического состава – основной почвенный фонд региона. А совместно средне-тяжелосуглинистые и глинистые почвы по районам составляют 92–100 % от общей площади.

Таблица 1

Распределение почв 30-км зоны Ростовской АЭС по гранулометрическому составу, в % от общей площади земель

Районы	Средне-суглинистые	Тяжело-суглинистые	Глинистые
Волгодонский	8,0	57,6	30,7
Дубовский	10,0	88,8	2,0
Зимовниковский	4,4	80,2	6,3
Цимляновский	13,9	13,0	13,9

Растительность и животный мир

В системе современного ботанико-географического районирования территория 30-км зоны Ростовской АЭС находится на крайнем юге Среднедонской подпровинции Причерноморской провинции Причерноморско-Казахстанской подобласти Евразиатской степной области. Южные участки рассматриваемой территории входят в Ергенинско-Заволжскую подпровинцию Заволжско-Казахстанской провинции. В геобатоническом отношении территория относится к подзоне дерновинно-злаковых (сухих) степей с доминированием в зональных целинных сообществах эвриксерофильных плотнодерновинных злаков: ковылей (*Stipa lessingiana Jrin. Et Rupr., S. ucrainica P. Smirn., S. capillata*) и овсяницы (*Festuca valesiaca Gaudin*).

В настоящее время типичные зональные степи водораздельных и приводораздельных пространств рассматриваемой зоны уничтожены и заняты пахотными землями. Сохранившиеся участки естественной растительности представлены сочетанием петрофильных и псаммофильных вариантов зональных степей в разной степени пастбищного сбоя, растительности обводнённых и сухостепных балок, речных долин, включая песчаные массивы речных террас, береговых склонов Цимлянского водохранилища, растительности водоёмов.

Особо охраняемые природные объекты в регионе Ростовской АЭС

В 30-км зоне Ростовской АЭС расположен Государственный природный заказник «Цимлянский» федерального значения. Восточная часть Островного участка Природного парка «Донской» регионального значения входит в пределы исследуемого района. Кроме этого, на рассматриваемой территории находится памятник природы «Большой Буерак» в окрестностях станицы Хорошевская.

Сельское хозяйство

В пределах 30-км зоны Ростовской АЭС расположено 22 коллективных сельскохозяйственных предприятия. В структуре землепользования 30-км зоны АЭС преобладают пахотные угодья – 68,5 % и пастбища – 21,6 %. Сельскохозяйственными землями занято 93 % сухопутной части 30-км зоны АЭС. Окружающие Ростовскую АЭС сельскохозяйственные угодья в основном заняты пашней, где возделываются зерновые и овощные культуры, многолетние и однолетние травы на корм скоту.

Большую часть территории 15-км зоны Ростовской АЭС составляют земли ООО "СПК «Новожуковский». Некоторая часть земель ООО «СПК «Новожуковский», расположенных на расстоянии 3-4-км на юго-запад от станции, в настоящее время арендована частными сельскохозяйственными производителями. В непосредственной близости от Ростовской АЭС расположено крупное сельскохозяйственное предприятие-птицефабрика им. Черникова. Кроме того, в 10-12 км на юго-запад от АЭС начинается территория нескольких садовых сообществ. В структуре землепользования коллективных хозяйств

основную долю занимает пашня.

Выбросы и сбросы Ростовской АЭС

Газоаэрозольные выбросы на Ростовской АЭС поступают в атмосферу через вентиляционные трубы после системы спецгазоочистки. Данные о газоаэрозольных выбросах радионуклидов, регламентируемых СП АС-03 (СанПин 2.6.1.24-03, 2003), в атмосферу в 2018 г. и для сравнения в 2017 г. приведены в таблице 2 (Радиационная обстановка …, 2019).

В соответствии с требованиями «Положения о годовых отчётах по оценке состояния безопасной эксплуатации энергоблоков атомных станций» (СТО 1.1.1.04.001.0143-2015, 2015) в случае, если существующими на АЭС приборами и методами некоторые радионуклиды, нормируемые в выбросах, не определяются, фактическому выбросу нормируемого радионуклида присваивается значение ½ произведения нижнего предела измерения на суммарный объём выброса. По сравнению с предыдущим годом в 2018 г. на Ростовской АЭС выбросы ^{137}Cs уменьшились на 8 %. Выброс ИРГ увеличился в 1,2 раза, выброс ^{134}Cs – на 4 %, ^{131}I – в 2,4 раза, ^{60}Co – на 2 %.

Таблица 2

Выбросы радионуклидов в атмосферу на Ростовской АЭС, Бк

Радионуклиды	Допустимый выброс	Фактический выброс		Изменения (+)/(-) в 2018 г. по сравнению с 2017 г.
		2017 г.	2018 г.	
^{60}Co	$7{,}4\times10^{9}$	$5{,}2\times10^{7}$	$5{,}1\times10^{7}$	$+9{,}0\times10^{5}$
^{131}I	$1{,}8\times10^{10}$	$8{,}1\times10^{7}$	$3{,}4\times10^{7}$	$+4{,}7\times10^{7}$
^{134}Cs	$9{,}0\times10^{8}$	$2{,}6\times10^{7}$	$2{,}5\times10^{7}$	$+9{,}0\times10^{5}$
^{137}Cs	$2{,}0\times10^{9}$	$5{,}0\times10^{7}$	$5{,}4\times10^{7}$	$-3{,}9\times10^{6}$
Сумма ИРГ[3]	$6{,}9\times10^{14}$	$9{,}9\times10^{13}$	$8{,}4\times10^{13}$	$+1{,}6\times10^{13}$

Фактические годовые газоаэрозольные радиоактивные выбросы Ростовской АЭС в атмосферу в 2018 г. составляли от 0,45 до 14,4 % от допустимых выбросов.

Сбросы промышленно-ливневой канализации (ПЛК) на Ростовской АЭС осуществляются через сбросной канал в водоём-охладитель. Отработанная вода поступает на очистные сооружения АЭС. Объём сброса технических вод в водоём-охладитель в 2018 г. составил $2{,}0\times10^{5}$ м^3. Водоём-охладитель Ростовской АЭС, созданный путём отсечения прибрежного участка Цимлянского водохранилища плотиной с фильтрующей дамбой, имеет площадь 18 км^2, среднюю глубину – 3,3 м, средний объём воды – 6×10^{7} м^3. Длина плотины водоёма-охладителя составляет 9,8 км, а дамбы и отводящего канала – 4,5 км. Единственным путём поступления радионуклидов с АЭС в Цимлянское водохранилище является их фильтрация с водой из водоёма-охладителя через дамбу (~$1{,}1\times10^{7}$ м^3/год). В 2018 г., по данным Ростовской АЭС, содержание радионуклидов в сбросных водах в водоём-охладитель было ниже минимально детектируемой активности.

Радиационный мониторинг в 30-км зоне в районе расположения Ростовской АЭС осуществляет участок радиационного контроля окружающей среды (УРКОС), а мониторинг радиоактивного загрязнения окружающей природной среды в 100-км зоне вокруг АЭС – Северо-Кавказский УГМС. Расположение пунктов радиационного мониторинга Северо-Кавказского УГМС в 100-км зоне Ростовской АЭС приведено на рисунке 2.

[3] Инертные радиоактивные газы

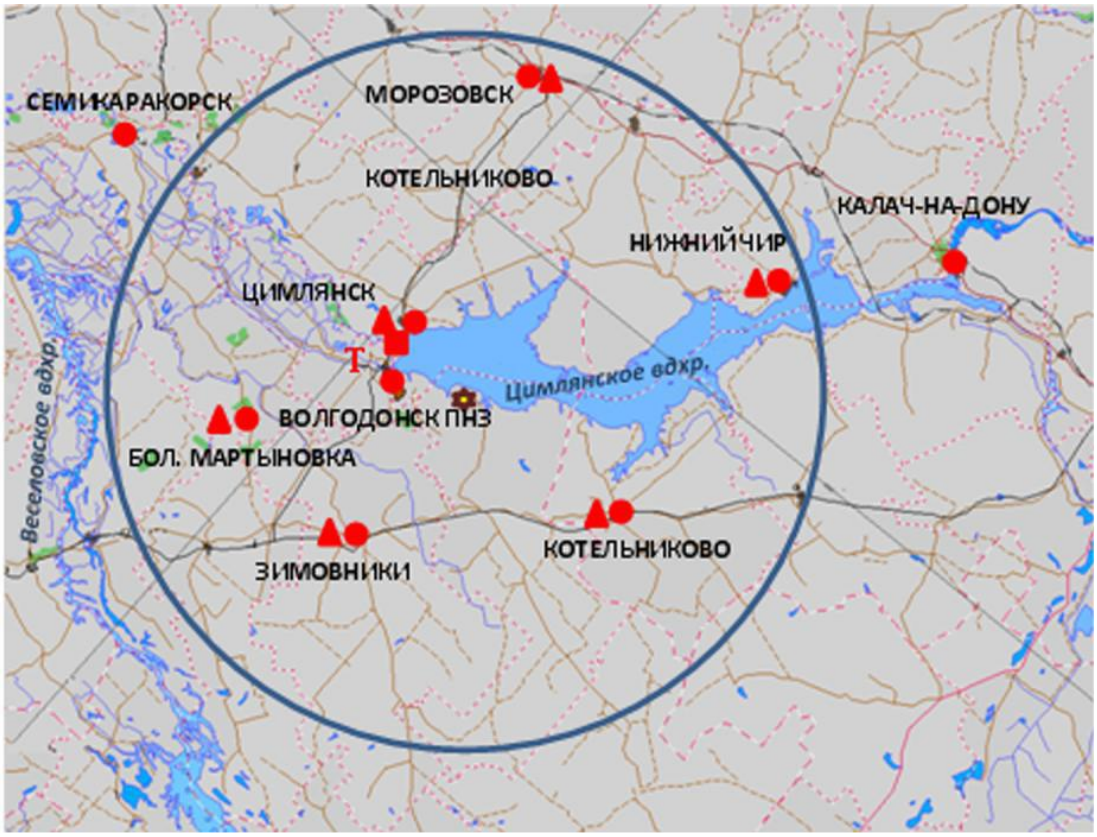


Рисунок 2. Расположение пунктов радиационного мониторинга в 100-км зоне вокруг Ростовской АЭС:
– АЭС; ● – наблюдения за γ-фоном; ▲ – отбор проб атмосферных выпадений;
■ – отбор проб атмосферных аэрозолей; **Т** *– отбор проб атмосферных осадков*

В 2018 г. специалисты участка радиационного контроля окружающей среды на промплощадке, в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения для последующего анализа отбирали пробы:

- аэрозолей в 10 точках с помощью воздухофильтрующих установок (ВФУ) (средний объем прокачанного воздуха – 400 м^3/ч);
- атмосферных выпадений в 18 точках с помощью кювет площадью 0,16 и 0,31 м^2 и высотой бортиков 15–20 см с месячной экспозицией;
- почвы на глубину 5 см от поверхности один раз в год;
- водных объектов (сбросные воды, водоём-охладитель, Цимлянское водохранилище вдоль плотины пруда-охладителя, сеть питьевого водоснабжения и подземные воды из НС);
- донных отложений в водоёме-охладителе и Цимлянском водохранилище;
- сельскохозяйственных продуктов окрестных хозяйств.

Кроме того, контролировалась мощность экспозиционной дозы излучения на местности.

Мониторинг содержания радионуклидов в пробах проводился следующими аттестованными средствами контроля: стационарным и передвижным спектрометрами «Гамма-плюс», СКС-07П «Кондор», «DSA-1000», «Canberra», «Quantulus-1220», «Tri_Carb 3110 TR», радиометрами КРК-1 и УМФ-2000. Контроль поглощённой дозы на местности проводился с помощью термолюминесцентных дозиметров типа ДТЛ-01 и Harshaw, размещённых в 17 пунктах и экспонируемых 12 месяцев. Измерение МАЭД проводилось с помощью переносных дозиметра КП-АД6, спектрометра сцинтилляционного Inspector-1000, дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М и 22 стационарных автоматизированных постов контроля на базе УМКС-99Р «Атлант-М» в составе АСКРО. Для

экспрессного мониторинга радиационной обстановки по 5 маршрутам вокруг АЭС использовалась передвижная радиологическая лаборатория.

Радиационный фон и приземная концентрация радионуклидов в воздухе

В 2018 г. Северо-Кавказским УГМС в 100-км зоне Ростовской АЭС проводились наблюдения за МАЭД на 8 станциях каждые 3 часа, на 6 из них проводился отбор проб выпадений с помощью планшетов с суточной экспозицией и на одной (в г. Цимлянске) – отбор 5-суточных проб аэрозолей с помощью воздухофильтрующих установок ВФУ (табл. 3). Среднегодовая МАЭД в 2018 г. на промплощадке, в санитарно-защитной зоне, зоне наблюдения и контрольном пункте (г. Цимлянск), по данным постов АСКРО Ростовской АЭС, составляла 0,10; 0,09 и 0,10 мкЗв/ч соответственно при максимальном измеренном значении 0,13 мкЗв/ч, что сопоставимо с полученными нами значениями. По данным 8 пунктов наблюдения за МАЭД Северо-Кавказского УГМС, среднегодовая МАЭД изменялась по пунктам 100-км зоны АЭС от 0,10 до 0,14 мкЗв/ч, что соответствует естественному γ-фону.

Радиометрической лабораторией Северо-Кавказского УГМС суточные пробы выпадений и аэрозолей обрабатывались и анализировались на Σβ активность. Радиоизотопный анализ объединённых за месяц проб аэрозолей и объединённых за квартал проб выпадений, а также анализ проб осадков на тритий проводился в ФГБУ «НПО «Тайфун» (Радиационная обстановка …, 2019).

Таблица 3

Среднемесячные и максимальные суточные величины Σβ-активности в выпадениях и объёмные значения Σβ-активности в приземном слое воздуха в 100-км зоне Ростовской АЭС (Радиационная обстановка …, 2019)

Пункт наблюдения		Месяц						Среднегодовая	
	Показатель	1	3	5	7	9	11	2018	2017
		Выпадения, Бк/м^2×сутки							
Зимовники	Сред. мес.	0,50	0,51	0,49	0,74	0,54	0,60	0,6	0,8
	Макс. сут	1,58	1,45	1,62	2,57	3,17	1,80		
Константиновск	Сред. мес.	1,06	0,55	0,37	0,64	0,57	0,43	0,6	0,8
	Макс. сут	5,29	1,90	0,74	1,32	2,22	1,11		
Котельниково	Сред. мес.	0,53	0,41	0,56	0,74	0,62	1,34	0,7	0,7
	Макс. сут	1,14	0,90	1,72	1,32	2,14	4,06		
Морозовск	Сред. мес.	0,53	0,37	0,55	0,49	0,41	0,76	0,5	0,6
	Макс. сут	1,63	1,45	1,48	1,22	1,28	1,58		
Нижний Чир	Сред. мес.	1,63	0,69	0,59	0,84	0,50	0,54	0,8	0,7
	Макс. сут	4,86	2,03	0,90	2,94	1,24	0,87		
Цимлянск	Сред. мес.	1,79	0,94	0,95	0,99	1,38	1,33	1,5	1,4
	Макс. сут	6,66	2,67	2,54	3,54	7,33	8,91		
		Объёмная активность, 10^{-5} Бк/м^3							
Цимлянск	Сред. мес.	31,1	18,9	7,6	6,9	7,5	4,6	13,6	27,4
	Макс. сут	76,4	27,2	10,6	8,8	10,6	7,3		

Данные Северо-Кавказского УГМС об объёмной Σβ-активности в воздухе и Σβ-активности выпадений представлены в таблице 3. Показано, что в 2018 г. среднегодовая объёмная Σβ-активность в воздухе г. Цимлянска, расположенного в ЗН АЭС,

уменьшилась в 2 раза по сравнению с 2017 г. и составила $1,4\times10^{-4}$ Бк/м^3, что практически совпадает со средневзвешенной по территории Юга ЕТР объёмной Σβ-активности. Данные радиоизотопного анализа проб аэрозолей из г. Цимлянска за 2014–2018 годы приведены в таблице 4.

В 2018 г. среднегодовая объёмная активность ^{137}Cs увеличилась в 1,7 раза по сравнению с 2017 г. и составила $2,5\times10^{-7}$ Бк/м^3, что в 1,1 раза меньше средневзвешенного значения по Югу Европейской территории России ($2,8\times10^{-7}$ Бк/м^3).

Таблица 4

Объёмные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в приземном слое воздуха г. Цимлянска, n×10^{-7} Бк/м^3 (Радиационная обстановка ..., 2019)

Пункт наблюдения	Год	I кв.	II кв.	III кв.	IV кв.	Среднее за год	Средневзвешенное по территории Юга ЕТР
^{137}Cs							
	2014	2,8	3,5	5,6	2,4	3,6	6,6
	2015	7,8	5,7	6,8	3,8	6,0	6,7
Цимлянск	2016	2,3	2,8	2,1	2,4	2,4	1,9
	2017	1,1	2,0	2,5	0,6	1,5	2,9
	2018	2,4	3,5	2,1	2,0	2,5	2,8
^{90}Sr							
	2014	0,48	0,95	0,91	0,36	0,68	0,84
	2015	0,79	0,72	0,76	1,22	–	–
Цимлянск	2016	0,75	–	0,23	–	0,49	0,48
	2017	0,45	–	2,50	–	1,48	0,87
	2018	0,87	–	0,51	–	0,69	1,06

Среднегодовая объёмная активность ^{90}Sr в 2018 г. в г. Цимлянске была в 1,5 раза ниже средневзвешенного значения объёмной активности по территории Юга России и составляла $0,69\times10^{-7}$ Бк/м^3. Наблюдаемые в воздухе г. Цимлянска объёмные активности радионуклидов на семь порядков ниже ДОАНАС по НРБ-99/2009 (СанПин 2.6.1.2523-09, 2009).

По данным сотрудников участка радиационного контроля окружающей среды Ростовской АЭС, в 2018 г. среднегодовая объёмная Σβ в приземном слое атмосферы составляла: в санитарной защитной зоне АЭС – $1,3\times10^{-4}$ Бк/м^3, в зоне наблюдения – $1,2\times10^{-4}$ Бк/м^3, в контрольной точке (с. Дубовское – 36 км на юго-восток от АЭС) – $1,4\times10^{-4}$ Бк/м^3. Объёмная активность ^{137}Cs в нижних слоях атмосферы санитарной защитной зоны, зоны наблюдения и контрольного пункта составляла $1,8\times10^{-7}$, $2,3\times10^{-7}$ и $2,1\times10^{-7}$ Бк/м^3 соответственно. Объёмная активность ^{60}Co, ^{54}Mn, ^{131}I и ^{134}Cs в санитарной защитной зоне, зоне наблюдения и контрольном пункте была ниже минимально детектируемой активности используемой аппаратуры (МДА): МДА для ^{54}Mn составляет $0,05\times10^{-6}$ Бк/м^3, для ^{60}Co – $0,05\times10^{-6}$ Бк/м^3, для ^{131}I – $0,11\times10^{-6}$ Бк/м^3, для ^{134}Cs – $0,05\times10^{-6}$ Бк/м^3.

Среднегодовые суточные значения Σβ-активности выпадений в пунктах наблюдения 100-км зоны Ростовской АЭС в 2018 г. составляли 0,6–1,5 Бк/м^2×сутки (табл. 4), в четырёх пунктах наблюдения уменьшились и в одном пункте превысили средневзвешенные по югу Европейской территории России выпадения (0,80 Бк/м^2×сутки).

По данным УРКОС Ростовской АЭС, в 2018 г. значение Σβ-активности выпадений в санитарно-защитной зоне, зоне наблюдения и контрольном пункте составляло 0,12; 0,13 и

0,16 Бк/м^2×сутки соответственно и было примерно на уровне 2017 года.

Результаты проведённого в НПО «Тайфун» анализа проб атмосферных осадков показали, что в 2018 г. среднегодовая объёмная активность трития в осадках в зоне Ростовской АЭС (г. Цимлянск) составляла 1,52 Бк/л и была немного меньше усреднённой по всем пунктам РФ среднегодовой объёмной активности трития в осадках (1,64 Бк/л).

Содержание радионуклидов в почвах и растительности

Сеть радиационно-экологического мониторинга (рис. 3) в зоне влияния Ростовской АЭС, включающая семь контрольных участков (КУ) и два контрольных пункта (КП), была заложена в 2000 г. на основе анализа данных по характеристикам почв агроэкосистем и структуры землепользования.

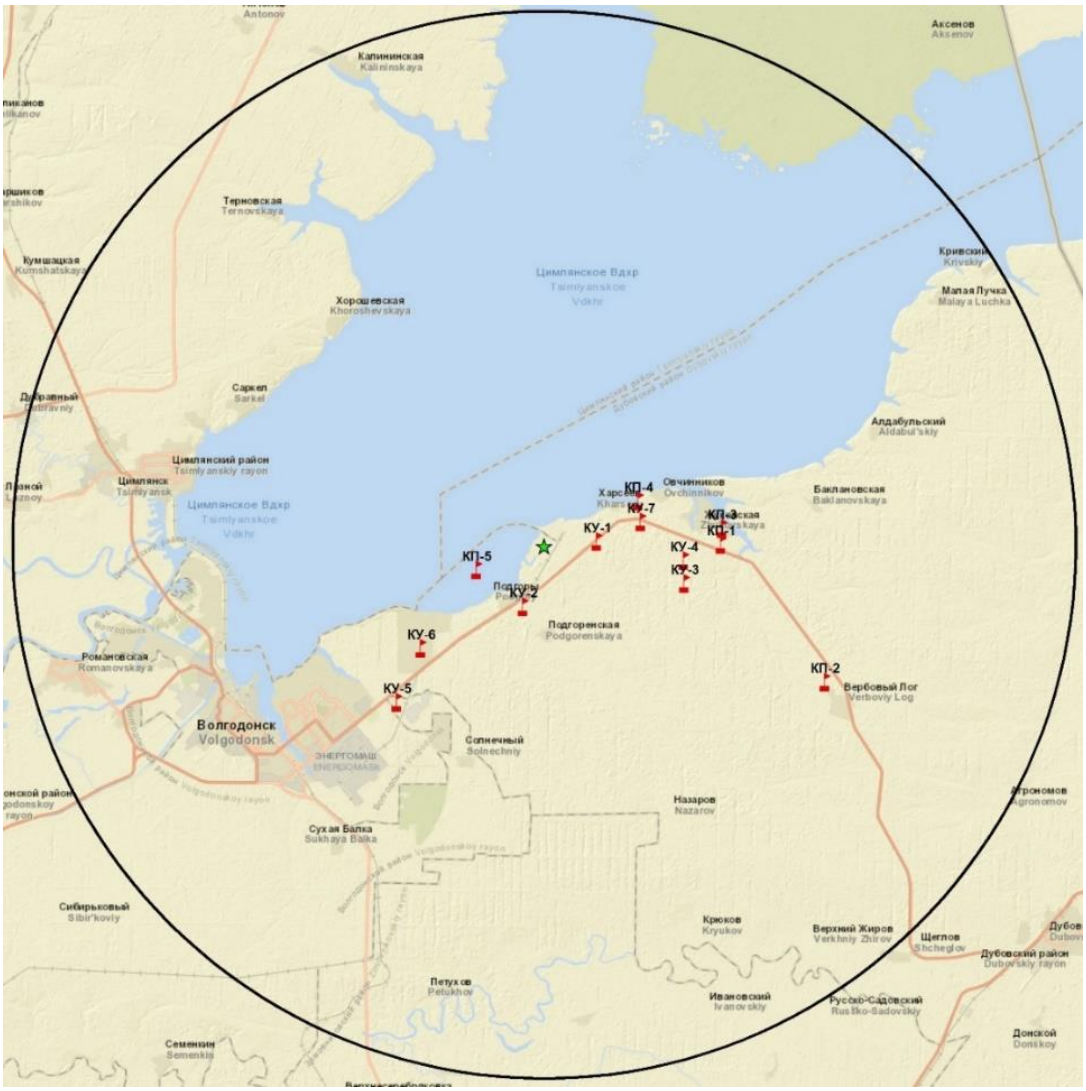


Рисунок 3. Карта-схема контрольных участков и пунктов сети радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Ростовской АЭС

★ *– Ростовская АЭС;* **КУ** *– контрольный участок,* **КП** *– контрольный пункт*

Контрольные участки и контрольные пункты, расположенные в 15-км зоне размещения Ростовской АЭС, выбирались в соответствии с требованиями (МУ-13.5.13-00, 2000) по «розе ветров» таким образом, чтобы на преобладающих типах почв были представлены основные возделываемые в регионе сельскохозяйственные культуры, при этом отдельно анализировались данные для пахотных и лугопастбищных угодий.

Площадь сельскохозяйственных угодий, где были заложены контрольные участки, варьировала от 20 до 192 га, а территория садовых обществ составляла 10 га. При выборе контрольных участков на пастбищах оценивалась информация по направлениям ведения животноводства и структуре стада крупного рогатого скота. Так, в данном регионе преобладает мясное скотоводство, однако критическим звеном в пищевой цепочке поступления радионуклидов в рацион питания населения является молоко. В связи с этим были выбраны два контрольных пункта (КП-1, КП-2), где имеется молочное стадо коров. Дополнительно в 2018 г. были определены три контрольных пункта (КП-3-КП-5) для оценки радиационно-экологической ситуации в водной экосистеме Цимлянского водохранилища (табл. 5). Мониторинг проводили в соответствии с требованиями (МУ-13.5.13-00, 2000) и рекомендациями, приведёнными в работе (Санжарова и др., 2010), в период 2001–2018 гг. На контрольных участках пашен отбирался пахотный слой почвы (0–20 см), на лугопастбищных угодьях – дернина (0–10 см). Почвенные образцы были сопряжены с растительными пробами для определения коэффициентов накопления радионуклидов в продукции растениеводства. При отборе проб измерялась мощность дозы гамма-излучения на местности (рис. 4). Во всех почвенных образцах определялись агрохимические показатели.

Таблица 5

Характеристика сети радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Ростовской АЭС

Контрольный участок (пункт)	Направление и расстояние от АЭС, км	Ближайший населённый пункт	Вид хозяйственного использования
Агроэкосистемы			
КУ-1	В (2)	х. Хорсеев	Пашня, 153 га
КУ-2	Ю (4)	ст. Подгоренская	Сенокос, 20 га
КУ-3	Ю-В (6,5)	ст. Подгоренская	Пашня, 164 га
КУ-4	В (5)	ст. Жуковская	Пашня, 192 га
КУ-5	Ю-З (11,6)	п. Солнечный	Пашня, 90 га
КУ-6	Ю-З (8,3)	х. Подгоры	Сад, 10 га
КУ-7	С-В (7)	х. Овчинников	Пашня, 154 га
КП-1	С-В (7,5)	ст. Жуковская	Пастбище
КП-2	Ю-В (15)	Ст. Вербовый Лог	Пастбище
Водные экосистемы			
КП-3	С-В (8)	ст. Жуковская	Водоём
КП-4	С-В (5)	х. Харсеев	Водоём
КП-5	З (2)	х. Подгоры	Водоём

Рисунок 4. Измерение мощности экспозиционной дозы γ-излучения в районе расположения Ростовской АЭС

На контрольном участке КУ-2 в 2008 и 2018 гг. дополнительно отбирались пробы почвы послойно, что дало возможность оценить динамику изменения вертикального распределения радионуклидов в почвенном профиле. Отобранная при мониторинге продукция растениеводства включала в себя: хозяйственно ценные части (зерно, солома) зерновых (озимая пшеница, ячмень, тритикале); овощи (лук, томаты, капуста, перец); картофель (клубни); корнеплоды (морковь, свёкла столовая), бахчевые (баклажаны, кабачки) и корма для сельскохозяйственных животных (естественные и сеяные травы, сорго) (табл. 6).

На контрольных пунктах, где проводилось наблюдение за миграцией радионуклидов по животноводческой цепочке (КП-1 и КП-2), был проведён отбор проб почвы, рациона сельскохозяйственных животных и молока. Дополнительно проводился отбор проб продукции животноводства (говядина) и рыба из Цимлянского водохранилища (табл. 6). В водной экосистеме водохранилища отбирались пробы воды и донных отложений (табл. 6). Во всех образцах определяли содержание естественных (^{40}K, ^{226}Ra, ^{232}Th) и радиологически значимых техногенных (^{90}Sr, ^{137}Cs) радионуклидов.

Почвы контрольных участков и пунктов представлены двумя основными типами: каштановыми (КУ-4, КУ-7 и КП-1) и тёмно-каштановыми (все остальные). Они имеют нейтральную или слабощелочную реакцию, низкую гидролитическую кислотность, невысокое содержание гумуса, высокую ёмкость катионного обмена, достаточно высокую обеспеченность элементами минерального питания. Почвенный поглощающий комплекс насыщен обменными катионами – сумма обменных оснований в среднем составляет около 30 мг-экв/100 г почвы.

Сравнительный анализ данных разных лет не выявил существенных различий в почвенных характеристиках. Варьирование наиболее устойчивых почвенных показателей (кислотность, содержание гумуса, сумма обменных оснований) не превышала 30 %. Наиболее значимые различия до 2–2,5 раз наблюдались только по содержанию в почве

элементов минерального питания – азота, фосфора, калия. Эти показатели зависят от доз агромелиорантов, внесённых в различные годы. В связи с этим отмечено как увеличение, так и снижение уровней содержания элементов питания в почве контрольных участков и пунктов. Показатель гранулометрического состава почв характеризовался незначительной вариабельностью.

Таблица 6

Объём исследований на сети радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Ростовской АЭС в период 2001–2018 гг.

Контр. участок (пункт)	Период наблюдения	Объекты окруж. среды	Сельскохозяйственная продукция
КУ-1	2000–2003	Почва (пахотный слой)	Озимая пшеница (зерно, солома); Ячмень (зерно, солома)
КУ-2	2008–2010	Почва (дернина); Почва (послойно в 2008, 2018 гг.)	Естественные травы
КУ-3	2012–2014	Почва (пахотный слой)	Многолетние сеяные травы; Озимая пшеница (зерно, солома); Ячмень (зерно, солома
КУ-4	2016, 2018	Почва (пахотный слой)	Лук (перо, репка); Картофель (клубни); Томаты
КУ-5	2008–2010	Почва (пахотный слой)	Озимая пшеница (зерно, солома); Ячмень (зерно, солома); Тритикале (зерно, солома)
КУ-6	2012–2014	Почва (пахотный слой)	Баклажаны; Кабачки; Капуста; Морковь; Перец; Свекла столовая; Томаты
КУ-7	2016, 2018	Почва (пахотный слой)	Многолетние сеяные травы; Озимая пшеница (зерно, солома); Ячмень (зерно, солома); Сорго
КП-1	2001–2003	Почва (дернина)	Естественные травы, Молоко
КП-2	2008–2010	Почва (дернина)	Многолетние сеяные травы, Молоко; Говядина
КП-3	2012–2014	Вода; Донные отложения	–
КП-4	2016, 2018	Вода; Донные отложения	–
КП-5	2018	Вода; Донные отложения	Рыба лещ

В регионе размещения Ростовской АЭС была изучена динамика удельной активности радионуклидов техногенного происхождения в почвах. За 18-летний период наблюдений содержание ^{90}Sr в почве варьировало в достаточно узких пределах 1,1–8,7 Бк/кг, а ^{137}Cs – от 5,4 до 18,8 Бк/кг. Вариабельность данных по контрольным участкам и пунктам составляла 1,2–4,0 раза для ^{90}Sr и 1,4–3,0 раза – для ^{137}Cs. Тенденции к увеличению содержания техногенных радионуклидов в отобранных почвенных образцах на всей рассматриваемой территории в период наблюдения не было выявлено (рис. 5).

Таким образом, начиная с 2001 г., ввод в эксплуатацию новых энергоблоков Ростовской АЭС не оказал влияния на увеличение содержания техногенных радионуклидов в почвах агроэкосистем, прилегающих к атомной электростанции.

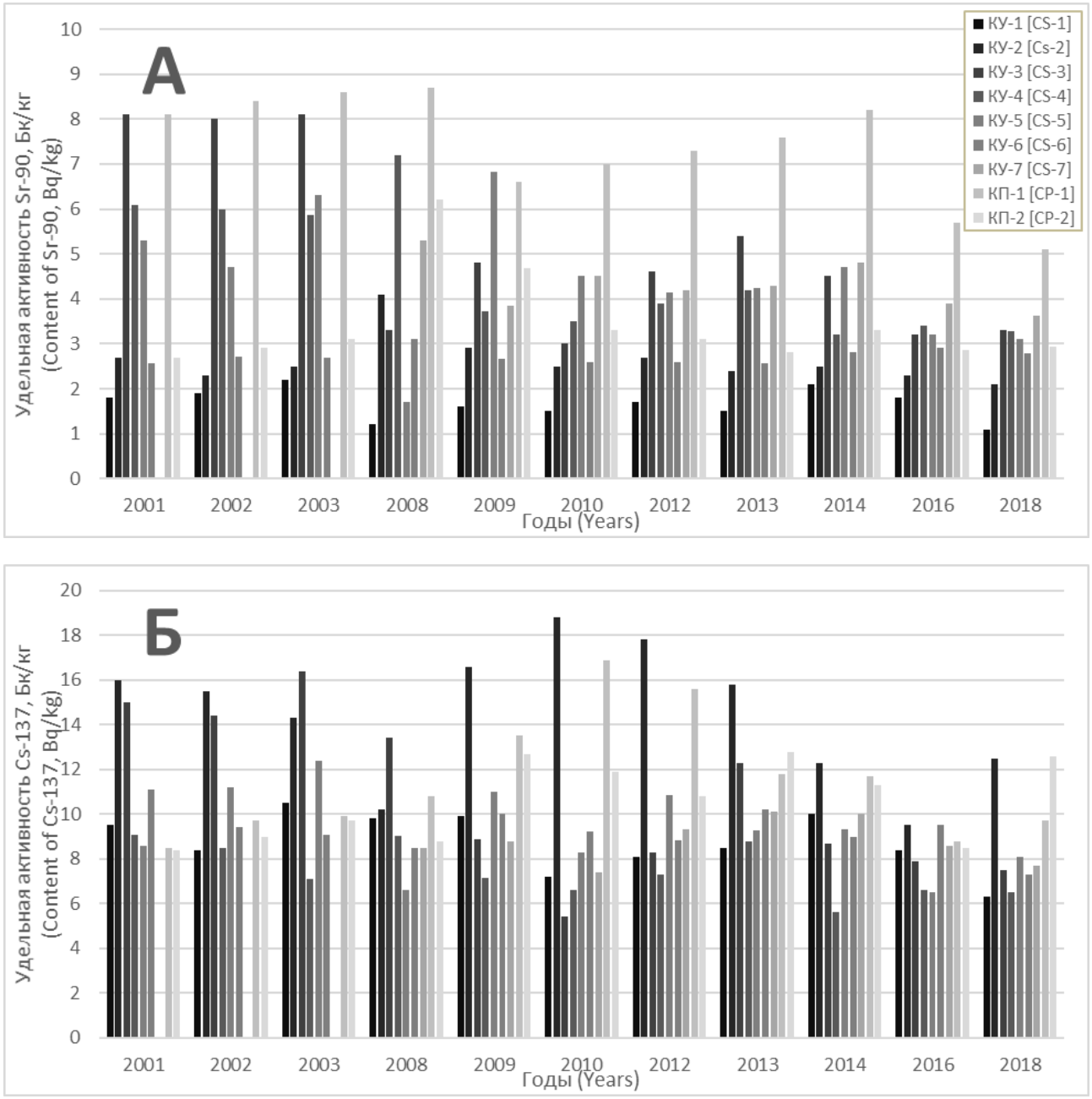


Рисунок 5. Содержание техногенных радионуклидов (**А** – ^{90}Sr, **Б** – ^{137}Cs) в почвах контрольных участков и контрольных пунктов сети радиационно-экологического мониторинга в регионе размещения Ростовской АЭС в период 2001–2018 гг.

Среднее содержание ^{90}Sr в почве в регионе размещения Ростовской АЭС составляет 1,7–7,4 Бк/кг, ^{137}Cs варьирует в пределах 7,5–14,9 Бк/кг. Диапазон вариации среднего содержания в почве естественных радионуклидов составляет: для ^{40}K – 561–634 Бк/кг, для ^{226}Ra – 23,4–27,5 Бк/кг, для ^{232}Th – 32,7–35,9 Бк/кг (табл. 7). Полученные результаты хорошо согласуются как с данными из международных источников (UNSCEAR, 2000), так и с результатами Российских исследований в регионе Ростовской АЭС (Аветисян и др., 2015; Малаева, 2012).

Таблица 7

Содержание естественных и техногенных радионуклидов в почве сельскохозяйственных угодий в регионе размещения Ростовской АЭС в 2001–2018 гг., Бк/кг

Контр. участок	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{90}Sr	^{137}Cs
КУ-1	604 (490–856)*	25,2 (22–31)	34,1(29–40)	1,7 (1,1–2,2)	8,8 (6,3–10,5)
КУ-2	634 (535–713)	25,2 (21–30)	35,5 (26–42)	2,6 (2,1–4,1)	14,9 (9,5–18,8)
КУ-3(	585 (430–652)	24,9 (22–33)	35,9 (28–47)	5,1 (3,0–8,1)	10,7 (5,4–16,4)
КУ-4	570 (416–711)	23,9 (20–31)	32,7 (27–39)	4,6 (3,2–7,2)	7,5 (5,6–9,1)
КУ-5	575 (447–704)	23,4 (20–30)	35,7 (31–49)	4,4 (1,7–6,8)	9,3 (6,5–12,4)
КУ-6	616 (532–728)	23,8 (18–30)	34,6 (29–43)	2,7 (2,6–3,1)	9,3 (7,3–11,1)
КУ-7	586 (482–691)	26,4 (22–34)	35,4 (28–40)	4,3 (3,6–5,3)	8,8 (7,4–10,1)
КП-1	561 (452–687)	25,2 (19–29)	34,3 (21–42)	7,4 (5,1–8,7)	11,5 (8,5–16,9)
КП-2	574 (489–708)	27,5 (20–35)	33,6 (30–40)	3,4 (2,7–6,2)	10,8 (8,4–12,8)
Среднее в РФ**	520 (100–1400)	27 (1–76)	30 (2–79)	–	–
Регион АЭС***	563 (2,9–6200)	41,8 (0,8–69)	38,7 (0,9–84)	–	16,9 (0,5–91)

* В скобках указаны минимальные и максимальные значения; **UNSCEAR, 2000; ***Данные для региона Ростовской АЭС приведены на основе работ (Аветисян и др., 2015; Малаева, 2012).

Мощность дозы гамма-излучения на местности на всем рассматриваемом промежутке времени была достаточна стабильна и находилась на уровне 0,13 мкЗв/ч (при вариабельности 0,09–0,16 мкЗв/ч) (табл. 8).

Таблица 8

Мощность амбиентного эквивалента дозы на контрольных участках в районе расположения Ростовской АЭС, мкЗв

Контрольный участок (пункт)	Мощность амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч		
	Среднее	Минимальное	Максимальное
КУ-1	0,13	0,11	0,15
КУ-2	0,13	0,11	0,15
КУ-3	0,13	0,11	0,15
КУ-4	0,13	0,11	0,15
КУ-5	0,13	0,11	0,16
КУ-6	0,13	0,11	0,15
КУ-7	0,13	0,12	0,15
КП-1	0,13	0,11	0,17
КП-2	0,12	0,09	0,15

Сравнительный анализ данных по удельной активности техногенных радионуклидов в почве пашен и лугопастбищных угодий показал, что на лугопастбищных угодьях уровни содержания ^{90}Sr на 15 %, а ^{137}Cs на 25 % выше, что объясняется проведением на пашне ежегодных агротехнических мероприятий и перераспределением радионуклидов в почвенном профиле на глубину пахотного горизонта (20–25 см).

Для оценки динамики миграции радионуклидов техногенного происхождения в почве целинных лугов, в 2008 и 2018 гг. на контрольном участке КУ-2 (сенокос с естественными многолетними травами) были отобраны пробы почвы послойно на глубину до 25 см (рис. 6).

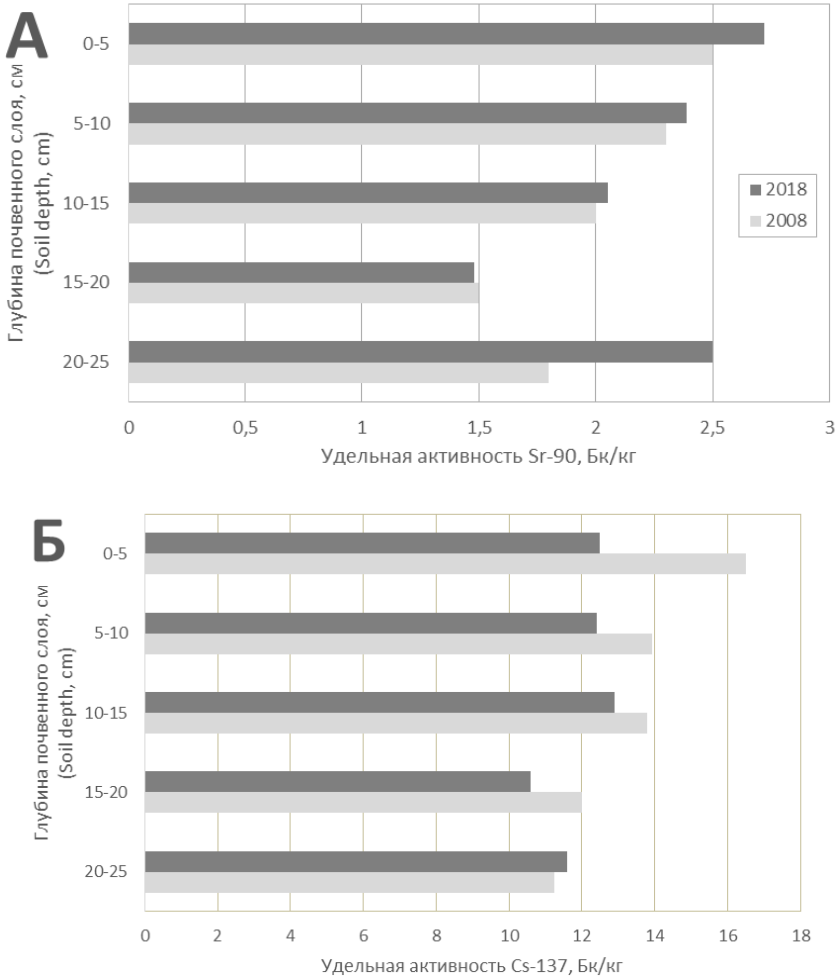


Рисунок 6. Распределение техногенных радионуклидов (**А** – ^{90}Sr, **Б** – ^{137}Cs) в почвенном профиле контрольного участка КУ-2 в 2008 и 2018 гг.

С точки зрения радиационной безопасности человека более значимым является определение содержания радионуклидов в производимой сельскохозяйственной продукции и продуктах питания, а также оценка их соответствия установленным радиологическим стандартам и санитарно-гигиеническим нормативам. Это особенно важно, поскольку в регионе Ростовской АЭС значительную долю в рационе питания населения составляют пищевые продукты местного производства.

Среднее содержание радионуклидов в продовольственном зерне за весь 18-летний период наблюдений находилось в диапазонах: для ^{40}K – 115–209 Бк/кг, для ^{90}Sr – 0,1–0,68 Бк/кг и для ^{137}Cs – 0,23–0,54 Бк/кг (табл. 9).

Вариабельность данных в накоплении радионуклидов в продукции растениеводства объясняется как сортовыми особенностями растений, так и погодными условиями. Различия в дозах применения агромелиорантов в годы исследований в определённой степени также повлияло на миграцию радионуклидов.

Так, различия в накоплении естественных радионуклидов в зерне для одной и той же культуры в разные годы составили 1,1–2,1 раза, а для техногенных – 1,1–4,6 раза, при этом ни на одном контрольном участке не было зафиксировано тенденции к увеличению содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях. Даже максимальные значения удельной активности техногенных радионуклидов в продовольственном зерне (^{90}Sr – 0,74 и ^{137}Cs – 0,90 Бк/кг) были в 55 раз для стронция и в 65 раз для цезия ниже действующих нормативов (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002; СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010).

В кормах для сельскохозяйственных животных (солома, естественные и сеяные травы) радионуклиды накапливаются в большей степени по сравнению с зерном, что связано с биологическими особенностями растений. В соломе зерновых с контрольных участков среднее содержание ^{90}Sr варьировало в диапазоне 0,35–1,31 Бк/кг и ^{137}Cs – 0,97–2,0 Бк/кг, а в зелёной массе трав с контрольных участков этот диапазон составлял 0,44–3,7 Бк/кг – для^{90}Sr и 0,87–1,8 Бк/кг – для ^{137}Cs соответственно (табл. 9). За рассматриваемый 18-летний период наблюдений максимально зафиксированные уровни удельной активности ^{90}Sr в соломе были в 130 раз ниже норматива по содержанию этого радионуклида в кормах (180 Бк/кг по (ВП 13.5.13/06-01, 2000)), а по ^{137}Cs эта разница составила 190 раз (норматив 400 Бк/кг).

Таблица 9

Содержание ^{40}K, ^{90}Sr и ^{137}Cs в сельскохозяйственных растениях в регионе размещения Ростовской АЭС в 2001–2018 гг., Бк/кг

КУ/КП	Растения	Часть урожая	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs
КУ-1	Озимая пшеница	Зерно	146 (130–178)*	0,1 (0,07–0,12)	0,24 (0,17–0,3)
		Солома	329 (256–503)	0,36 (0,3–0,41)	1,34 (0,94–1,6)
	Ячмень	Зерно	143 (128–168)	0,2 (0,17–0,22)	0,34 (0,27–0,5)
		Солома	339 (243–396)	0,43 (0,33–0,6)	1,42 (1,15–1,7)
КУ-2	Ест. травы	Зелёная масса	375 (167–691)	1,2 (0,5–1,9)	1,7 (0,9–2,3)
КУ-3	Озимая пшеница	Зерно	151 (113–195)	0,16 (0,11–0,2)	0,54 (0,35–0,9)
		Солома	348 (101–706)	0,44 (0,41–0,5)	0,97 (0,67–1,5)
	Ячмень	Зерно	208 (157–240)	0,22 (0,18–0,3)	0,47 (0,41–0,5)
		Солома	401 (390–418)	0,49 (0,41–0,6)	1,12 (0,75–1,8)
	Сеян. травы	Зелёная масса	643 (449–955)	3,7 (2,8–4,3)	1,8 (1,0–2,6)
КУ-5	Озимая пшеница	Зерно	154 (133–197)	0,39 (0,18–0,7)	0,45 (0,31–0,6)
		Солома	436 (198–895)	0,74 (0,5–1,16)	1,36 (0,94–1,9)
	Ячмень	Зерно	115 (98–132)	0,68 (0,65–0,7)	0,31(0,25–0,4)
		Солома	223 (190–256)	1,31 (1,22–1,4)	2,0 (1,90–2,10
	Тритикале	Зерно	145 (132–163)	0,17 (0,15–0,2)	0,27 (0,08–0,4)
		Солома	350 (127–630)	0,39 (0,35–0,4)	0,99 (0,89–1,1)
КУ-7	Озимая пшеница	Зерно	150	0,14	0,23
		Солома	180	0,54	1,1
	Ячмень	Зерно	209 (144–296)	0,15 (0,13–0,2)	0,35 (0,31–0,4)
		Солома	344 (136–457)	0,35 (0,27–0,4)	1,48 (1,30–1,6)
	Сеян. травы	Зелёная масса	488 (287–758)	1,16 (0,48–2,3)	1,06 (0,87–1,2)
	Сорго	Зелёная масса	315 (306–324)	0,44 (0,37–0,5)	0,87 (0,81–0,9)
КП-1	Ест. травы	Зелёная масса	335 (165–495)	1,70 (0,53–2,7)	1,22 (0,56–2,3)
КП-2	Сеян. травы	Зелёная масса	394 (291–601)	0,76 (0,58–0,9)	1,21 (0,87–1,7)

* В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

Максимальные уровни содержания ^{90}Sr в траве были в 12 раз ниже норматива (50 Бк/кг) по (ВП 13.5.13/06-01, 2000)), а ^{137}Cs почти в 40 раз (норматив 100 Бк/кг). В целом, представленные данные показывают, что продукция растениеводства, производящаяся в регионе размещения Ростовской АЭС, полностью соответствует радиологическим

нормативам с большими коэффициентами запаса и не оказывает влияния на формирование дополнительной дозовой нагрузки на население.

При проведении радиационно-экологического мониторинга особое внимание уделяется продуктам питания местного производства с минимальной технологической кулинарной переработкой. Анализ результатов многолетних наблюдений показывает, что при нормативе (СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010) по содержанию ^{90}Sr 40 Бк/кг в овощах, картофеле и бахчевых, максимальные уровни удельной активности данного радионуклида в этих видах пищевой продукции, производящейся в регионе Ростовской АЭС, в 45 раз ниже установленного норматива. Максимальные уровни содержания ^{137}Cs в овощах, картофеле и бахчевых в 80 раз ниже норматива СанПиН (80 Бк/кг) (СанПиН 2.3.2.2650-10, 2010) (табл. 10).

Содержание техногенных радионуклидов в продукции животноводства за рассматриваемый период также было довольно низким. В молоке максимальные уровни удельной активности ^{90}Sr были более, чем в 400 раз ниже норматива СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) (25 Бк/кг), а по ^{137}Cs (норматив 100 Бк/кг) эта разница оказалась ещё выше – до 600 раз. Одна проба говядины не может считаться репрезентативной, однако и в ней уровни содержания ^{90}Sr были чрезвычайно низкие.

Аналогичная картина наблюдается и по рыбе из Цимлянского водохранилища. Содержание в пробе леща ^{90}Sr было более, чем в 1 тыс. раз ниже норматива СанПин (СанПин 2.3.2.1078-01, 2002) (100 Бк/кг) и в 2,5 тыс. раз ниже норматива по ^{137}Cs (130 Бк/кг).

Представленные данные позволяют сделать вывод, что при довольно большом наборе пищевой растениеводческой продукции, производящейся в регионе Ростовской АЭС, нельзя выделить группы продуктов с повышенными уровнями накопления радионуклидов или имеющими тенденцию к такому увеличению.

Таблица 10

Содержание ^{40}K, ^{90}Sr и ^{137}Cs в продуктах питания, произведённых в регионе размещения Ростовской АЭС в 2001–2018 гг., Бк/кг

КУ/КП	Продукт питания	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs
КУ-4	Лук перо	89	0,17	0,50
	Лук репка	53 (30–72)*	0,10 (0,04–0,15)	0,25 (0,10–0,42)
	Картофель	122 (81–53)	0,15 (0,06–0,28)	0,34 (0,10–1,0)
	Томаты	109	0,07	0,01
КУ-6	Баклажаны	93 (69–122)	0,05 (0,01–0,15)	0,12 (0,04–0,21)
	Кабачки	81 (60–157)	0,05 (0,03–0,09)	0,07 (0,02–0,1)
	Капуста	83 (46–143)	0,09 (0,05–0,17)	0,12 (0,04–0,2)
	Морковь	106 (57–137)	0,13 (0,07–0,19)	0,19 (0,09–0,3)
	Перец	82 (46–108)	0,07 (0,05–0,09)	0,14 (0,07–0,24)
	Свёкла столовая	114 (64–145)	0,32 (0,07–0,9)	0,20 (0,12–0,28)
	Томаты	80 (59–123)	0,05 (0,03–0,09)	0,09 (0,06–0,16)
КП-1	Молоко	127 (40–180)	0,02 (0,01–0,06)	0,06 (0,01–0,16)
КП-2	Молоко	134 (40–152)	0,02 (0,01–0,03)	0,06 (0,02–0,17)
	Говядина	63	0,02	0,07
КП-5	Рыба лещ	87	0,09	0,05

* В скобках указаны минимальные и максимальные значения.

Следует отметить достаточно хорошую сходимость полученных нами результатов с данными радиационно-гигиенического мониторинга Санкт Петербургского НИИРГ (Прокопенко и др., 2010). Так, для периода 2007–2009 гг. в работе (Прокопенко и др., 2010) представлены результаты по содержанию ^{137}Cs в молоке из региона Ростовской АЭС в диапазоне 0,04–0,12 Бк/кг, в говядине – 0,1–0,2 Бк/кг и в овощах – 0,05–0,09 Бк/кг, что практически полностью совпадает с полученными нами данными для более длительного промежутка времени.

Приведённые в настоящей работе результаты, также хорошо коррелируют и с данными Роспотребнадзора, полученными на сети мониторинга пищевых продуктов для Ростовской области (Соловьев и др., 2010). Таким образом, можно сделать вывод, что пищевая продукция из региона Ростовской АЭС, с момента пуска в 2001 г. первого энергоблока и по настоящее время, полностью соответствует установленным в СанПиН нормативам по содержанию радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs.

При прогнозировании накопления радионуклидов в сельскохозяйственной и пищевой продукции используются коэффициенты перехода (КП), равные отношению концентрации радионуклида в сельскохозяйственных культурах (или кормах и продукции растениеводства) к плотности загрязнения почв. Анализ полученных при мониторинге результатов показывает, что коэффициенты перехода радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию невелики, что обусловлено, в основном, высокой сорбционной способностью каштановых почв. Минимальными коэффициентами перехода характеризуются овощные культуры. Коэффициенты перехода ^{90}Sr в овощи в зависимости от вида продукции находятся в диапазоне 0,04–0,17 (Бк/кг)/(кБк/м^2), а для ^{137}Cs этот параметр варьирует в пределах 0,008–0,2 (Бк/кг)/(кБк/м^2). Максимальные КП радионуклидов отмечены в травах. КП ^{90}Sr в естественные и многолетние сеяные травы находятся в диапазоне 0,75–2,2 (Бк/кг)/(кБк/м^2), а для ^{137}Cs этот показатель составляет 0,28–0,86 (Бк/кг)/(кБк/м^2). Различия в коэффициентах перехода между овощами и травами достигают 50 раз, а в среднем составляют 10–20 раз. Следует отметить, что все виды культур накапливают в среднем в 2–5 раз больше ^{90}Sr по сравнению с ^{137}Cs.

В регионе размещения АЭС радионуклиды станционного происхождения поступают в водоём-охладитель как в составе сбросных вод, так и путём осаждения радионуклидов из воздуха. Радионуклиды, попадающие в водоёмы, перераспределяются в толще воды и обычно накапливаются в придонных отложениях, бентосе, водных растениях и рыбе. Согласно Нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (СанПин 2.6.1.2523-09, 2009), уровни вмешательства при содержании в воде отдельных радионуклидов составляют: ^{90}Sr – 4,9 Бк/кг, ^{37}Cs – 11 Бк/кг. Результаты обследования трёх контрольных точек показывают, что содержание техногенных радионуклидов в воде Цимлянского водохранилища ниже уровня вмешательства по стронцию в 163 раза, а по цезию – в 183 раза (табл. 11).

Содержание естественных радионуклидов в донных отложениях Цимлянского водохранилища достаточно близко коррелирует с таковыми в почвах региона наблюдения. Удельная активность техногенных радионуклидов в донных отложениях несколько ниже по сравнению с почвами.

Таблица 11

Содержание естественных и техногенных радионуклидов в воде и донных отложениях Цимлянского водохранилища в регионе размещения Ростовской АЭС в 2018 гг., Бк/кг

Контрольный пункт	Вода			Донные отложения				
	^{40}K	^{90}Sr	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th	^{90}Sr	^{137}Cs
КП-3	0,21	0,03	0,05	458	24,6	30,8	0,3	2,0
КП-4	0,24	0,02	0,05	345	24,8	30,6	0,34	3,0
КП-5	0,24	0,01	0,06	456	26,5	31,5	1,08	1,0

Таким образом, можно заключить, что радиоэкологическая ситуация в Цимлянском водохранилище, имеющем важное хозяйственное значение для региона, является благополучной. Полученные нами результаты мониторинга по содержанию техногенных радионуклидов в воде и продуктах питания (молоко, мясо, рыба, картофель, овощи) хорошо согласуются с данными радиационно-гигиенического мониторинга, проводимого в регионе Ростовской АЭС специалистами ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (Шандала и др., 2015).

Оценка вклада выбросов Ростовской АЭС в загрязнение сельскохозяйственной продукции и дозы облучения населения

Прогноз влияния нормализованных Ростовской АЭС выбросов был сделан на основе данных проектной документации с помощью модели, описывающей перенос радионуклидов адаптированной к условиям региона (Фесенко, 1997). Для оценки параметров модели и её верификации использовали данные радиационно-экологического мониторинга, проводимого в районе этой АЭС. Расчёты показывают, что ^{131}I и ^{137}Cs составляют основную долю в суммарной активности радионуклидов станционного происхождения (Санжарова, 1997). Накопление ^{131}I в сельскохозяйственной продукции определяется аэральным загрязнением (табл. 12). Отметим, что оценки, представленные в таблице 12, получены для ситуации работы четырёх энергоблоков, максимально неблагоприятных погодных условий и являются заведомо консервативными.

Размеры поступления радионуклида в продукцию зависят от положения угодий относительно АЭС. Возможные уровни накопления ^{131}I будут чрезвычайно малы. Так, даже максимально возможное содержание радионуклида в молоке 250 Бк/л в 4–40 раз меньше допустимой концентрации для уровней А и Б на аварийный период, регламентированной СанПиН 2.6.1.2523-09.

Таблица 12

Максимальные концентрации ^{131}I в молоке, Бк/л

Расстояние от АЭС, км	Направление от Ростовской АЭС			
	Север	Восток	Юг	Запад
3,5	1,9	2,9	1,6	3,9
4,5	1,6	2,4	1,2	3,2
5,9	1,2	1,8	0,8	2,4
8,4	0,8	1,3	0,64	1,6
12,3	0,42	0,8	0,4	1,1
17,3	0,36	0,52	0,29	0,72
24,5	0,24	0,36	0,16	0,48
34,6	0,16	0,16	0,12	0,31

Загрязнение продукции ^{137}Cs определяет радиационную ситуацию в течение длительного периода времени. Расчёты показали, что при функционировании Ростовской АЭС в штатном режиме через 30 лет эксплуатации уровни загрязнения сельскохозяйственной продукции за счёт «станционного» ^{137}Cs увеличатся для молока и мяса не более, чем на 10 %, а для картофеля, озимой пшеницы и овощей – от 9 до 20 %. Уровни накопления в сельскохозяйственной продукции ^{137}Cs станционного происхождения в 20–650 раз ниже, чем за счёт глобальных выпадений. Вклад их составляет 0,23–2,4 % и через 30 лет функционирования АЭС ее вклад в техногенное увеличится до 0,61–5,9 % с учетом распада «глобального» цезия (табл. 13).

Таблица 13

Сравнительная оценка уровней загрязнения сельскохозяйственной продукции за счёт различных источников поступления ^{137}Cs (для выбросов 4 энергоблоков)

Культура	Мониторинг, Бк/кг*	Расчётная оценка, Бк/кг		
		Глобальные выпадения**, Бк/кг	Выбросы Рост. АЭС, Бк/кг	
			2008 год	2038 год
Пшеница озимая	0,24	0,3	$4{,}0\times10^{-3}$ (0,23)	$4{,}4\times10^{-3}$ (0,61)
Картофель	0,05	0,05	$2{,}0\times10^{-3}$ (4,0)	$2{,}4\times10^{-3}$ (8,8)
Молоко	0,06	0,04	$2{,}1\times10^{-3}$ (5,2)	$2{,}4\times10^{-3}$ (10,6)
Мясо	0,07	0,1	$6{,}0\times10^{-3}$ (6,1)	$6{,}4\times10^{-3}$ (12,9)

*Среднее значение.
**Среднее значение на 2008 год.

Таблица 14

Вклад путей существующего облучения населения от техногенных радионуклидов в регионе расположения Ростовской АЭС, мкЗв/год

Радионуклид	Доза облучения, мкЗв/год			
	От облака	От поверхности почвы	От ингаляции	От продуктов питания
От существующего облучения техногенными радионуклидами: 4,7 мкЗв в год				
^{90}Sr	–	–	–	1,4
^{137}Cs	$1{,}1\times10^{-4}$	1,9	$7{,}4\times10^{-6}$	1,2
Сумма	$1{,}1\times10^{-4}$	1,9	$7{,}4\times10^{-6}$	2,5
От газоаэрозольных выбросов АЭС: 0,4 мкЗв в год				
	0,28	$6{,}0\times10^{-2}$	$1{,}0\times10^{-4}$	$7{,}0\times10^{-2}$

Дозовую нагрузку на население от существующего облучения рассчитывали, используя данные многолетнего мониторинга района расположения Ростовской АЭС по (МР 2.6.1.0063-12, 2013). Дозу внутреннего облучения от продуктов питания оценивали, используя данные об их потреблении населением, проживающем в регионе расположения Ростовской АЭС (МТ 1.2.1.15.1176-2016). Дозу облучения от атмосферных выбросов АЭС рассчитывали по усредненным показателям за последние 5 лет (табл. 15), на настоящее время с момента введения в эксплуатацию первого энергоблока (IAEA, 2001).

Расчёт проводили в рамках консервативного подхода, рассчитывая дозу облучения в точке, где отмечаются максимальные приземные активности радионуклидов в результате газоаэрозольных выбросов из вентиляционных труб высотой 100 м.

Необходимо отметить существенные различия путей облучения, характерных для различных сценариев загрязнения (табл. 14). Для газоаэрозольных выбросов Ростовской АЭС основным путём облучения является внешнее облучение от облака, формируемое инертными газами (69 %), значительный вклад в которое вносит ^{88}Kr (рис. 7).

Вклад облучения от поверхности почвы и продуктов питания примерно одинаков и составляет 14–17 %, и сформирован в первом случае ^{60}Co, во втором – ^{137}Cs.

Основной путь в ситуации с существующим облучением радионуклидами, не связанными с выбросами АЭС – облучение от продуктов питания (58 %). В связи с низкой плотностью поверхностного загрязнения ^{137}Cs, доза облучения от поверхности земли достаточно мала и составляет 1,9 мкЗв.

Таблица 15

Выбросы радионуклидов в атмосферу Ростовской АЭС, Бк/год (Радиационная обстановка ..., 2014-2019)

Радионуклид	Годы						Среднее
	2018	2017	2016	2015	2014	2013	
^{60}Co	$5{,}2\times10^{7}$	$5{,}1\times10^{7}$	$7{,}1\times10^{6}$	$6{,}4\times10^{6}$	$1{,}5\times10^{6}$	–	$2{,}4\times10^{7}$
^{131}I	$8{,}1\times10^{7}$	$3{,}4\times10^{7}$	$1{,}2\times10^{8}$	$1{,}0\times10^{8}$	$5{,}2\times10^{6}$	$2{,}1\times10^{7}$	$6{,}0\times10^{7}$
^{134}Cs	$2{,}6\times10^{7}$	$2{,}5\times10^{7}$	$3{,}1\times10^{6}$	$4{,}8\times10^{6}$	–	–	$1{,}5\times10^{7}$
^{137}Cs	$5{,}0\times10^{7}$	$5{,}4\times10^{7}$	$9{,}3\times10^{6}$	$7{,}4\times10^{7}$	$4{,}1\times10^{4}$	$2{,}8\times10^{5}$	$3{,}1\times10^{7}$
^{83m}Kr	$1{,}5\times10^{12}$	$1{,}3\times10^{12}$	$1{,}3\times10^{12}$	$1{,}2\times10^{12}$	$6{,}3\times10^{10}$	$5{,}9\times10^{10}$	$9{,}1\times10^{11}$
^{85m}Kr	$4{,}9\times10^{12}$	$4{,}1\times10^{12}$	$4{,}2\times10^{12}$	$4{,}0\times10^{12}$	$2{,}1\times10^{11}$	$1{,}9\times10^{11}$	$2{,}9\times10^{12}$
^{85}Kr	$7{,}5\times10^{11}$	$6{,}3\times10^{11}$	$6{,}5\times10^{11}$	$6{,}1\times10^{11}$	$3{,}1\times10^{10}$	$2{,}9\times10^{10}$	$4{,}5\times10^{11}$
^{87}Kr	$3{,}1\times10^{12}$	$2{,}6\times10^{12}$	$2{,}7\times10^{12}$	$2{,}5\times10^{12}$	$1{,}3\times10^{11}$	$1{,}2\times10^{11}$	$1{,}9\times10^{12}$
^{88}Kr	$1{,}1\times10^{13}$	$9{,}3\times10^{12}$	$9{,}5\times10^{12}$	$9{,}0\times10^{12}$	$4{,}6\times10^{11}$	$4{,}3\times10^{11}$	$6{,}6\times10^{12}$
^{131m}Xe	$5{,}4\times10^{11}$	$4{,}6\times10^{11}$	$4{,}6\times10^{11}$	$4{,}4\times10^{11}$	$2{,}3\times10^{10}$	$2{,}1\times10^{10}$	$3{,}2\times10^{11}$
^{133}Xe	$6{,}0\times10^{13}$	$5{,}1\times10^{13}$	$5{,}2\times10^{13}$	$4{,}9\times10^{13}$	$2{,}5\times10^{12}$	$2{,}4\times10^{12}$	$3{,}6\times10^{13}$
^{135}Xe	$1{,}7\times10^{13}$	$1{,}4\times10^{13}$	$1{,}4\times10^{13}$	$1{,}4\times10^{13}$	$7{,}0\times10^{11}$	$6{,}6\times10^{11}$	$1{,}0\times10^{13}$
^{138}Xe	$6{,}6\times10^{11}$	$5{,}5\times10^{11}$	$5{,}7\times10^{11}$	$5{,}4\times10^{11}$	$2{,}8\times10^{10}$	$2{,}6\times10^{10}$	$3{,}9\times10^{11}$
Сумма ИРГ	$9{,}9\times10^{13}$	$8{,}4\times10^{13}$	$8{,}6\times10^{13}$	$8{,}1\times10^{13}$	$4{,}2\times10^{12}$	$3{,}9\times10^{12}$	$6{,}0\times10^{13}$

Примечание. Активности ИРГ рассчитаны исходя из суммарной активности на основе их процентного содержания в выбросе реактора (IAEA, 2017).

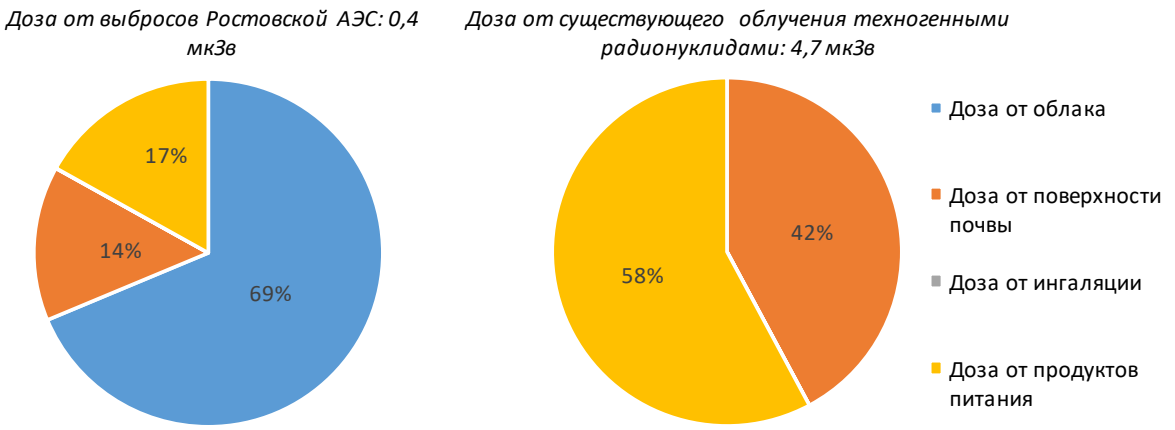


Рисунок 7. Вклад путей облучения населения, связанных с различными источниками загрязнения

Значимыми продуктами питания являются хлебные продукты, в связи с более высоким содержанием ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с остальными продуктами в районе расположения Ростовской АЭС (рис. 8). «Критическими» продуктами питания в случае поступления «станционных» радионуклидов в окружающую среду являются молоко и мясо. Дозообразующим радионуклидом при облучении от потребления мяса является ^{137}Cs, в случае потребления молока значимым также является ^{131}I. Доза облучения от ингаляции в обоих ситуациях облучения незначительна и составляет менее 1 % (рис. 8).

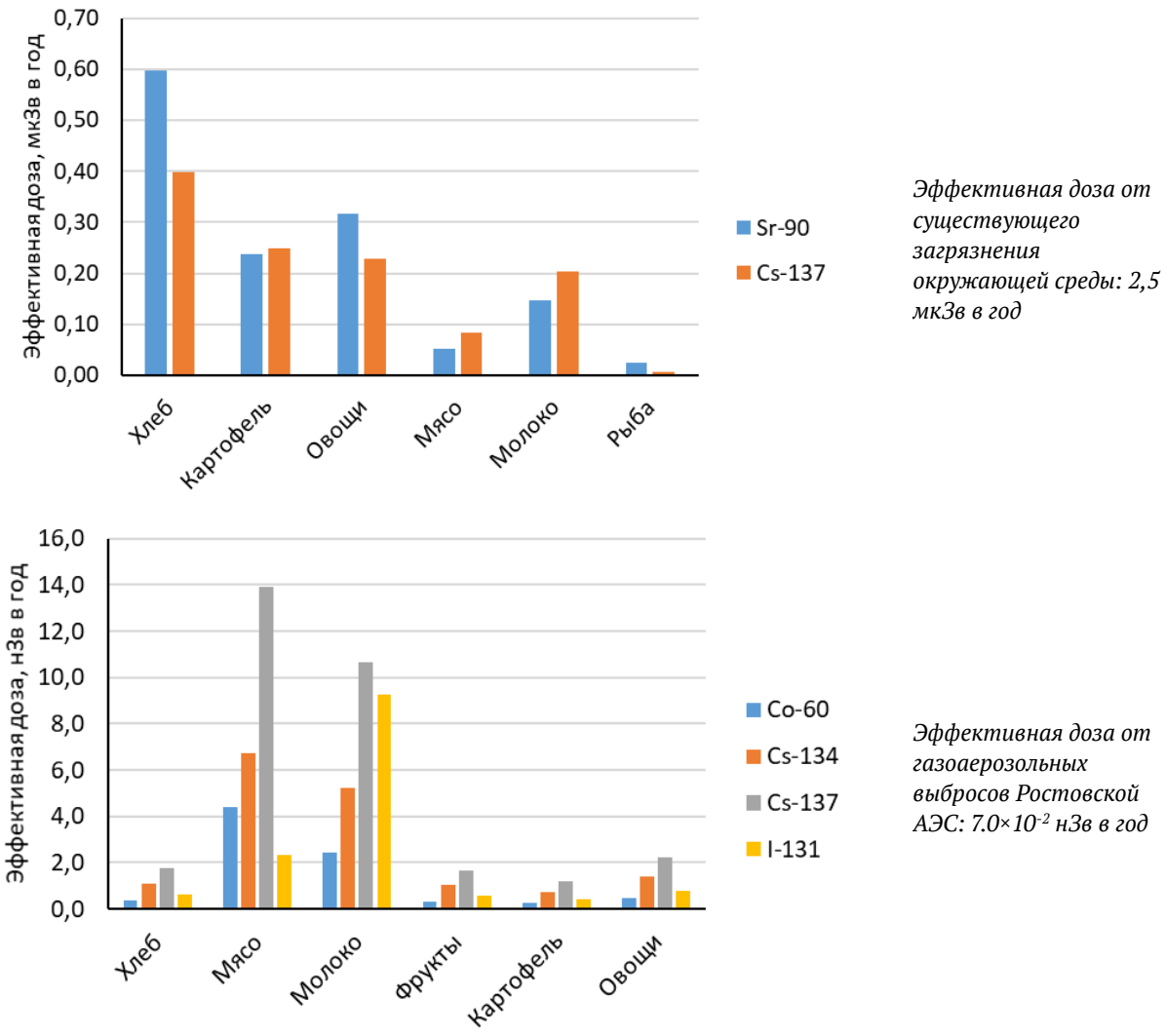


Рисунок 8. Вклад основных продуктов питания в облучение взрослого населения в зоне Ростовской АЭС

В то же время, в связи с отсутствием данных по содержанию в продуктах питания, а также в информации о газоаэрозольных выбросах Ростовской АЭС таких биофильных элементов как ^{14}C и ^{3}H, возможна недооценка дозы облучения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что функционирование Ростовской АЭС в нормальном режиме эксплуатации не приведёт к практически регистрируемому увеличению содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, заметному увеличению облучения населения и, как следствие, к ухудшению радиологической обстановки в районе размещения этой станции.

Заключение

Анализ 18-летних результатов наблюдений за радиоэкологической обстановкой в регионе размещения Ростовской АЭС, полученных на сети радиационно-экологического мониторинга, позволяет сделать вывод о том, что эксплуатация Ростовской АЭС в штатном режиме не приводит к регистрируемому увеличению содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, продуктах питания и объектах окружающей среды. В тоже время, при дальнейшем планировании работ по радиационно-экологическому мониторингу в регионе размещения Ростовской АЭС, следует провести более детальный анализ перечня контролируемых дозообразующих радионуклидов,

поступающих в окружающую среду в составе выбросов и сбросов станции. Представленный перечень и вклады радионуклидов в суммарную дозовую нагрузку не являются определяющими, поскольку основываются на анализе данных по контролируемым выбросам с Ростовской АЭС и заложенным параметрам модели расчёта доз, однако они показывают, что на формирование доз облучения населения помимо общепринятых контролируемых биологически значимых ^{90}Sr и ^{37}Cs могут оказывать влияние и другие радионуклиды, что требует дальнейшего изучения.

Литература

Аветисян С.Р., Бураева Е.А., Гончаренко А.А., и др. Естественные и искусственные радионуклиды в растительных объектах Ростовской области // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 533.

ВП 13.5.13/06-01. Государственная система ветеринарного нормирования Российской Федерации. Радиационная безопасность. Ветеринарные правила обеспечения радиационной безопасности животных и продукции животного происхождения. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}SR и ^{137}Cs: ветеринарные правила и нормы (утв. Министром сельского хозяйства России 19.12.2000).

Малаева Т.Ю. Радиационный контроль района размещения Ростовской АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2012. № 4(5). С. 7–13.

Методические указания по проведению комплексного агрохимического обследования почв сельскохозяйственных угодий (утв. заместителем Министра сельского хозяйства РФ А.Г. Ефремовым 10 июня 1993). М.: Центр научно-технической информации, пропаганды и рекламы, 1994. 98 с.

МР 2.6.1.0063-12. Контроль доз облучения населения, проживающего в зоне наблюдения радиационного объекта, в условиях его нормальной эксплуатации и радиационной аварии: Мелодические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2013. 55 с.

МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух: методика. Обнинск: НПО «Тайфун», 2016, 76 с.

МУ-13.5.13-00. Организация государственного радиоэкологического мониторинга агроэкосистем в зоне воздействия радиационно-опасных объектов: Методические указания (утв. Министерством сельского хозяйства РФ 7 августа 2000 г.). М., 2000. 28 с.

Прокопенко С.И. и др. Оценка радиационной обстановки в зоне наблюдения Волгодонской атомной электростанции за 2007–2009 гг. // Радиационная гигиена. 2010. Том 3. № 3. С. 47–50.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2014. 357 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2015. 350 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2016. 346 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2017. 396 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2018. 360 с.

Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году: ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2019. 324 с.

Радиационно-экологическая обстановка и социально-экономическое состояние региона Ростовской (Волгодонской АЭС). Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2008. 37 с.

Санжарова, Н.И. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций: дис. … д-ра биол. наук. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 1997. 366 с.

Санжарова и др. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010. 276 с.

СанПиН 2.3.2.1078-01. Продовольственное сырьё и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности

пищевых продуктов (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.; введ. в действие с 01.09.2002 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 31.05.2002 г.): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Минздрав России, 2002. 145 с.

СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.04.2003 г.; введ в действие с 20.06.2003 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.04.2003 г. № 69). М.: Минздрав РФ, 2003. 36 с.

СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) (утв. и введ. в действие постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 07 июля 2009 № 47): санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

СанПиН 2.3.2.2650-10. Дополнения и изменения № 18 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (утв. постановлением Главного государственного врача РФ от 28.06.2010 г. № 71). М., 2010. 22 с.

Соловьев М.Ю., Калинина М.В., Жукова Т.В. Опыт совершенствования радиационно-гигиенического мониторинга и радиационно-гигиенической паспортизации на территории Ростовской области // Радиационная гигиена. 2010. Том 3. № 1. С. 40–44.

СТО 1.1.1.04.001.0143-2015. Положение о годовых отчётах по оценке состояния безопасной эксплуатации энергоблоков атомной станции: стандарт организации (утв. первым заместителем генерального директора по эксплуатации АЭС в РФ 23.11.2015 г.; введ. в действие приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 02.12.2015 г. № 9/1341-П. М., 2015. 231 с.

Фесенко С.В. Аграрные и лесные экосистемы: радиоэкологические последствия и эффективность защитных мероприятий при радиоактивном загрязнении: дис. … д-ра биол. наук. Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 1997. 410 с.

Шандала Н.К., Коренков И.П., Романов В.В. Состояние радиационно-гигиенической обстановки в районе размещения АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2015. Т. 60. № 2. С. 15–21.

IAEA (2001). Safety Reports Series No.19. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Vienna: IAEA, 2001. 229 p.

IAEA (2017). International peer review of the environmental impact assessment performed for the licence application of the Baltic-1 nuclear power plant, Kaliningrad, Russian Federation. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017. 92 c.

UNSCEAR (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly with Scientific Annexes). Volume 1 Sources. Annex B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. New York: United Nations, 2000. P. 84–156.

НЕКОТОРЫЕ УРОКИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Фесенко С.В.

ФГБНУ ВНИИ радиологии и агроэкологии

Выбросы и сбросы радионуклидов в атмосферу и водную среду являются обычной практикой в ядерной и других отраслях промышленности. Важнейшим нормативным требованием для обеспечения надлежащей радиационной защиты населения является мониторинг источника сбросов и окружающей среды. Радиоэкологический мониторинг позволяет получить информацию о фактическом количестве выброшенного радиоактивного материала, концентрациях радионуклидов в окружающей среде, дозах облучения населения. Мониторинг необходим для демонстрации соблюдения установленных пределов облучения населения, а также предоставления данных, помогающих оптимизировать радиационную защиту.

В международных документах мониторинг определён как «измерение дозы, мощности дозы или активности радионуклидов в окружающей среде с целью оценки или контроля облучения, а также интерпретации полученных результатов» (IAEA, 2010; 2014). «Измерение» дозы означает измерение эквивалентного количества дозы в качестве замены дозы, которое невозможно измерить непосредственно. Измерения могут касаться уровней радиации, концентраций радионуклидов в воздухе и окружающей среде или индивидуальных доз. Результаты этих измерений используются для оценки радиационной опасности радиационного объекта или технологии, обычно в терминах доз облучения населения.

Неконтролируемые выбросы и сбросы радионуклидов в атмосферу и водную среду могут произойти в результате ядерной или радиологической аварии. В этом случае также необходим мониторинг источника выброса и окружающей среды. Мониторинг используется как для оценки радиационного облучения населения, так и для определения действий, необходимых для защиты населения, включая более долгосрочные контрмеры.

Мониторинг источников и окружающей среды, связанный с выбросами радионуклидов в окружающую среду, является предметом ряда норм (стандартов) безопасности МАГАТЭ, в частности, стандарты безопасности МАГАТЭ РС-G-1.8 «Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection» и Safety Reports Series No. 64 «Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. International Atomic Energy Agency». В настоящее время заканчивается разработка еще одного стандарта безопасности, посвящённого мониторингу окружающей среды.

В настоящем сборнике трудов содержится информация о практических аспектах, разработки и функционирования программ и систем мониторинга, радиоэкологического мониторинга, проводимого ВНИИРАЭ на российских и зарубежных АЭС. Несмотря на то, что рассмотрен опыт мониторинга на 5 АЭС различного типа, находящихся в различных почвенно-климатических зонах, представленные результаты являются достаточно общими для ведения радиоэкологического мониторинга на территории Российской Федерации. Представленные в настоящей публикации статьи охватывают актуальные проблемы радиационно-экологического мониторинга, включая: общий подход к мониторингу (Санжарова и др., 2020); методические аспекты оценки воздействия предприятий ядерной энергетики, представленные в настоящей публикации (Карпенко и др., 2020); АЭС и, собственно, результаты радиационно-экологического мониторинга в четырех почвенно-климатических зонах Российской Федерации (Исамов и др., 2020; Карпенко и др., 2020; Кузнецов и др., 2020; Панов и др., 2020; Цыгвинцев и др., 2020). Результаты позволяют оценить эффективность

систем мониторинга и провести более глубокий анализ, чем это возможно из мониторинга, проводимого на одном объекте.

Одним из уроков анализа результатов проведения мониторинга на Российских АЭС является то, что законодательство Российской Федерации в области радиационной безопасности и ядерного регулирования не отвечает современным требованиям и существующей международной практике. Действующее нормативное обеспечение не соответствует Основным Стандартам Радиационной Безопасности, что ограничивает распространение Российских технологий за рубежом. В регулирование радиационной безопасности в Российской Федерации до настоящего времени не внедрены современные подходы к классификации ситуаций облучения, включая ситуации существующего облучения, планового облучения и аварийного облучения. Не рассмотрены особенности, присущие каждой ситуации облучения, и не введено соответствующее регулирование.

Отсутствует системность в методическом обеспечении, включая требования к мониторингу источника и окружающей среды, необходимую нормативную поддержку. Опыт использования международных кодов не анализируется, а рекомендации по оценкам безопасности, чётко определённые в Международных Стандартах Безопасности, не рассматриваются в Российском Законодательстве. Российские коды для оценки предельно допустимых выбросов АЭС, доз облучения населения носят закрытый характер, что препятствует оценкам с учётом региональных особенностей размещения АЭС и практически полностью ограничивает их использование за границами Российской Федерации.

В базовом документе, регламентирующем радиационную безопасность АЭС (СанПин 2.6.1.24-03, 2003) декларируется, что «Радиационная безопасность атомных станций считается достаточной, если техническими средствами и организационными мерами обеспечивается «непревышение» установленных НРБ-99 основных пределов доз облучения персонала, населения и соблюдение требований настоящих правил». В то же время оценка «непревышения» основных пределов доз не может рассматриваться корректной, если основные дозообразующие радионуклиды, такие как ^{14}C и ^{3}H не учтены при оценке дозовых квот и, соответственно, допустимых выбросов. Между тем, анализ выбросов различных реакторов, выполненный Научным Комитетом ООН по действию Атомной Радиации, ясно показывает рейтинг радионуклидов с точки зрения формирования коллективной дозы облучения населения (табл. 1).

Проведённые в последние годы исследования выбросов Российских АЭС и максимальных доз в зоне их размещения в целом согласуются с данными НКДАР (табл. 2). Отметим, что расчёты выполнены на основе новых рекомендаций по оценке доз и установлению ДВ и ДС, разработанных НПО «Тайфун» и утверждённых Росэнергоатомом (МТ 1.2.1.15.1176-2016, 2016). В то же время, статус документа, введённого приказом Росэнергоатома, остаётся неопределённым. Документ не проходил экспертизу организациями и ведомствами и его научные основы остаются неясными, а сам документ относится к категории технических документов с ограниченным доступом.

Отметим, что разработка и утверждение такого рода документов не может быть прерогативой только эксплуатирующей организацией и должны приниматься организациями, отвечающими за регулирование ядерной безопасности.

Серьёзно ослаблены требования к практическому опыту организаций, обладающих потенциалом и возможностями по проведению мониторинга, а формальные требования к отбору таких организаций основывается на выборе организаций, предлагающих наиболее низкую цену, без анализа квалификации персонала и технического обеспечения. Контракты носят краткосрочный характер, в результате отсутствует возможность долгосрочной оценки воздействия предприятий на окружающую среду и человека.

Таблица 1

Выбросы, сбросы и коллективные дозы, формируемые реакторами различного типа
(UNSCEAR, 2016)

Радионуклиды		Водо-водяной реактор	Кипящий водо-водяной реактор	Реактор на быстрых нейтронах
		ВВЭР	РБМК	БН
		Газоаэрозольные выбросы		
^{14}C	Выброс (ПБк)	$4{,}1 \times 10^{-2}$	$3{,}5 \times 10^{-2}$	$4{,}8 \times 10^{-5}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$1{,}0 \times 10^{1}$	9,5	–
^{3}H	Выброс (ПБк)	$3{,}9 \times 10^{-1}$	$1{,}1 \times 10^{-1}$	$2{,}0 \times 10^{-2}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$8{,}2 \times 10^{-1}$	$2{,}2 \times 10^{-1}$	$4{,}1 \times 10^{-2}$
ИРГ	Выброс (ПБк)	2,0	2,92	$1{,}4 \times 10^{-2}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$2{,}2 \times 10^{-1}$	1,25	$1{,}6 \times 10^{-3}$
^{131}I	Выброс (ПБк)	$5{,}6 \times 10^{-5}$	$2{,}1 \times 10^{-5}$	$8{,}0 \times 10^{-8}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$2{,}5 \times 10^{-4}$	$1{,}8 \times 10^{-4}$	$3{,}6 \times 10^{-7}$
Другие	Выброс (ПБк)	$5{,}6 \times 10^{-6}$	$3{,}3 \times 10^{-3}$	$4{,}0 \times 10^{-8}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$4{,}8 \times 10^{-3}$	2,8	$3{,}5 \times 10^{-5}$
		Жидкие сбросы		
^{3}H	Выброс (ПБк)	3,7	$1{,}2 \times 10^{-1}$	$6{,}8 \times 10^{-4}$
	Коллект. доза (чел Зв)	2,4	$7{,}8 \times 10^{-2}$	$4{,}4 \times 10^{-4}$
Другие	Выброс (ПБк)	$2{,}0 \times 10^{-3}$	$5{,}3 \times 10^{-4}$	$9{,}2 \times 10^{-6}$
	Коллект. доза (чел Зв)	$6{,}7 \times 10^{-1}$	$1{,}8 \times 10^{-1}$	$3{,}0 \times 10^{-3}$

Таблица 2

Дозы облучения населения от газоаэрозольных выбросов Российских АЭС
(Vasyanovich et al, 2019)

АЭС	мкЗв/год	Вклад в дозу, %							
		ИРГ	^{3}H	^{14}C	^{60}Co	^{131}I	^{134}C	^{137}Cs	Другие
Балаковская	$1{,}89\times10^{-1}$	22,8	26,2	50,2	0,6	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
Белоярская	$1{,}58\times10^{-1}$	31,3	7,5	32,6	2,8	<0,1	2,0	23,8	<0,1
Билибинская	$9{,}57\times10^{-1}$	0,2	1,6	97,8	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Калининская	$6{,}71\times10^{-1}$	4,7	15,1	77,8	0,6	<0,1	0,1	1,6	0,1
Кольская	$7{,}26\times10^{-2}$	38,4	31,9	19,1	3,3	<0,1	0,1	4,7	2,5
Курская	6,25	22,3	1,1	31,0	27,0	0,8	1,1	14,4	2,3
Ленинградская	5,16	31,3	2,5	53,4	5,9	<0,1	0,9	4,2	1,8
Нововоронежская	$5{,}5\times10^{-7}$	15,9	55,1	19,0	0,8	0,3	0,9	6,0	2,0
Ростовская	$6{,}79\times10^{-2}$	20,5	57,8	20,4	0,1	<0,1	0,5	0,5	0,2
Смоленская	5,87	13,6	0,6	85,6	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1

Не определена роль мониторинга окружающей среды в общей системе радиационной безопасности, не определены ответственность, права и обязанности организаций, осуществляющих мониторинг. Отсутствуют требования к мониторингу источников радиоактивных выбросов. Так, в уже упомянутом документе (СанПин

2.6.1.24-03, 2003) термин «мониторинг» не упоминается, не говоря уже о том, что он должен быть регламентирован, как основное средство, обеспечивающее контроль безопасности АЭС. Требуют совершенствования методики отбора проб, подготовки проб к измерениям и измерения радионуклидов, определяющих облучение населения, таких как ^{14}C и ^{3}H.

Всё вместе, это серьёзно влияет на доверие к информации о состоянии окружающей среды в районах расположения АЭС, а полученные данные не могут быть, по мнению многих экспертов, адекватно использования для надёжной оценки экологической безопасности Российских ядерных энергетических предприятий.

Мониторинг обычно подразделяют на мониторинг источника выброса радионуклидов и мониторинг окружающей среды (Руководство по безопасности ..., 2016; IAEA, 2005; IAEA, 2014). Эти два вида мониторинга одинаково важны и рассматриваются как взаимодополняющие. Существуют несколько источников информации о радиоактивных выбросах АЭС. Первый тип информации включает проектные данные о допустимых, предельно допустимых или плановых выбросах. Эти величины рассчитываются, исходя из дозовых квот на различные пути поступления радионуклидов в окружающую среду. Так, соблюдение установленных настоящими Правилами значений допустимых выбросов гарантирует, что доза облучения лиц из критической группы населения за счёт газоаэрозольных выбросов АЭС при нормальной эксплуатации не превысит 10 мкЗв в год, и это значение принято использовать для оценки воздействия АЭС на окружающую среду. СанПин 2.6.1.24-03 также вводит предельно допустимые выбросы на уровне 20 допустимых выбросов (или 200 мкЗв в год в терминах дозы), а для проектируемых и строящихся АЭС – на уровне 5 допустимых выбросов (50 мкЗв в год). Значения предельно допустимых сбросов для всех АЭС превышает допустимый сброс в 5 раз. Эти значения устанавливаются на основании квот на облучение населения, равных 250 мкЗв в год для действующих АЭС и 100 мкЗв в год – для проектируемых и строящихся АЭС. Отметим, что эти квоты устанавливаются на суммарное облучение населения от радиоактивных газоаэрозольных выбросов в атмосферу и жидких сбросов в поверхностные воды в целом для АЭС независимо от количества энергоблоков на промышленной площадке, причём квоты на выбросы и сбросы одинаковы. Это означает, что при общей квоте для проектируемой АЭС 100 мкЗв в год, квота для газоаэрозольных выбросов составляет 50 мкЗв в год, и, соответственно, такая же квота, 50 мкЗв в год, принимается для предельно допустимых жидких сбросов. Значение этих квот рассматривается как верхняя граница возможного облучения населения для режима нормальной эксплуатации АС. Эти значения используются для расчёта предельно допустимых выбросов (ПДВ) радионуклидов с АЭС в атмосферу и предельно допустимых сбросов (ПДС) радионуклидов в поверхностные воды. В режиме нормальной эксплуатации АЭС значения, установленные для ПДВ и ПДС, являются верхними границами для газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов радионуклидов в окружающую среду.

В качестве нижней границы дозы облучения от отдельного радиационного фактора при оптимизации радиационной защиты населения в режиме нормальной эксплуатации АЭС принимается минимально значимая доза, равная 10 мкЗв в год. Этот же дозовый предел используется для расчёта допустимых выбросов (ДВ) и сбросов (ДС), которые в документе СП АС 03 сделаны без учёта местных условий и основаны только на выбросе радионуклидов в окружающую среду.

Важным источником данных для оценки более реального воздействия облучения на человека и окружающую среду являются данные о фактических выбросах, публикуемые в отчётах по экологической безопасности Росэнергоатома и ежегодниках "Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств". Поэтому, при оценке результатов радиоэкологического мониторинга, проводимого Институтом, использовались обе категории данных. Плановые выбросы использовались для консервативных оценок, а данные реальных выбросов, совместно с результатами радиоэкологического

мониторинга, для реалистичных оценок.

При долгосрочной оценке воздействия выбросов АЭС необходимо учитывать возможные изменения состава и объёма выбросов и сбросов даже из той же установки. В качестве примера на рисунке 1 показаны выбросы ^{131}I, ^{137}Cs и инертных радиоактивных газов (ИРГ) Ленинградской АЭС.

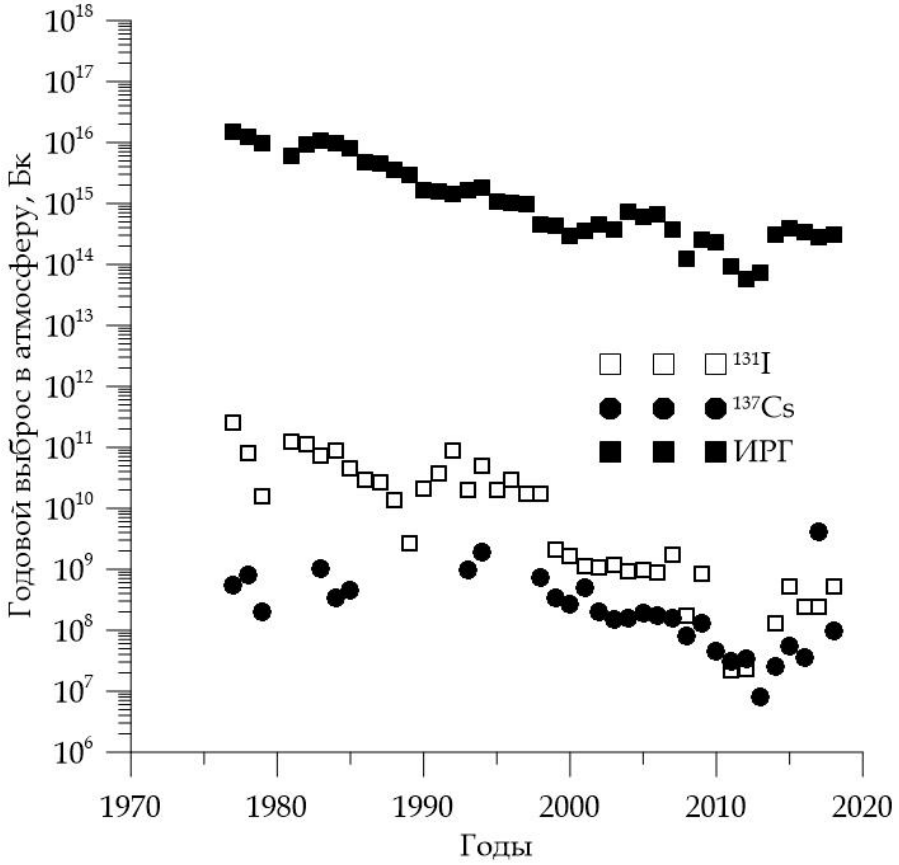


Рисунок 1. Газоаэрозольные выбросы Ленинградской АЭС (Радиоэкологическая обстановка ..., 2015)

Видно, что на фоне общего уменьшения выброса в результате повышения эффективности системы газоочистки, отмечаются значительные колебания между годами до 10 раз и более, что определяет необходимость корректного анализа данных по выбросам с учётом цели оценки воздействия предприятия на окружающую среду.

Существуют различные подходы к оценке вклада предприятий ядерного энергетического комплекса на окружающую среду и человека. Как правило, методы прямого сравнения уровней загрязнения долгоживущими радионуклидами в окружающей среде зоны наблюдения не позволяют измерить вклад АЭС в существующее загрязнение. Более информативен в этом случае анализ временных рядов, объединяющий данные концентрации радионуклидов в почве за достаточно большой промежуток времени (рис. 2). С этой целью использовались данные отдельных контрольных участков, представленных в необработанном виде в настоящей публикации (Исамов и др., 2020). Из рисунка видно, что изменение концентрации в почве ^{90}Sr, выброс которого в окружающую среду чрезвычайно мал, происходит с периодом полуснижения 28,76 лет, что полностью соответствует периоду полураспада этого радионуклида. И, напротив, для ^{137}Cs, доля которого в газоаэрозольных выбросах достаточно велика, период полуснижения концентрации этого радионуклида в почве (58,1 года) значительно превышает его период полураспада.

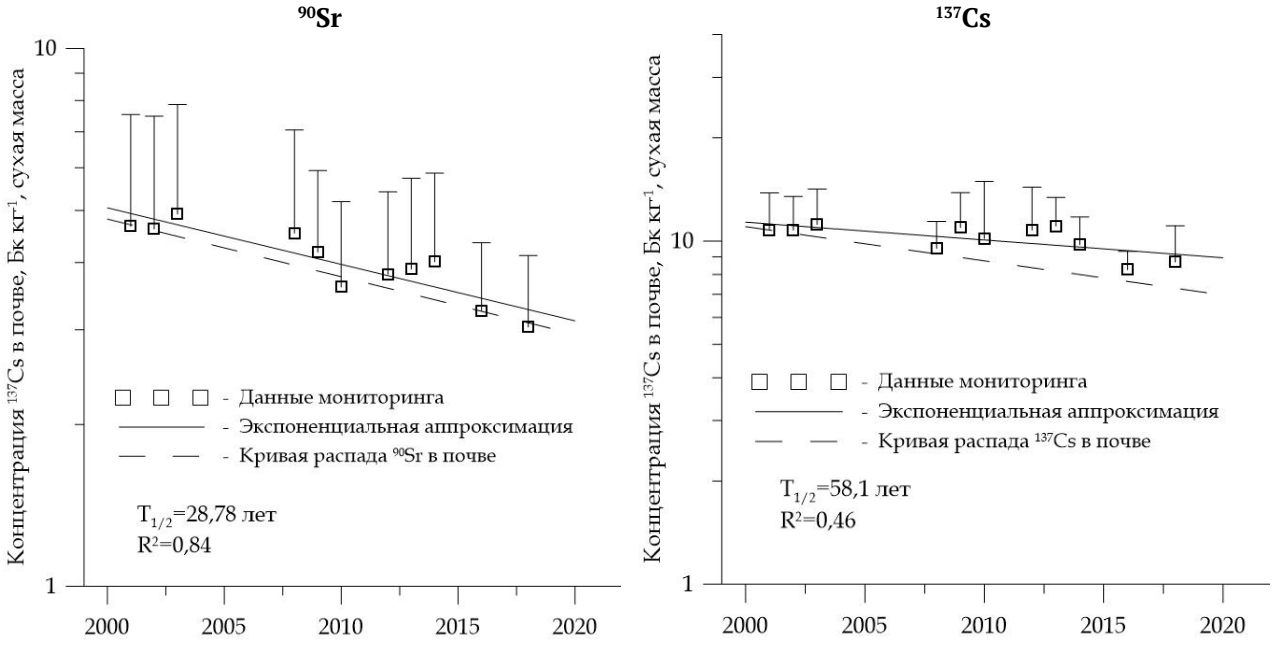


Рисунок 2. Динамика концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в почвах контрольных участков в зоне наблюдения Ростовской АЭС

Это означает, что в зоне наблюдения существует постоянный источник выброса в атмосферу, определяющий дополнительное загрязнение почв ^{137}Cs станционного происхождения. Увеличение в почвах ^{137}Cs станционного происхождения соответствует простому уравнению (рис. 3):

$$q(t) = 0{,}13 \times t \qquad (1)$$

Где t является временем с начала выпадений, $q(t)$ – концентрация ^{137}Cs. Видно, что за 50 лет работы, концентрация «станционного» ^{137}Cs будет находиться на уровне существующего техногенного фона, сформированного в зоне наблюдения Ростовской АЭС глобальными выпадениями.

Отметим, что представленные данные, являются одним из первых экспериментальных доказательств влияния выбросов ^{137}Cs на увеличение концентрации этого радионуклида в почве. Одновременно, это подчёркивает необходимость долгосрочных наблюдений и ведения долгосрочного мониторинга в районах АЭС государственными предприятиями, имеющими возможность для систематических долгосрочных наблюдений.

Учитывая достаточно высокий вклад в дозу облучения населения в районах расположения АЭС внутреннего облучения, необходимо отметить роль природно-климатических условий в загрязнение продукции и формировании доз облучения населения. Сводные данные о радиоэкологических характеристиках АЭС, рассмотренных в данной работе, приведены в таблице 3.

Видно, что существующие средние уровни содержания ^{137}Cs в молоке и картофеле варьируют до 5 раз, а концентрации этого радионуклида в зерне довольно близки. Минимальные уровни содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства отмечены в районе Курской и Ростовской АЭС.

Дозы от существующего техногенного загрязнения варьируют в более широком диапазоне от 0,47 до 150 мкЗв в год (до 40 раз), отражая не только различия в природно-климатических условиях, но и различия в других источниках загрязнения окружающей среды: Чернобыльских выпадениях, выбросов и сбросов других ядерных предприятий и отличия в используемых технологиях, для производства энергии.

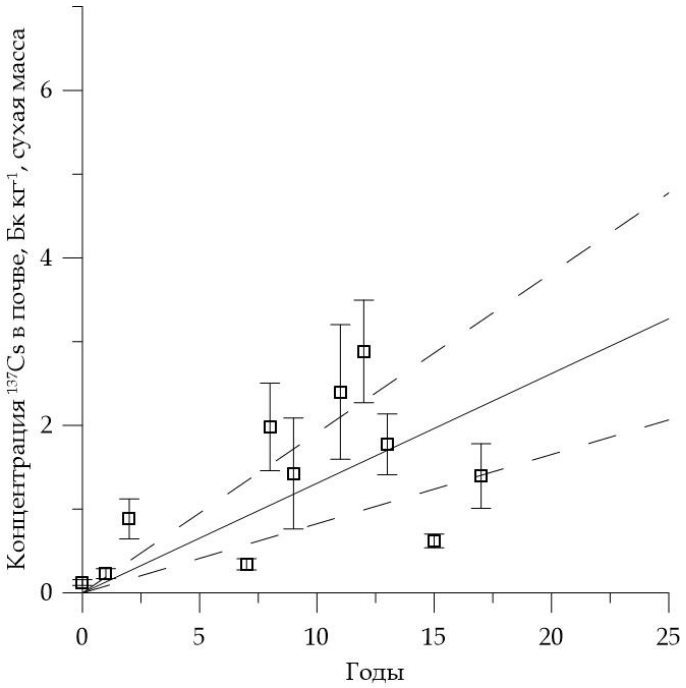


Рисунок 3. Вклад выбросов Курской АЭС в загрязнение почв ^{137}Cs.
Прерывистые линии показывают 95 % доверительные интервалы линейной регрессии

Таблица 3

Радиоэкологические характеристики районов размещения АЭС

Параметры	Белоярская	Курская	Ленинградская	Ростовская
Концентрации ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, Бк кг$^{-1}$				
Молоко	0,27	0,14 (0,02–0,30)	0,1 (0,03–0,21)	0,06 (0,01–0,16)
Картофель	0,14	0,08 (0,01–0,48)	0,5 (0,1–0,7)	0,34 (0,10–1,0)
Зерно	–	0,3 (0,1–0,7)	0,3(0,1–0,7)	0,24
Дозы существующего облучения от техногенных радионуклидов				
Суммарная доза, мЗв/год	$1,5\times10^{-1}$	$1,4\times10^{-2}$	$9,1\times10^{-2}$	$4,7\times10^{-3}$
Вклад продуктов, %	14	17	64	52
Дозы от выбросов АЭС				
Суммарная доза, мкЗв/год	16 ($1,2\times10^{2}$)*	1,5	4,1	$7,1\times10^{-2}$
Суммарная доза на 1 ГВт, мкЗв/год	15	0,5	1,5	$2,9\times10^{-2}$
Вклад продуктов, %	85	12	86	17
Суммарная доза, мкЗв/год**	$1,58\times10^{-1}$	6,25	5,2	$6,8\times10^{-2}$
Суммарная доза на 1 ГВт, мкЗв/год**	$1,5\times10^{-1}$	2,1	1,8	$2,8\times10^{-2}$
Дозы от природного радиационного фона (существующее облучение) (Дозы облучения …, 2019)				
Суммарная доза, мЗв	3,98	3,13	3,31	4,16
Доза от продуктов	0,113	0,128	0,155	0,118

* Доза с учётом выбросов других предприятий на площадке Белоярской АЭС.
** По данным работы М.Е. Васяновича (Vasyanovich et al., 2019).

Вклад продуктов питания в дозы существующего облучения варьирует от 14 до 64 %, отражая локальные отличия в значимости путей облучения в районах расположения различных АЭС. Так, различия между структурой путей существующего облучения взрослого населения зоны наблюдения Курской АЭС от населения зоны наблюдения Ростовской АЭС во многом объясняются Чернобыльскими выпадениями в Курской области. Загрязнение почвы ^{137}Cs на фоне низких значений коэффициентов перехода в сельскохозяйственную продукцию определяет доминирование внешнего облучения в суммарную дозу. Особенности такого рода во многом определяют требования к программе мониторинга, направленной на выявления факторов, определяющих значимость выбросов и сбросов с точки зрения загрязнения окружающей среды и облучения человека.

При сравнении природных и технологических факторов, определяющих вклад АЭС в облучение населения, необходимо учитывать мощность предприятий, а дозы облучения целесообразно приводить на единицу вырабатываемой электроэнергии. Из таблицы 2 видно, что дозы от выбросов АЭС, рассчитанные на 1 ГВт произведенной энергии, варьируют от $2{,}9\times10^{-2}$ до 15 мкЗв в год, что согласуется с оценками для основных зарубежных ядерных энергетических установок (UNSCEAR, 2016).

Сравнение оценок доз облучения человека, полученных при проведении радиационно-экологического мониторинга ВНИИРАЭ, с данными двухлетних исследований, приведённых в работе М.Е. Васяновича (Vasyanovich et al., 2019) показывают, что они довольно близки для Ленинградской и Ростовской АЭС, значительно ниже (до 2 порядков величины) данных для Белоярской АЭС (Панов и др., 2020) и существенно превышают оценки доз, сделанные в работе В.К. Кузнецова для Курской АЭС (Кузнецов и др., 2020). Отмеченные различия могут быть связаны как с недооценкой местных природно-климатических факторов, влияющих на формирование дозы, так и вариациями во времени в составе и объёме выбросов АЭС, поскольку в работе М.Е. Васяновича (Vasyanovich et al., 2019) рассматривались только выбросы АЭС в 2017–2018 г. В целом это сравнение показывает важность корректного определения данных по выбросам и сбросам предприятия с учётом конечной цели таких оценок, стандартизации методик пробоотбора, пробоподготовки и измерений, методов усреднения и анализа данных. Другой причиной может быть различный учёт доз облучения населения от трития и предположений, касающихся специфичных факторов, определяющих дозы облучения населения. Так, использование модели для lтрития, приведённой в документе серии отчётов по безопасности МАГАТЭ (SRS 19 (IAEA, 2001)), показывает, что вклад трития может составлять до 95 % дозы, а вклад других радионуклидов составляет около 0,59 мкЗв в год (Панов и др., 2020). С учётом того, что авторами (Панов и др., 2020) предполагалось 100 % потребление местных продуктов, это значение можно считать приемлемо близким к оценке доз от выбросов Белоярской АЭС, приведённой в работе (Vasyanovich et al., 2019).

В целом сравнение различных оценок показывает, что различия в дозах облучения, выполняемых различными авторами, может достигать двух порядков величины и более. Это во многом связано с различными вариантами учёта выбросов и сбросов, локальных поведенческих и пищевых условий, а также природно-климатических факторов. Важное значение имеет конкретная реализация программы мониторинга, который, собственно, и обеспечивает эти данные. При общей правильности каждого из подходов к оценке доз, учёт этих параметров зависит от общей цели задачи, а оценки доз могут сильно отличаться в зависимости от цели их использования, например, при консервативном и реалистичном подходе. Вследствие этого использование ступенчатого (tiered approach) с чётким определением, какие модели и параметры могут быть использованы для достижения каждой конкретной цели, является наиболее рациональным путём оценки безопасности ядерных объектов. Принципиально важным является введение в практику радиационного регулирования концепции «референтного человека», что отразится на допущениях при использовании

дозиметрических моделей.

Вклад предприятий в эффективные дозы облучения населения сравнительно невелик и только в отдельных случаях (Белоярская АЭС) может превышать 10 мкЗв в год. В то же время дозы от выбросов Курской и Ленинградской АЭС достаточно близки к дозовой квоте 10 мкЗв в год. В таких ситуациях международные подходы к безопасности АЭС предполагают использование реалистичных дозовых моделей, основанных на данных мониторинга и учёте местных условий.

Природный радиационный фон варьирует в довольно узких пределах от 3,13 до 4,16 мЗв в год, при этом вклад продуктов питания в дозу от природного фона сравнительно невелик – от 3 до 5 %. Техногенный радиационный фон в районе Белоярской АЭС составляет 0,15 мЗв в год и определяется загрязнением окружающей среды в результате предыдущей деятельности. В районе Ленинградской АЭС и Курской АЭС он равен $9{,}1\times10^{-2}$ и $1{,}4\times10^{-2}$ мЗв в год – Чернобыльские выпадения. Минимальный техногенный фон отмечается в районе Ростовской АЭС – $4{,}7\times10^{-3}$ мЗв в год.

Оценённый на основе радиоэкологического мониторинга, вклад АЭС в существующий техногенный радиационный фон варьирует от 1 % (Ростовская АЭС) до 10–11 % (Курская и Белоярская АЭС). Вклад выбросов АЭС в природный радиационный фон существенно ниже и составляет 4 %, 3 %, 0,5 % и 0,1 % для Белоярской, Ленинградской, Курской и Ростовской АЭС соответственно.

Полученные результаты показывает, что функционирование АЭС в нормальном режиме не привело и не приводит к значимому изменению как техногенного, так и природного радиационного фона. В то же время, при оценке безопасности ядерного энергетического комплекса на основе данных радиоэкологического мониторинга и дозового квотирования существуют серьезные проблемы, которые требуют неотложного решения. Некоторые из них обозначены в настоящей публикации.

Литература

Дозы облучения населения Российской Федерации в 2018 году: информационный сборник. Санкт-Петербург: НИИРГ, 2019. 72 с.

Исамов Н.Н. и др. Радиационно-экологический мониторинг в зоне размещения Ростовской АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 134–157.

Карпенко Е.И. и др. Модели и программные средства для поддержки радиационно-экологического мониторинга // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 22–42.

Кузнецов В.К. и др. Радиоэкологический мониторинг в зоне расположения Курской АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 87–106.

МТ 1.2.1.15.1176-2016. Разработка и установление нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ атомных станций в атмосферный воздух: методика. Обнинск: НПО «Тайфун», 2016. 76 с.

Панов А.В. и др. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районе расположения Белоярской атомной электростанции // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 67–86.

Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: «САМ полиграфист», 2015. 296 с.

Руководство по безопасности № RS-G-1.8. Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной безопасности: нормы безопасности МАГАТЭ для защиты людей и охраны окружающей среды. Вена: МАГАТЭ, 2016. 168 с.

Санжарова Н.И. и др. Концепция и программа радиационно-экологического мониторинга в районах размещения АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 9–21.

СанПин 2.6.1.24-03. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03) (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.04.2003 г.; введ в действие с 20.06.2003 г. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.04.2003 г. № 69). М.: Минздрав РФ, 2003. 36 с.

Цыгвинцев П.Н. и др. Радиоэкологический мониторинг в районе размещения Ленинградской АЭС // Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Выпуск 3 / Под ред. С.В. Фесенко. Обнинск: ВНИИРАЭ, 2020. С. 107–133.

IAEA (2005). IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.8. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection. Vienna: IAEA, 2005. 119 p.

IAEA (2010). Safety Reports Series No. 64. Programmes and systems for source and environmental radiation monitoring. Vienna: IAEA, 2010. 232 p.

IAEA (2014). IAEA Safety Standards. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna: IAEA, 2014, No. GSR. Part 3. P. 436.

UNSCEAR (2016). Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly, with Scientific Annexes). Annex B: Radiation exposures from electricity generation. New York: United Nations, 2017. P. 135–240.

Vasyanovich M.E. et al. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. Vol. 208–209. P. 106006.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

ИСАМОВ Низаметдин Низаметдинович (1960) *– известный специалист в области ветеринарной радиобиологии, сельскохозяйственной радиоэкологии и радиационной безопасности при ведении сельскохозяйственного производства на радиоактивно-загрязнённых территориях.*

В 1982 году закончил Московскую Ветеринарную Академию имени К.И. Скрябина по специальности «ветеринария» и был направлен на работу во Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (с 2014 – ВНИИ радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ)). Работая в институте, прошёл все ступени служебного роста от старшего лаборанта до заведующего лабораторией (2008) и ведущего научного сотрудника (2015), отвечающего за решение проблем ведения животноводства в условиях техногенного загрязнения.

С 1986 г. и по настоящее время при непосредственном участии Н.Н. Исамова проводятся научно-исследовательские и практические работы по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в животноводстве пострадавших территорий. Им получены приоритетные данные о динамике изменения содержания радионуклидов в организме сельскохозяйственных животных после этой аварии. При его активном участии разработаны защитные и реабилитационные мероприятия по снижению накопления радионуклидов и тяжёлых металлов в урожае кормовых культур, исследовано их поведение в системе почва-растения и закономерности их поступления и накопления в организме сельскохозяйственных животных. Разработана и внедрена система агроэкологического мониторинга в зонах воздействия промышленных и радиационно-опасных объектов.

Н.Н. Исамовым разработаны методологические подходы к оптимизации защитных и реабилитационных мероприятий в кормопроизводстве и животноводстве для получения продуктов животноводства, соответствующих санитарно-гигиеническим нормативам и разработаны методы оценки эффективности реабилитационных мероприятий в животноводстве.

Н.Н. Исамов принимает активное участие в выполнении ряда международных проектов. При его непосредственном участии подготовлены разделы, касающиеся закономерностей поступления радионуклидов в организм животных в Техническом документе МАГАТЭ 1616 и Техническом докладе №472 "Параметры переноса радионуклидов в окружающей среде", которые являются настольными книгами радиоэкологов во всем мире.

Исамов Н.Н. автор 90 научных работ, из них 1 монография, 2 авторских свидетельства, 2 Технических Условия на комплексную кормовую добавку для животных.

КОЗЬМИН Геннадий Васильевич (1950) *– известный учёный в области радиоэкологии, внёсший значительный вклад в развитие физических методов в сельском хозяйстве, дозиметрию животных и оценку эффектов действия неонизирующего излучения на биологические объекты. Кандидат биологических наук (1984), доцент (1985). Почётный работник высшего профессионального образования (2008), действительный член Российской академии естественных наук (2009).*

В 1973 г. закончил Московский инженерно-физический институт по специальности «дозиметрия и защита» и был направлен на работу во Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (с 2014 – ВНИИ радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ)). Работая в институте, прошёл все ступени служебного роста от инженера до заместителя директора по научной работе (1989). С 2010 г. работает в должности ведущего научного сотрудника во ВНИИРАЭ.

С 1973 по 1984 гг. участвовал в крупных радиобиологических экспериментах с сельскохозяйственными растениями и животными. Является автором модели локальных выпадений наземного ядерного взрыва (1976), которая нашла широкое применение в экспериментах по оценке потерь в животноводстве в условиях ядерной войны. С 1984 по 1996 гг. выполнял работы, связанные с изучением воздействия на сельскохозяйственные растения и животных электромагнитных излучений. Под его руководством были изучены биологические эффекты при хроническом СВЧ-облучении вегетирующих растений, выполнены экспериментальные исследования по оценке последствий истощения озона атмосферы и повышения фона УФ-излучения, начата разработка радиационных агропромышленных технологий с применением неионизирующих излучений.

С 1986 г., после аварии на ЧАЭС, участвовал в работе по модернизации аппаратурно-методического оснащения служб Госагропрома СССР, входил в состав секции "Ядерное приборостроение" НТС Минсредмаша. Являлся членом НТС МСХ РФ, заместителем председателя и председателем Экспертного

Совета по радиологии МСХ РФ, членом экспертного совета Госкомчернобыля РФ, был руководителем работ, связанных с исследованиями в зонах влияния Чернобыльской аварии и Семипалатинского ядерного полигона. В 1997 г. Козьмин Г.В. был направлен на педагогическую работу в качестве заведующего кафедрой экологии Института атомной энергетики (ИАТЭ, г. Обнинск). Являлся членом Учебно-методического Совета по экологии и устойчивому развитию при УМО МГУ им. М.В. Ломоносова.

Работа Козьмина Г.В. отмечена рядом правительственных и ведомственных наград, он – лауреат премий им. К.Э. Циолковского (2007) и В.М. Клечковского (2015). Автор более 300 научных работ, в том числе 6 монографий и 4 учебных пособий.

САНЖАРОВА Наталья Ивановна (1950) *– известный учёный в области сельскохозяйственной радиологии, радиоэкологии и агроэкологии. Доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН. Лауреат государственной премии РФ.*

С 1978 г. и по настоящее время работает во Всероссийском научно-исследовательском институте радиологии и агроэкологии, где прошла путь от младшего научного сотрудника до директора института.

Санжаровой Н.И. проведено несколько циклов приоритетных научных исследований: изучение миграции радионуклидов в орошаемых агроценозах и разработка научных основ радиоэкологии орошаемого земледелия; исследование поведения тяжелых металлов в системе почва-растение, развитие принципов экологического нормирования. После аварии на Чернобыльской АЭС впервые в условиях реальных выпадений определены параметры аэрального загрязнения и очищения посевов; изучены фундаментальные закономерности поведения радионуклидов в различных ландшафтных условиях, определены параметры миграции по сельскохозяйственным цепочкам, разработана радиоэкологическая классификация лугов. Созданы научные основы ведения АПК в различные периоды после аварии на ЧАЭС. С 2006 года по настоящее время Санжарова Н.И. является руководителем работ по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС в. В течение многих лет к области научных интересов Санжаровой Н.И. относятся вопросы экологической безопасности ядерной энергетики. Под ее руководством разработаны методология и методы организации радиационно-экологического мониторинга. Разработки использованы при реализации систем мониторинга на ряде российских АЭС.

По инициативе Санжаровой Н.И. возобновлены фундаментальные и прикладные исследования по применению ионизирующих излучений в технологиях производства, хранения и переработки сельскохозяйственной и пищевой продукции; разработан комплексный план научных исследований «Радиационные агробиотехнологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности

Санжарова Н.И. принимала участие в выполнении международных проектов Европейской комиссии, МАГАТЭ и ФАО, в течении многих лет была членом консультативной группы по радиационных технологиям при генеральном директоре МАГАТЭ, является членом Международного союза радиоэкологии и Ядерного общества России, редколлегий ряда научных журналов, научно-технических Советов при РАН, Минприроды, ГК Росатом. Председатель диссертационного совета Д 006.068.01.

Санжарова Н.И. проявила себя эффективным руководителем, способным оперативно решать широкий круг как научных, так и административно-хозяйственных вопросов.

Работа Н.И. Санжаровой отмечена многими государственными и ведомственными наградами, она является Лауреатом Золотой медали им. В.М. Клечковского (2014).

Автор более 500 публикаций, в т.ч. 23 монографий, 9 авторских свидетельств и 2 патентов. Под руководством Санжаровой Н.И. защищено 8 кандидатских и две докторских работы.

Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ

Выпуск 3

Научное издание

Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций

Под редакцией профессора С.В. Фесенко

ISBN 978-5-903386-62-8

Компьютерная верстка Шубина О.А.

Подписано в печать 18.08.2020 г.
Формат 60x90 1/8. Гарнитура PT Serif, Calibri
Усл. печ. л. 21,25. Тираж 350 экз. Заказ 50.

Издательство ФГБНУ ВНИИРАЭ
249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км

Отпечатано в ООО "Компания "Оптима-арт"
249038, г. Обнинск, ул. Гурьянова, д.21, оф.116
+7 484 395-56-46, info.optibook@gmail.com
www.optibook.ru