

На правах рукописи



Ерзова Валентина Александровна

**ВОЗДЕЙСТВИЕ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА
РАДИАЦИОННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ
СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО АТОМНО-ПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА
(ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

Специальность 1.6.6 – Гидрогеология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный
руководитель: **Судариков Сергей Михайлович,**
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный
университет», профессор кафедры гидрогеологии и
инженерной геологии

Официальные
оппоненты: **Куваев Андрей Алексеевич,**
доктор геолого-минералогических наук, доцент, ФГБУ
«Гидроспецгеология», Центр объектного мониторинга
состояния недр (ОМСН), главный специалист по
моделированию – начальник отдела ГИС технологий и
математического моделирования

Токарев Игорь Владимирович,
кандидат геолого-минералогических наук, ресурсный
центр РДМИ, научный парк федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего профессионального образования
"Санкт-Петербургский государственный университет"
– ведущий специалист

Ведущая
организация: **ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет» (ТПУ),
г. Томск**

Защита состоится «28» февраля 2023 года в 14:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.364.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)», по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, в аудитории 4-73 (зал диссертационных советов).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)», по адресу: 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.23, <http://mgri.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.364.01
канд. геол.-минерал.наук, доцент



Горобцов Денис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Среди основных источников поступления радионуклидов в окружающую среду выделяют: глобальные выпадения радиоактивных веществ из атмосферы после испытания ядерного оружия, выбросы и сбросы при нормальной эксплуатации объектов атомной энергетики и аварийных ситуациях. История обращения с радиоактивными материалами, испытания ядерного оружия, а также последствия аварий на Чернобыльской АЭС, АЭС Фукусима-1, ФГУП «ПО «Маяк» и др. указывают, что процессы радиационного загрязнения могут быть катастрофическими.

В процессе строительства и эксплуатации атомных электростанций (АЭС) техногенному воздействию подвергаются все компоненты окружающей среды, включая подземные и поверхностные воды, почвы, донные отложения и др. Детальная оценка радиационного воздействия объектов атомной энергетики (ОАЭ) на основные компоненты окружающей среды является необходимым условием обеспечения экологической безопасности при их эксплуатации.

Строительство новых энергоблоков (в том числе, замещающих) АЭС производится вблизи площадок действующих станций или других ОАЭ, в пределах которых находятся существующие или потенциальные источники радиоактивного загрязнения. Так как влияние новых станций и замещающих энергоблоков распространяется на области с существенно измененными (нарушенными) природными условиями, то актуальным, в рамках экологической оценки воздействия на окружающую среду, становится прогнозирование радиоактивного загрязнения дренажных вод, извлекаемых в период строительства и эксплуатации АЭС.

В 2016 г. на территории Северо-Западного атомно-промышленного комплекса (СЗ АПК) г. Сосновый Бор Ленинградской области начались подготовительные работы с целью строительства новых энергоблоков Ленинградской атомной электростанции (вторая очередь ЛАЭС-2). Территория проектирования примыкает к площадке хранения радиоактивных отходов – ФГУП «ФЭО», где в подземных водах регистрируется техногенное радиоактивное загрязнение. Проблемой существующего радионуклидного загрязнения подземных вод и других природных объектов г. Сосновый Бор и его окрестностей занимались М.В. Кочетков, В.А. Мироненко, В.Г. Румынин, А.М. Никуленков, Л.Д. Блинова, И.И. Крышев, А.И. Крышев, Е.Б. Панкина и др. Оценка влияния существующего радиоактивного ореола загрязнения подземных вод на площадку ЛАЭС-2 и смежные территории при изменившихся под действием строительства условиях является актуальной задачей.

Цель работы. Изучение влияния природных и техногенных факторов на радиационное состояние подземных вод и условия миграции радиоактивного ореола загрязнения в них в результате возрастающей техногенной нагрузки в районе расположения СЗ АПК в г. Сосновый Бор Ленинградской области.

Задачи исследования:

1) обобщение и анализ данных многолетнего мониторинга по содержанию природных и техногенных радионуклидов в подземных и поверхностных водах,

почвах и донных (речных и морских) отложениях района строительства второй очереди ЛАЭС-2 (30-км зона);

2) оценка сорбционных свойств образцов почв и донных отложений при взаимодействии с радиоактивными растворами (Sr-90 и Cs-137);

3) определение роли геологических и гидрогеологических условий, влияющих на миграцию радиоактивного загрязнения в подземных водах площадки хранения РАО;

4) картирование существующего радиоактивного ореола и установление наличия новых источников загрязнения подземных вод в пределах площадки хранения РАО;

5) прогнозирование подтягивания радиоактивного ореола загрязнения подземных вод к дренажу ЛАЭС-2 в период строительства новых энергоблоков.

Методология и методы исследования. В основу работы положены фондовые материалы, результаты лабораторных исследований и проведенных полевых работ, выполненных в период (2017 г, 2019-2022 гг.) прохождения производственных стажировок в СПбО ИГЭ РАН. Для определения содержания радионуклидов отбирались пробы почв, донных осадков Копорской губы и русловых отложений в пределах территории исследований, а также подземных вод на площадке хранения РАО. Сорбционные параметры определялись на отобранных образцах почв, донных осадков Копорской губы и русловых отложений. Активность радионуклидов в лабораторных условиях определялась счетными радиометрическими методами. Анализ и обработка многолетних данных радиационного мониторинга подземных вод проводились, используя метод статистических (временных) моментов. Для прогнозных расчетов радиоактивного загрязнения дренажных вод ЛАЭС-2 использовался программный комплекс PmWIN, включающий фильтрационный (Modflow) и транспортный (Modpath) расчетные модули. В качестве основы для создания поверхностей кровли и подошвы каждого из модельных слоев строилась геологическая модель. Обработка результатов проводилась с использованием программных комплексов Surfer, CorelDraw и Grapher.

Научная новизна:

1. Установлены различия в степени радиоактивного загрязнения почв, донных осадков Копорской губы и русловых отложений в зоне влияния ЛАЭС и «Чернобыльского следа», которые обусловлены изменением условий миграции и накопления радионуклидов в различных геохимических обстановках (пресноводной и морской).

2. Впервые сопоставлены значения миграционных параметров, ранее установленных в лабораторных условиях на образцах горных пород, с полученными в ходе интерпретации данных многолетнего мониторинга подземных вод площадки хранения РАО методом статистических моментов, которое показало, что в пластовых условиях миграция β -излучающих радионуклидов происходит быстрее.

3. Установлено, что в перераспределении радиоактивного ореола загрязнения в водоносных горизонтах существенная роль принадлежит вертикальному водообмену, контролируемому литологическими «окнами» в

разделяющих слабопроницаемых слоях, (в том числе приуроченными к палеодолинам) и разрывами напоров выше- и нижезалегающих горизонтов, что увеличивает длину пути движения растворенных радионуклидов и степень их разбавления инфильтрационными водами, снижая тем самым опасность загрязнения дренажных вод на стадии эксплуатации ЛАЭС-2.

Защищаемые положения:

1. Поверхностные и подземные воды, почвы, донные отложения морской акватории и водотоков большей части района СЗ АПК характеризуются содержанием продуктов деления урана на уровне глобального фона, сформировавшегося под влиянием Чернобыльской аварии, за исключением локальных участков загрязнения донных отложений в прибрежной зоне Копорской губы и подземных вод на участке размещения поверхностных хранилищ РАО изотопами Sr-90, Cs-137 и тритием.

2. Ореолы радионуклидного загрязнения подземных вод на территории ФГУП «ФЭО» обусловлены утечками 40-летней давности из хранилищ РАО и имеют «исторический» характер, так что на современном этапе наблюдается природная реабилитация участка загрязнения.

3. Установлено по результатам геофильтрационного моделирования, что в период строительства и эксплуатации энергоблоков ЛАЭС-2 разгрузка «исторического» ореола загрязнения подземных вод в дренажный контур АЭС не приведёт к значимому увеличению радиоактивности дренажных вод.

Практическая значимость работы:

1) полученные значения удельных активностей и коэффициентов сорбционного распределения техногенных радионуклидов (Cs-137 и Sr-90) в донных отложениях рек и Копорской губы могут быть учтены при оценке дозовых нагрузок на население и при разработке мероприятий по реабилитации территории в случае аварийных выбросов промышленных объектов СЗ АПК.

2) результаты прогнозной оценки распространения радиоактивного ореола загрязнения подземных вод в условиях возрастающей техногенной нагрузки необходимо учитывать при расширении действующей сети мониторинга в пределах СЗ АПК.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается анализом публикаций и фондовых материалов по исследуемой проблеме, использованием обширного полевого материала и аналитических данных, полученных по сертифицированным методикам в аккредитованных лабораториях, а также результатами математического моделирования с использованием верифицированных программных продуктов.

Личный вклад. Начиная с 2017 г., в рамках прохождения производственных стажировок в СПбО ИГЭ РАН, автором собран и проанализирован большой объем материалов по результатам ранее выполненных гидрогеологических, гидрогеохимических и радиологических исследований производственными и научными организациями. Соискатель принимал непосредственное участие в проведении полевых работ: обследовании действующей сети мониторинга и документировании новых контрольно-наблюдательных скважин при бурении, отборе проб и замерах уровней

подземных вод на площадке хранения РАО (ФГУП «ФЭО»); обследовании действующих контрольно-наблюдательных скважин и замерах уровней подземных вод в них на площадке проектируемой ЛАЭС-2 и прилегающей территории в пределах СЗ АПК; отборе проб почв и донных отложений Копорской губы и рек. Автором создана геологическая модель, а также соискатель принимала непосредственное участие в разработке гидродинамической модели и выполнила прогнозные оценки миграции ореола радиоактивного загрязнения в пределах территории промышленных объектов атомной энергетики. Материалы, положенные в основу диссертации, обработаны и проинтерпретированы автором лично.

Публикации и апробация работы. Основные результаты диссертационной работы освещены в 7 научных работах, из них 1 в рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК, 3 в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. Соискатель также имеет свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных. Результаты исследования диссертации докладывались на следующих конференциях: XV Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (г. Москва, 2019); XXIV Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2020); IX Международной научной конференции молодых ученых «Молодые – Научкам о Земле» (г. Москва, 2020); XXV Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых имени академика М.А. Усова (г. Томск, 2021); Двадцать третьи Сергеевские чтения «Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения» (г. Санкт-Петербург, 2022).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 153 наименования. Доказательства основных защищаемых положений приводятся во второй, третьей и четвертой главах настоящей работы. Диссертация изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 33 таблицы.

Благодарности. Автор выражает благодарность за помощь, ценные советы и замечания в процессе подготовки диссертации научному руководителю д.г.-м.н., проф. С.М. Сударикову.

Соискатель благодарит заведующего кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Санкт-Петербургского горного университета к.г.-м.н. доц. Д.Л. Устюгова, д.г.-м.н. проф. Р.Э. Дашко, к.г.-м.н. Е.Н. Леонтьеву и других сотрудников кафедры за обсуждение, советы и замечания в процессе работы над диссертацией.

Особую благодарность автор выражает директору СПбО ИГЭ РАН, чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., проф. В.Г. Румынину за помощь в получении фондовых, полевых и лабораторных материалов, консультации и критические замечания, способствовавшие улучшению содержания работы. Отдельная благодарность к.г.-м.н. А.М. Никуленкову, к.г.-м.н. А.А. Шварцу, к.г.-м.н. Е.М. Каплан, к.г.-

м.н. К.Б. Розову за предоставленные консультации в процессе выполнения работы, научным сотрудникам СПБО ИГЭ РАН С.А. Иноземцеву, И.Э. Вяххи, К.В. Владимирову, М.В. Вилькиной, за помощь в выполнении полевых работ и обработке собранных данных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. О проблеме радиоактивного загрязнения подземных вод и окружающей среды

В первой главе приводятся общие сведения о потенциальных источниках загрязнения окружающей среды в том числе подземных вод. Основное внимание уделено радиоактивному загрязнению, которое может быть вызвано повышенным содержанием как естественных, так и техногенных радионуклидов в различных компонентах природной системы.

Так, в промышленной зоне г. Сосновый Бор расположены объекты атомной энергетики, входящие в состав Северо-Западного атомно-промышленного комплекса (СЗ АПК), который включает Ленинградскую АЭС (ЛАЭС-1) с 4-мя реакторами типа РБМК-1000, комплекс по переработке отходов (КПО), Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ) им. А.П. Александрова, предприятие с приповерхностными хранилищами твердых низко- и среднеактивных РАО (ФГУП «ФЭО»), а также действующую и проектируемую Ленинградскую АЭС-2 (ЛАЭС-2) с реакторами ВВЭР. Все они являются источниками техногенного загрязнения и вносят вклад в изменение радиационного состояния окружающей среды. Особое внимание в настоящей работе уделяется предприятию по обеспечению безопасного обращения с радиоактивными веществами и отходами – ФГУП «ФЭО», где несовершенство инженерных конструкций зданий-хранилищ привело к попаданию радиоактивных растворов в подземные воды первых от поверхности горизонтов и формированию техногенного ореола загрязнения.

Глава 2. Общая характеристика района исследований

В данной главе приведена краткая характеристика физико-географических, геологических и гидрогеологических условий, а также почв и донных отложений в пределах территории, которая представляет собой ближнюю зону проектируемой ЛАЭС-2, имеющую радиус 30-км вокруг АЭС (в дальнейшем, 30-км зона ЛАЭС-2).

В процессе проектирования, строительства и эксплуатации объектов СЗ АПК (с 1962 г. по настоящее время) был накоплен обширный материал по инженерно-геологическим, гидрогеологическим и экологическим условиям района. На площадках предприятий функционируют сети производственного мониторинга состояния окружающей среды, включающие наблюдения за уровнями, химическим и радиационным составом подземных вод. Кроме того, рядом организаций, а именно СПБО ИГЭ РАН, ООО «Нефтегазгеодезия», ОАО «Энергоизыскания», ОАО «ВНИПИЭТ», ФГУП «Гидроспецгеология» и др., проводились гидрогеологические (включая мониторинг по сети наблюдательных скважин), экологические, геофизические исследования для комплексной оценки состояния подземных и поверхностных вод, донных

отложений и почвенного покрова на площадках СЗ АПК и прилегающей территории.

Ландшафтная структура 30-км зоны ЛАЭС-2 сочетает естественные: лесные, пойменные и болотные ландшафты, а также антропогенные – агроландшафты, селитебные и техногенные ландшафты. Основной фон почвенного покрова образуют дерново-подзолистые, болотно-подзолистые и болотные почвы.

Наиболее значимыми водными объектами 30-км зоны ЛАЭС-2 являются реки Систа, Воронка, Коваши; озера Копанское, Глубокое и Лубенское, Шепелевское, а также Копорская губа Финского залива. Река Систа является основным источником питьевого водоснабжения Сосновоборского городского округа, а река Коваши – резервным. Копорскую губу с 1973 г. используют в качестве водоёма-охладителя ЛАЭС-1.

Донные отложения поверхности дна акватории Копорской губы Финского залива имеют пестрый состав: в прибрежной части преобладают грубообломочные отложения, которые по мере продвижения в более глубоководные части сменяются разнотернистыми песками с содержанием гравия и гальки, переходя далее в пелитовые осадки.

Геологический разрез территории исследований представлен породами архейско-протерозойского возраста (кристаллический фундамент), которые перекрыты осадочными образованиями верхневендского, кембрийского, ордовикского и четвертичного возраста. Особенностью геологического строения территории СЗ АПК является наличие трех погребенных русел – палеодолин, с максимальной глубиной вреза, достигающей 45 м (рис.1).

В пределах СЗ АПК водоносные горизонты и комплексы приурочены к четвертичным, вендско-кембрийским и вендским отложениям. Наименее защищенными от техногенного загрязнения являются подземные воды первых от поверхности *четвертичного (Q) и воронковско-ломоносовского (ломоносовского) (Vvr-Є_{1lm}) водоносных горизонтов*. Породы вендского водоносного комплекса (V), залегающего на кристаллическом фундаменте, перекрыты мощной толщей вендских глин. *Ломоносовский водоносный горизонт* сложен слабосцементированными песчаниками и песками с прослоями тонкослоистых глин и представлен тремя водоносными зонами, разделёнными прослоями водоупорных глин (рис. 1). *Четвертичный водоносный горизонт* сложен песчаными, супесчаными и гравийно-галечными отложениями с невыдержанными прослоями глин и суглинков. Питание грунтовых вод осуществляется по всей площади распространения горизонта за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Региональный потока подземных вод четвертичном и ломоносовском горизонтах направлен в сторону зоны разгрузки в Копорскую губу Финского залива.

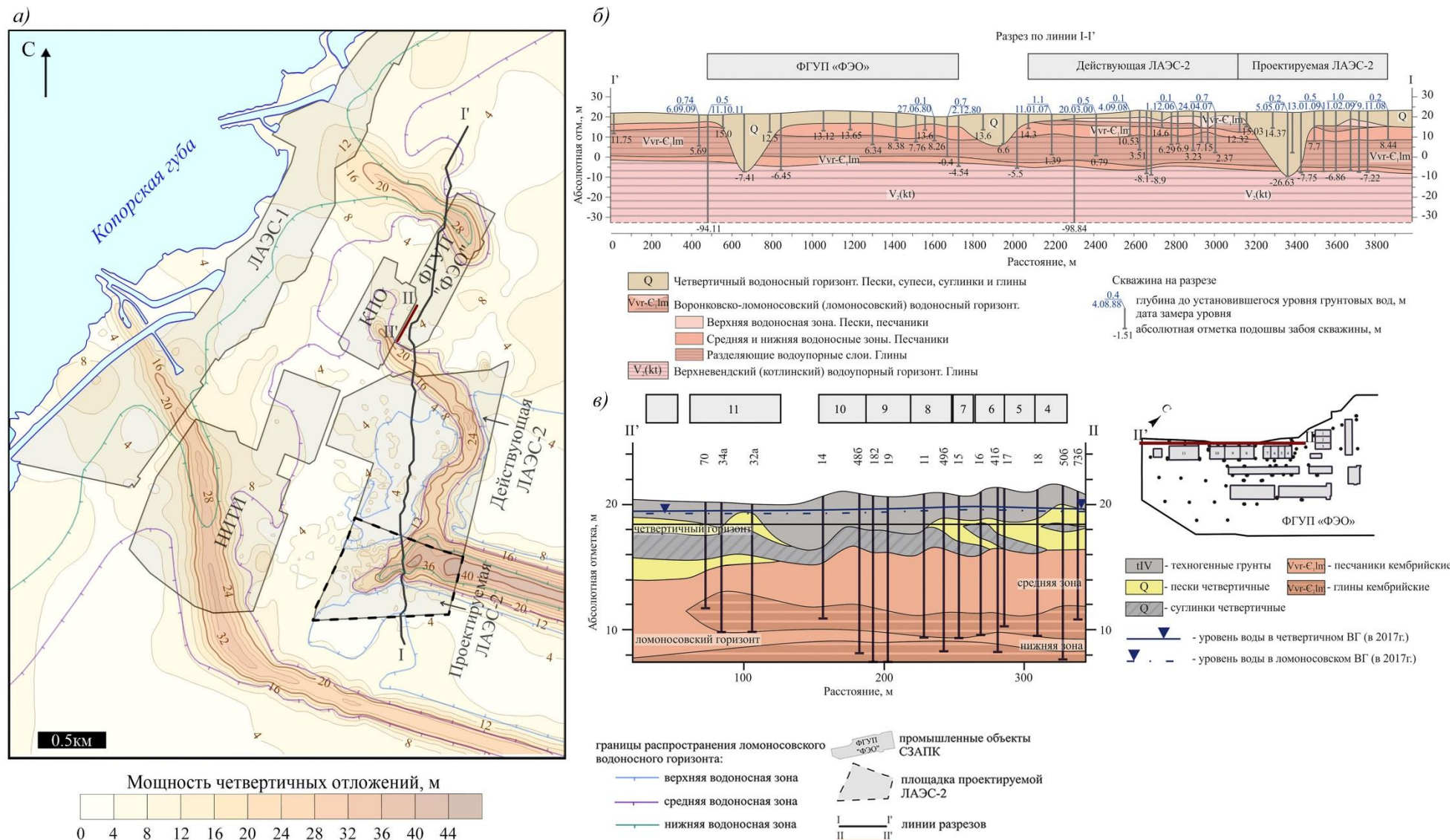


Рис. 1. Карта мощности четвертичных отложений (а) и гидрогеологические разрезы к ней (б,в) (построены по архивным материалам и данным бурения СПбО ИГЭ РАН)

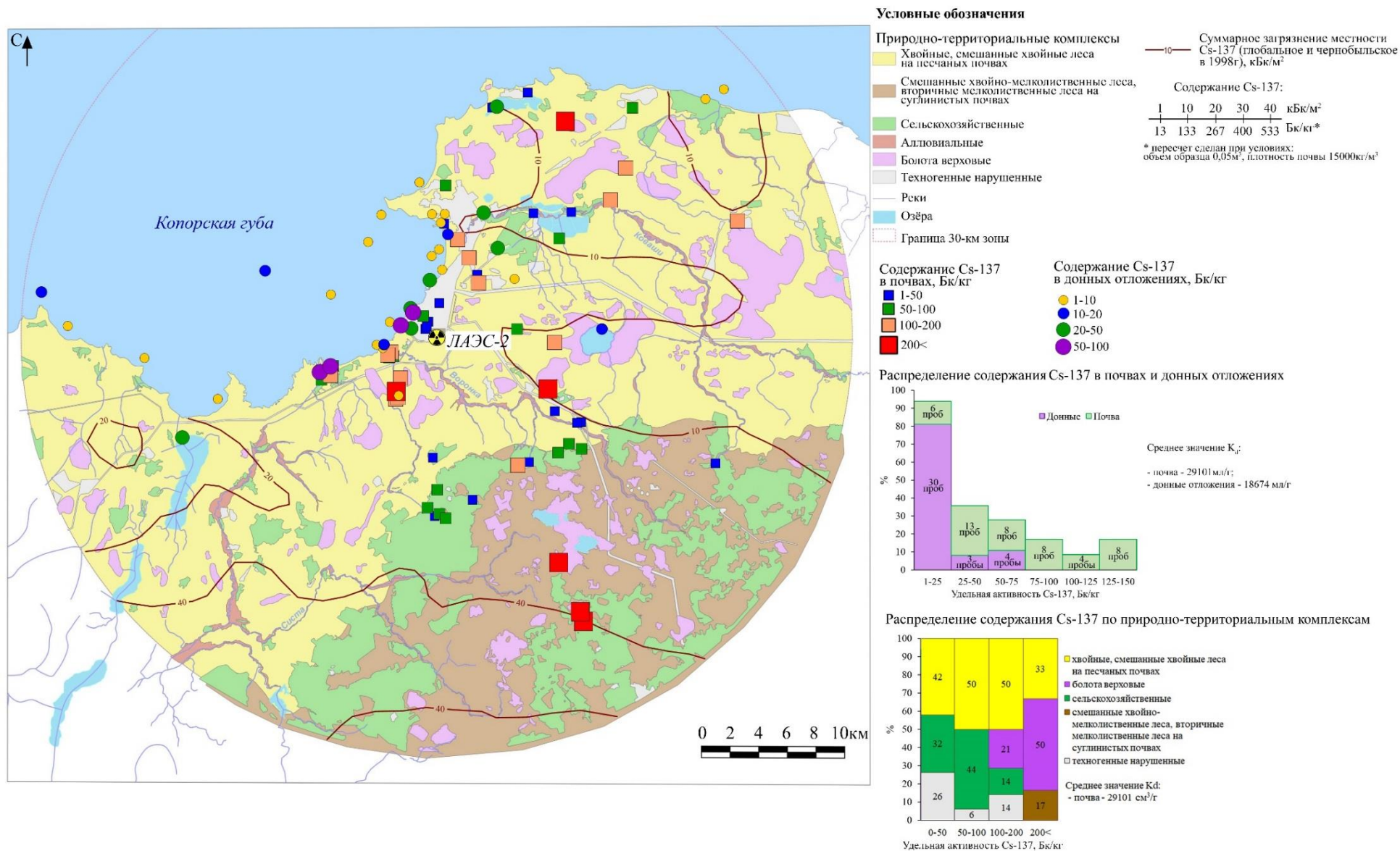


Рис. 4. Карта-схема площадного распределения Cs-137 в почвах и донных отложениях (2012-2021 гг), совмещенная с картой-схемой природно-территориальных комплексов 30-км зоны Ленинградской АЭС-2)

Глава 3. Изучение радионуклидного состава поверхностных и подземных вод, почв и донных отложений района исследований

В третьей главе приводится доказательство *первого защищаемого положения «Поверхностные и подземные воды, почвы, донные отложения морской акватории и водотоков большей части района СЗ АПК характеризуются содержанием продуктов деления урана на уровне глобального фона, сформировавшегося под влиянием Чернобыльской аварии, за исключением локальных участков загрязнения донных отложений в прибрежной зоне Копорской губы и подземных вод на участке размещения поверхностных хранилищ РАО изотопами Sr-90, Cs-137 и тритием».*

Территория исследования входит в ближнюю зону воздействия ЛАЭС-2, имеющую радиус 30-км согласно СП 151.13330.2012. Данная часть диссертации посвящена анализу многолетнего радиационного мониторинга поверхностных и подземных вод, почв, донных осадков Копорской губы и рек, а также выделению участков, наиболее подверженных техногенному радионуклидному загрязнению. Представленная характеристика основана на фондовых и опубликованных источниках, полевом материале, а также результатах лабораторных исследований по определению удельных активностей техногенных радионуклидов в подземных водах, донных отложениях и коэффициента сорбционного распределения в донных осадках Копорской губы и русловых отложениях.

Согласно многолетним гидрохимическим наблюдениям *озерные воды* территории пресные и имеют минерализацию от 0,03 до 0,07 г/дм³, по химическому составу сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые, значения рН в среднем близки к 6,7. *Речные воды* района исследований относятся к пресным со средней минерализацией в пределах 0,3–0,6 г/дм³, по химическому составу гидрокарбонатные кальциевые, величина рН близка к 8. *Воды Копорской губы и Финского залива*, а также *сбросные и заборные воды ЛАЭС-1 и ЛАЭС-2* близки по составу и относятся к солоноватым (минерализация 1,5–3,8 г/дм³), по химическому составу хлоридно-натриевые, с рН близким к 7,7.

Наибольшая плотность режимной сети и многолетний ряд наблюдений за гидрохимическим режимом подземных вод четвертичного и ломоносовского горизонтов и вендского комплекса имеются для территории СЗ АПК. Подземные воды *четвертичного горизонта* здесь гидрокарбонатные натриево-кальциевые с минерализацией от 0,09 до 0,9 г/дм³, рН 5–9. Подземные воды *верхней зоны ломоносовского горизонта* гидрокарбонатные натриево-кальциевые с минерализацией от 0,04 до 0,6 г/дм³ и рН от 4 до 9. Воды *средней зоны* гидрокарбонатные натриево-кальциевые, минерализация изменяется от 0,09 до 0,3 г/дм³, рН от 3 до 9. Подземные воды *нижней зоны ломоносовского горизонта* по химическому составу гидрокарбонатные натриевые с минерализацией от 0,2 до 0,6 г/дм³ и рН от 6 до 9. Подземные воды *вендского комплекса* хлоридные натриевые с минерализацией от 0,5 до 1,3 г/дм³, рН 7–9. В водах вендского водоносного комплекса отмечается повышенное содержание таких микроэлементов – Ba, Fe, Mn.

На формирование радиационной обстановки природных объектов в районе СЗ АПК существенное влияние оказала авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Так, например, по опубликованным данным в поверхностных водах после аварии на ЧАЭС удельные активности техногенных радионуклидов (Cs-137 и Sr-90) в 10-20 раз превышали значения дочернобыльского периода, которые составляли первые тысячные Бк/кг. По данным Росгидромета в период с 2002 по 2020 гг. удельная активность радионуклидов Cs-137, Sr-90 и трития постепенно снижалась и регистрировались значения на три порядка ниже УВ для питьевой воды по НРБ-99/2009.

Анализ данных мониторинга показал, что для подземных вод рассматриваемого района характерно повышенное содержание естественных радионуклидов: U-238,234, Th-232, Ra-224,226,228, Pb-210, Po-210, K-40, Rn-222. Удельные активности естественных радионуклидов в вендском водоносном комплексе превышают их значения в верхних водоносных горизонтах, что связано с повышенным содержанием минералов урана и тория в породах фундамента и водовмещающих породах и условиями затрудненного водообмена.

Фоновое содержание техногенных радионуклидов в районе расположения СЗ АПК для подземных вод четвертичного и ломоносовского водоносных горизонтов, по результатам обобщения многолетнего ряда наблюдений, составляет: суммарная α -активность – 0,02-0,2 Бк/кг, суммарная β -активность – 0,03-1,0 Бк/кг, Cs-137 – 0,003-0,04 Бк/кг, Sr-90 – 0,004-0,03 Бк/кг, тритий – 1,0-4,0 Бк/кг.

Обобщение и анализ результатов комплексного радиационного мониторинга подземных вод в районе СЗ АПК позволили установить характер распространения радионуклидного загрязнения рассматриваемой территории. Наиболее значимый ореол загрязнения, представленный, в основном, изотопом трития, сформирован в «грязной» зоне площадки хранения РАО (ФГУП «ФЭО») и в течение многих лет не выходит за её пределы. На смежной территории (от КПО в сторону Копорской губы, захватывая площадку ЛАЭС-1) отмечается средний уровень загрязнения. На площадках размещения ЛАЭС-2 и НИТИ содержание техногенных радионуклидов в подземных водах соответствует фоновым значениям (рис. 2).

На протяжении более 40 лет подразделениями Росгидромета, НИТИ, Радиевого института, ЛАЭС и др. проводятся наблюдения за содержанием техногенных радионуклидов почве и донных отложениях рассматриваемого района, включая 30-км зону ЛАЭС-2. Анализ данных показал, что загрязнение в большей степени представлено изотопом Cs-137, в меньшей – характеризуется изотопом Sr-90, среди природных радионуклидов преобладает K-40. Загрязнению подвержено в основном 3 типа почв: подзолистые, дерновые и болотные. По опубликованным данным эти почвы характеризуются емкостью катионного обмена (ЕКО) в диапазоне от 2 до 20 ммоль-экв/100г почвы, достигая в торфяных 40 ммоль-экв/100г почвы, что характеризует их средний и высокий уровень поглотительной способности. Наиболее полное отражение сорбционных процессов находится в экспериментальном определении

коэффициента сорбционного распределения (K_d) для Cs-137, Sr-90 и др., который в свою очередь может использоваться в прогнозных моделях радиоактивного загрязнения.

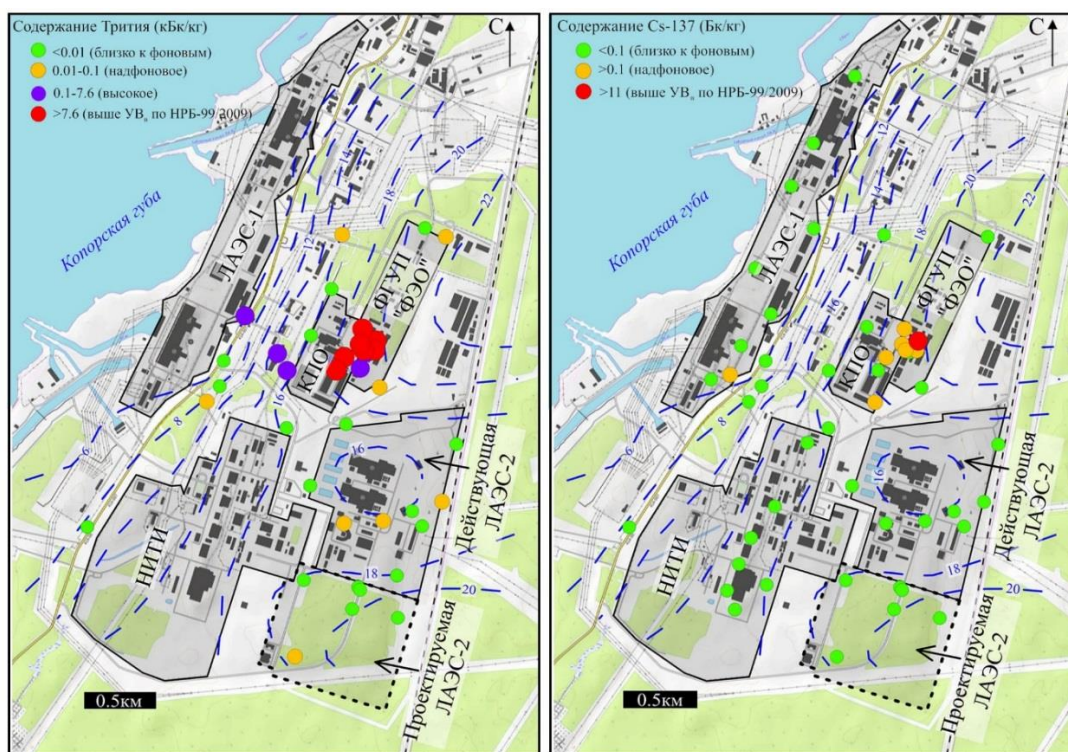


Рис. 2. Распределение содержания техногенных радионуклидов в подземных водах исследуемой территории по данным опробования 2009–2017 гг.

Общее количество исследований для определения физических (гранулометрический состав) почв составило 15, сорбционных свойств – по 8 для Cs-137 и Sr-90. Выполненные лабораторные исследования показали прямую зависимость между K_d и содержанием глинистой фракции (рис. 3а). Для сорбционных экспериментов по Cs-137 и Sr-90 на образцах донных осадков Копорской губы проведено по 20 определений, русловых отложений – по 6. Результаты экспериментальных исследований радиологических и сорбционных свойств донных осадков Копорской губы и русловых отложений позволили установить корреляцию между удельной активностью изотопа Cs-137 и K_d в различных геохимических обстановках: в морской воде ($M > 1$ г/дм³) сорбционная способность образца снижается (рис. 3б). Удельные активности Cs-137 в русловых отложениях в несколько раз превышают активности радионуклида большей части донных осадков Копорской губы (см.рис.4), что также подтверждает протекания десорбции в среде повышенной ионной силы.

Анализ статистических (частотных) диаграмм и карты-схемы площадного распределения Cs-137 (см.рис. 4) указывает на некоторое «ослабление» степени загрязненности донных осадков в сравнении с почвами, которое можно объяснить смывом поверхностным стоком дисперсных частиц почвы в пределах «Чернобыльского следа» в водотоки, а затем попаданием в морскую воду, где и происходит частичная десорбция Cs-137 в среде с повышенной ионной силой.

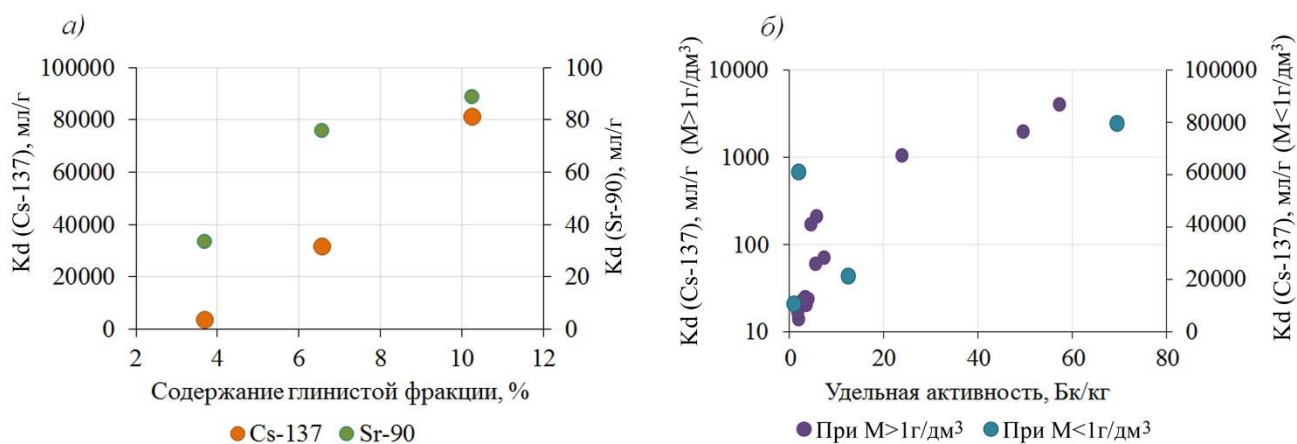


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента сорбционного распределения от содержания глинистой фракции в образцах почв (а) и удельной активности Cs-137 в донных отложениях в различных геохимических обстановках (б)

Таким образом настоящим исследованием было установлено, что локальные участки загрязнения донных осадков приурочены к прибрежной части Копорской губы вблизи расположения объектов СЗ АПК, где удельные активности Cs-137 могут достигать 50 Бк/кг (фоновое значение – 20 Бк/кг, после аварии на ЧАЭС). В подземных водах высокий уровень загрязнений регистрируется в пределах площадки хранения РАО и для трития превышает 7600 Бк/кг, Sr-90 и Cs-137 – 0,1 Бк/кг.

Глава 4. Изучение радионуклидного загрязнения подземных вод на территории ФГУП «ФЭО»

В четвертой главе приводится доказательство *второго защищаемого положения «Ореолы радионуклидного загрязнения подземных вод на территории ФГУП «ФЭО» обусловлены утечками 40-летней давности из хранилищ РАО и имеют «исторический» характер, так что на современном этапе наблюдается природная реабилитация участка загрязнения».*

В данной части диссертации проведен обзор истории и возникновения радиоактивного загрязнения подземных вод на площадке хранения РАО – ФГУП «ФЭО», чтобы установить является ли радиоактивный ореол «историческим» (т.е. образовался в результате утечек из хранилищ в первые годы его эксплуатации) или утечки радиоактивных растворов в подземную воды продолжают в настоящее время. Основным методом, используемым для изучения распространения радиоактивного загрязнения, является анализ многолетних данных мониторинга за состоянием уровня и радиационного режима подземных вод площадки ФГУП «ФЭО». Анализируется роль геолого-гидрогеологических условий промплощадки в миграции радионуклидов, а также проводится выявление мест утечек активности и оценка динамики радиоактивного ореола загрязнения подземных вод.

Геологическое строение площадки создает условия для возникновения гидрогеологических «окон», которые гидравлически связывают четвертичный и ломоносовский водоносные горизонты. Установленный в результате анализа режимных наблюдений разрыв напоров между этими двумя водоносными

горизонтами на отдельных участках определяет появление нисходящего потока подземных вод (см.рис.1в).

По результатам радиохимических исследований было установлено, что в составе радиоактивного загрязнения подземных вод преобладает изотоп тритий, в меньшей степени фиксируются Sr-90 и Cs-137. Сотрудниками СПбО ИГЭ РАН были отобраны пробы воды из каньонов зданий-хранилищ, в которых помимо трития, Sr-90 и Cs-137 отмечаются следы Co-60 и Pu-238, 239/240.

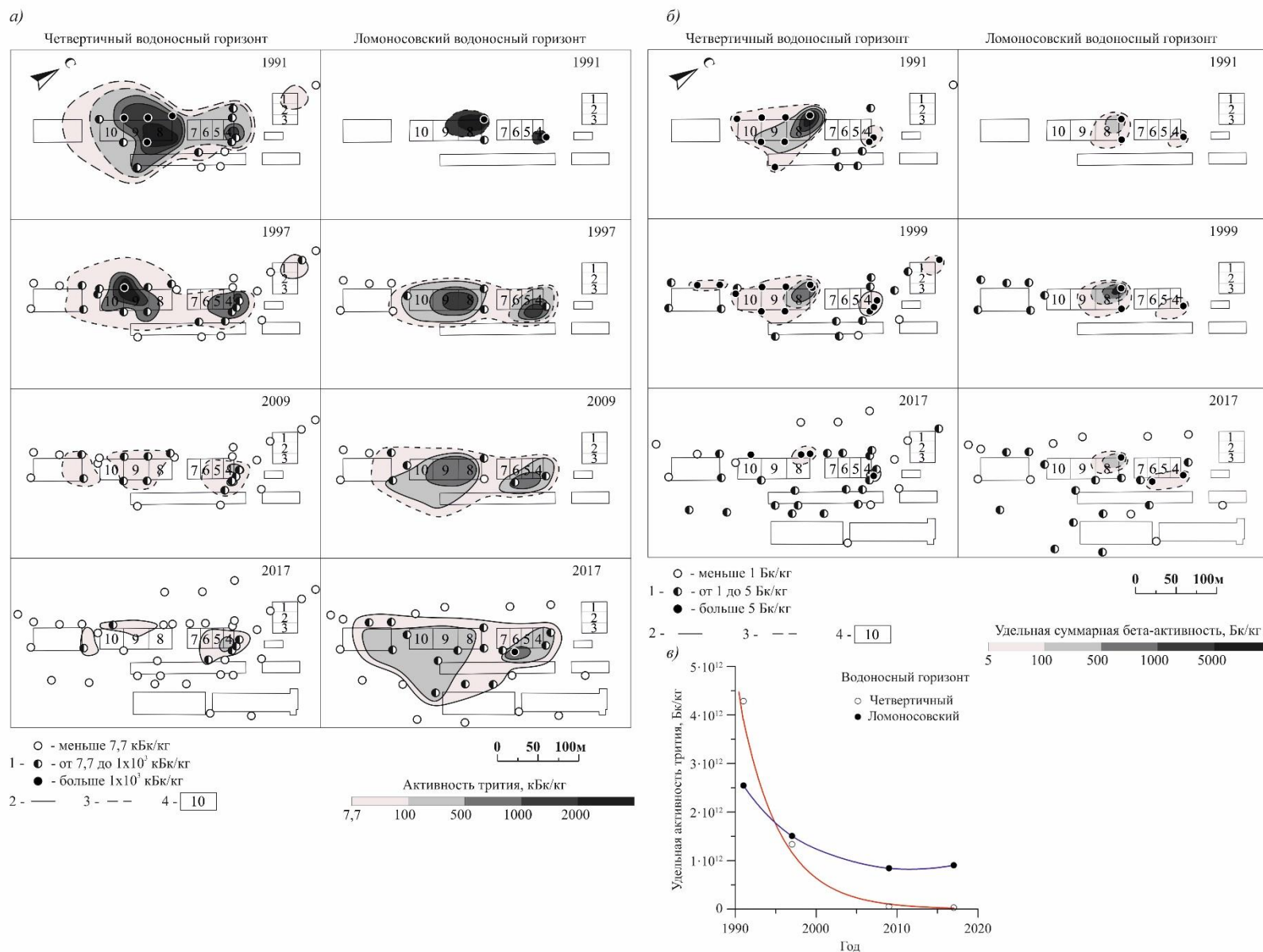
Данные многолетнего мониторинга показали, что поступление радионуклидов из зданий-хранилищ в подземные воды приурочены к периоду с 1980-х по 1990-е гг. Проведенные в начале 1990-х гг. инженерные мероприятия по реконструкции зданий-хранилищ способствовали прекращению утечки радиоактивных растворов в подземные воды. Прекращение утечек подтверждается анализом режимных наблюдений за радиоактивностью подземных вод в четвертичном горизонте – начиная с середины 1990-х годов фиксируется постоянное (от года к году) уменьшение удельной активности трития и суммарной β - активности.

Под влиянием гидрогеологических «окон» в пределах площадки хранения РАО за последние 20–25 лет ореол загрязнения «провалился» из верхнего (четвертичного) горизонта в ломоносовский (рис.5а,б). В настоящее время максимальные значения удельной активности трития и суммарной β - активности фиксируются в ломоносовском водоносном горизонте (рис.5в), однако загрязнение в нём появляется с задержкой по отношению к четвертичному водоносному горизонту. Также отмечается, что регистрируемые в ломоносовском горизонте значения удельной активности трития по своей абсолютной величине никогда не превышали его максимальную (за весь период наблюдений) удельную активность в четвертичном водоносном горизонте.

Анализ суммарной α - активности в 2017 г. показал, что ее величина для всех скважин варьирует в узком диапазоне от 0,6 до 1,2 Бк/кг – это может свидетельствовать об отсутствии значимого загрязнения подземных вод площадки хранения РАО α -излучающими техногенными радионуклидами подземных вод площадки.

Установлено, что сформированные ореолы лежат в пределах контура площадки ФГУП «ФЭО». Наибольшее распространение получил тритиевый ореол, который занимает почти всю территории площадки исследования и постепенно перемещается к её южной и юго-западной границам (рис. 5а), ореолы β - активности имеют меньшие площади распространения и сосредоточены в непосредственной близости от источника загрязнения – зданий-хранилищ (рис. 5б).

Для количественной оценки параметров переноса растворенных веществ (радионуклидов), таких как коэффициент дисперсии (D_L) и коэффициент сорбционной задержки (R) (связан с коэффициентом сорбционного распределения (K_d)), был использован метод статистических (временных) моментов. Использовались данные по скважинам, по которым имеется наибольший ряд многолетних наблюдений (рис. 6). По результатам расчетов получены очень низкие значения коэффициента сорбционного распределения,



1 – контрольно-наблюдательная скважина и значение удельной активности; контуры ореола: 2 – подтвержденные; 3 – предполагаемые; 4 – здания-хранилища РАО

Рис.5. Динамика радиоактивного загрязнения подземных вод: а) ореолы тритиевого загрязнения; б) ореолы загрязнения по суммарной β -активности; в) изменение осредненной по площади активности трития во времени

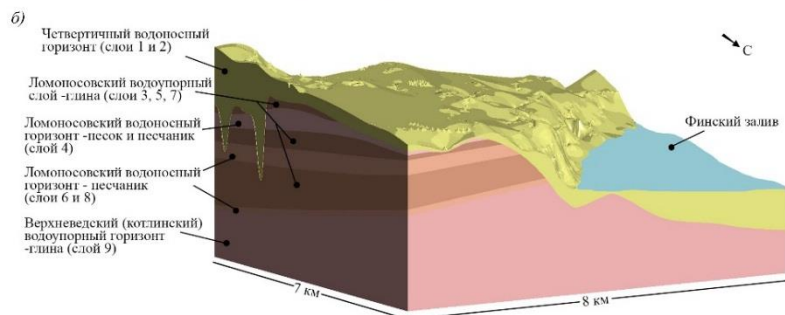
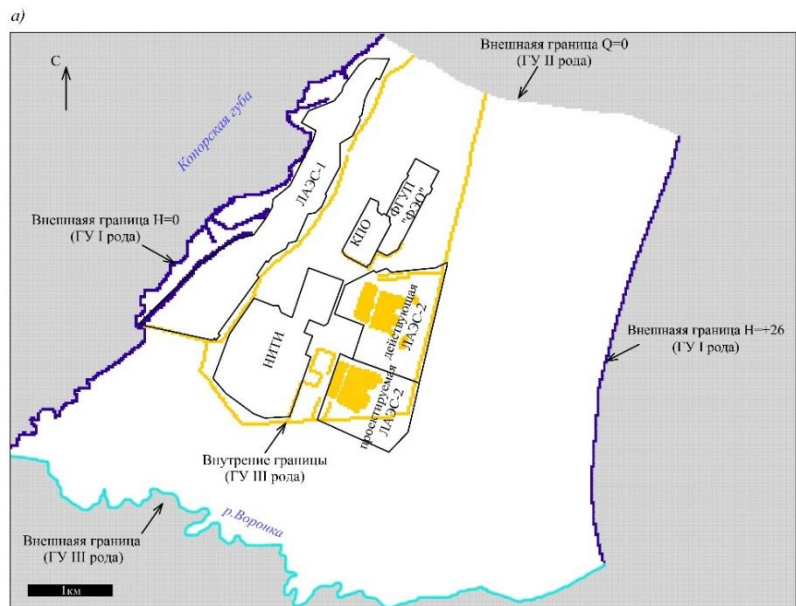
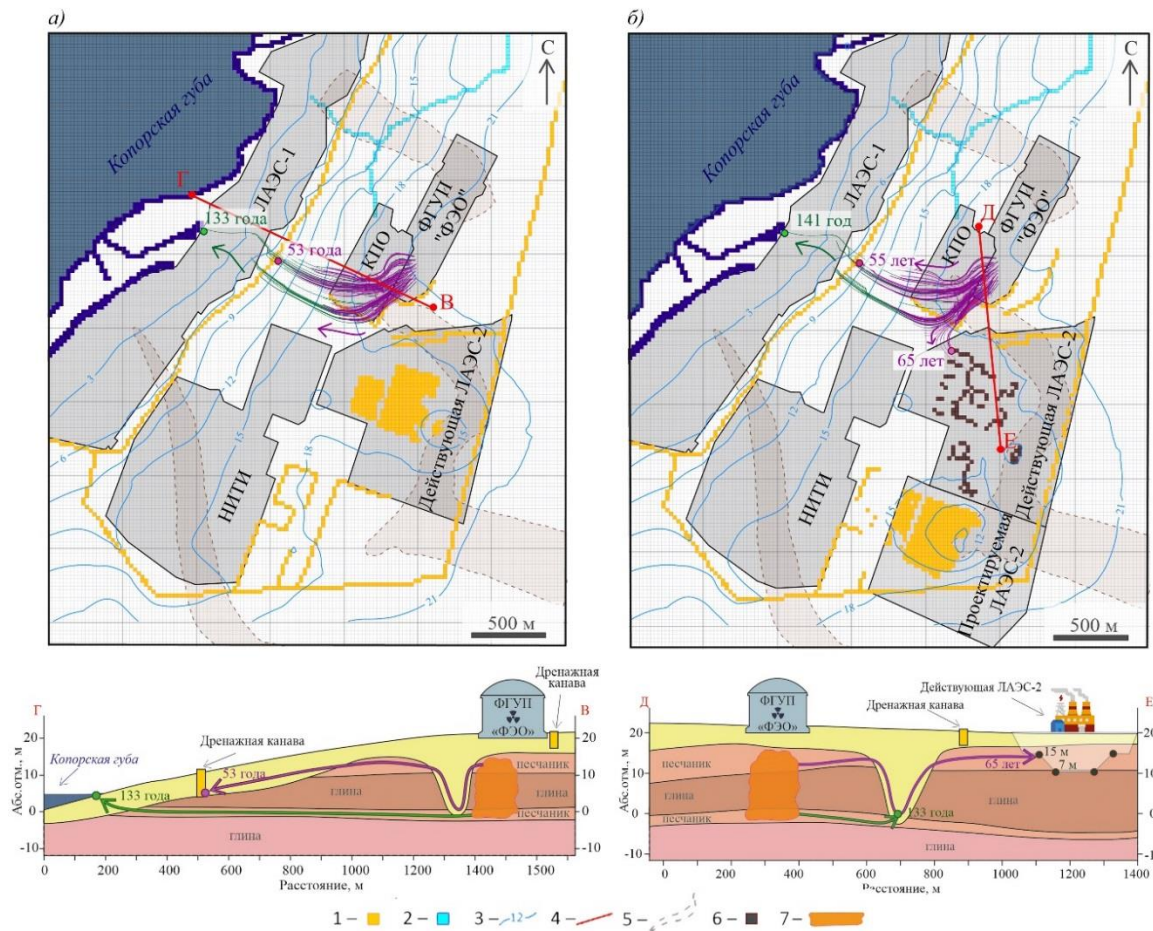


Рис. 7. Плановые границы (а) и трехмерный вид (б) фильтрационной модели

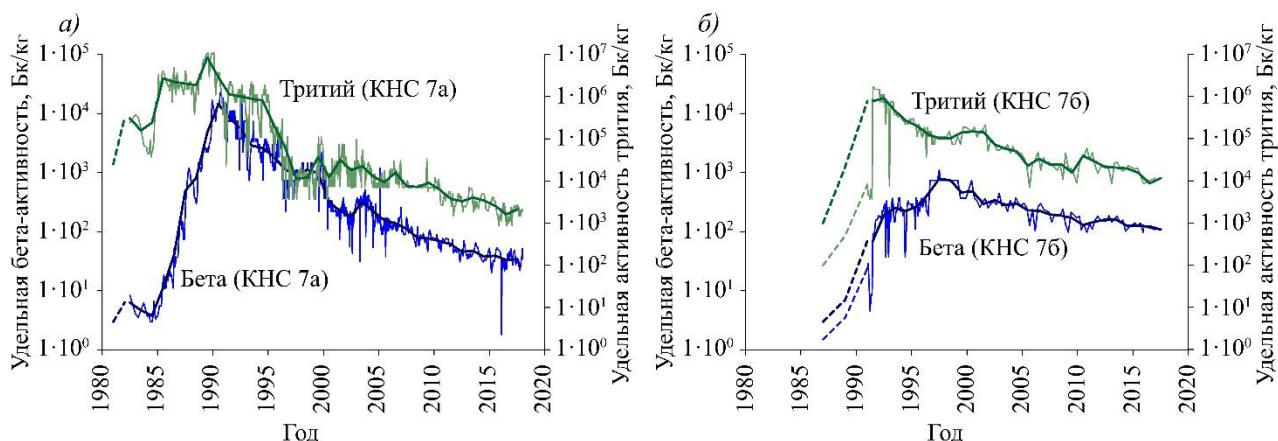


1 – дрены; 2 – поверхностные водотоки; 3 – гидроизогипсы первого от поверхности водоносного горизонта; 4 – линия разреза; 5 – контуры палеодолин; 6 – дренажная система первой очереди ЛАС-2; 7 – радиоактивный ореол. Зеленым цветом показаны пути миграции в нижнем ломоносовском горизонте, фиолетовым – в среднем ломоносовском и четвертичном горизонтах

Рис. 8. Структура фильтрационного потока с элементами сетки движения подземных вод в плане и разрезе после ввода первой (а) и второй (б) очередей ЛАС-2

нехарактерные для основного β -излучающего радионуклида – Sr-90 (табл. 1) (по опубликованным данным в четвертичных отложениях K_d для Sr-90 – 16-70 мл/г, в ломоносовских песчаниках – 6-67 мл/г). Проведенное сопоставление показало, что в натурных (пластовых) условиях миграция β -излучающих радионуклидов происходит быстрее, чем в лабораторных. Таким образом можно сделать вывод о том, что общую β -активность в качестве скринингового параметра следует использовать с осторожностью.

Наблюдаемое распределение во времени, а именно перемещение основного ореола радиоактивного загрязнения из четвертичного водоносного горизонта в ломоносовский, показало, что регистрируемое на сегодняшний день радиоактивное загрязнение подземных вод является «историческим», современных поступлений радиоактивных растворов обнаружено не было. Таким образом, сегодня площадка хранения РАО проходит фазу реабилитации от «исторического» загрязнения. Наблюдаемая картина – это результат предпринятых грамотных действий и инженерных мероприятий, которые были проведены в начале 1990-х годов для устранения причин протечек.



Скважины, оборудованные на четвертичный (а) и ломоносовский (б) водоносные горизонты; тонкие линии – ежеквартальные измерения, толстые – среднегодовые

Рис. 6 – Изменение удельной β -активности и радионуклида трития в контрольно-наблюдательных скважинах (КНС) вблизи здания-хранилища 8 (см.рис.5)

Глава 5. Прогноз миграции радионуклидов в условиях возрастающей техногенной нагрузки

В пятой главе приводится доказательство *третьего* защищаемого положения «Установлено по результатам геофильтрационного моделирования, что в период строительства и эксплуатации энергоблоков ЛАЭС-2 разгрузка «исторического» ореола загрязнения подземных вод в дренажный контур АЭС не приведёт к значимому увеличению радиоактивности дренажных вод».

Ввод в действие дренажной системы проектируемой ЛАЭС-2 приведет к изменению гидрогеологических условий как самой площадки, так и прилегающих территорий. В зону гидродинамического воздействия строительного дренажа попадает площадка хранения РАО (ФГУП «ФЭО»), где в

подземных водах сформировался техногенный радиоактивный ореол загрязнения. Таким образом депрессионная воронка, которая образуется в период строительства от работы дренажной системы ЛАЭС-2, создает риск распространения радиоактивного ореола на прилегающие территории. В последней главе представлены результаты выполненного моделирования процесса миграции радионуклидов, которое позволило определить возможность подтягивания сформированного техногенного ореола и появления радионуклидов в дренажных водах.

Таблица 1

Результаты расчета характеристик переноса растворимых веществ с использованием метода статистических моментов

Скв.	Показатель	t_{max}^{abc} , год ¹	μ'_1 , год ²	μ_2 , год ³	v , м/год ⁴	D_L , м ² /год ⁵	δ_L , м ⁶	R^7	K_d , мл/г ⁸
Четвертичный водоносный горизонт									
7а	Тритий	~1987	10,18	8,7	2,3	0,19	0,08		
	β	~1990	13,64	14,9				1,66	0,09
Ломоносовский водоносный горизонт									
7б	Тритий	~1991	15,34	24,6	1,4	1,66	1,18		
	β	~1999	22,34	35,2				1,58	0,08
Примечание: ¹ – приблизительное время пика концентраций; ² – нормированный начальный момент; ³ – второй центральный момент; ⁴ – средняя скорость фильтрации; ⁵ – коэффициент дисперсии; ⁶ – параметр микродисперсии; ⁷ – фактор сорбционной задержки; ⁸ – коэффициент сорбционного распределения, в расчете использовались $n=0,3$ и $\rho_b=2,1$ г/см ³									

Этапу гидродинамического моделирования предшествовало создание трехмерной геологической модели, которая в дальнейшем использовалась в качестве основы для создания поверхностей кровли и подошвы каждого из модельных слоев гидродинамической модели. Участок моделирования включает территорию площадок ЛАЭС-1, ЛАЭС-2, КПО, НИТИ, ФГУП «ФЭО». В основу наполнения трехмерной геологической модели была положена фондовая информация по более 1500 скважинам, полученная по результатам проводившихся на территории исследований инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий (1962-2018 гг.).

Гидродинамическая модель включает территорию СЗ АПК, её размер 6,85×8,05 км, общая площадь составляет 31,2 км². Внешней границей модельной области на западе является побережье Копорской губы (граница I рода). Восточная граница модельной области задавалась по удаленной гидроизогипсе с абсолютной отметкой плюс 26 м (граница I рода). В качестве южной границы модели принималась р. Воронка (граница III рода). Северная граница модели задавалась по линии тока грунтового водоносного горизонта, проведенной от побережья Копорской губы севернее ЛАЭС-1 до гидроизогипсы с абсолютной отметкой плюс 26 м (граница I рода). Верхней ограничивающей поверхностью модели является поверхность рельефа, а за нижнюю границу принималась кровля котлинских глин, которая выступает в качестве регионального

водоупора. К внутренним границам модели относятся каналы, ручьи и развитая дренажная сеть промышленных предприятий (границы III рода) (см.рис. 7а). Инфильтрационное питание равномерно распределялось по площади модельной области, за исключением некоторых локальных областей, связанных с расположением дренажных сетей.

Конфигурация гидродинамической модели представлена в плане регулярной сеткой с размером блока 25×25 м. По оси X модель разбита на 322 блока, по оси Y на 274.

Гидрогеологический разрез был аппроксимирован девятью модельными слоями: слой 1, соответствует четвертичному водоносному горизонту, слои 3, 5 и 7 – трем водоносным зонам ломоносовского горизонта, слои 2, 4 и 6 – разделяющим их относительным водоупорам (см.рис. 7б).

Литологическое строение толщи четвертичных отложений на территории исследований сопровождается сильной неоднородностью как в плане, так и по глубине, которая предопределила широкий диапазон значений коэффициентов фильтрации исследуемой толщи (0,24-4,1 м/сут). Для верхней водоносной зоны ломоносовского горизонта точное определение параметров осложняется ограниченной площадью его распространения в пределах площадки, а также гидравлической связью с четвертичным водоносным горизонтом. В средней водоносной зоне (среднее значение коэффициента фильтрации – 0,88 м/сут) наблюдаются значения коэффициента фильтрации, близкие к верхней зоне (среднее значение 0,94 м/сут). Коэффициенты фильтрации в нижней водоносной зоне (среднее значение 0,28 м/сут) более низкие.

Калибровка модели проводилась в стационарной постановке на 2013 г., когда имелась обширная сеть наблюдений за уровнями подземных вод по 25 наблюдательным скважинам, а также был проведен цикл замеров объема вод дренажной сети первой очереди ЛАЭС-2.

Моделирование показало, что ввод в эксплуатацию дренажа первой очереди (действующей) ЛАЭС-2 (2007-2015 гг.) приводит к формированию в пределах модельной области депрессионной воронки с максимальным понижением 10-12 м в её центре (см.рис.8а). Также наблюдается небольшое (десятки сантиметров) снижение уровня подземных вод на южной границе площадки ФГУП «ФЭО». Происходящие изменения в подземной гидродинамике оказывают заметное влияние на структуру потока вблизи хранилищ РАО (см.рис.8а), однако, как видно основным направлением движения загрязненных подземных вод остается юго-западное и северо-западное направление – в сторону Копорской губы.

Дренаж второй очереди (проектируемой) ЛАЭС-2 приводит к дополнительной деформации сетки движения подземных вод: наблюдается «ответвление» части модельных линий тока от генерального северо-западного направления (см.рис.8б).

Расчеты путей и времени миграции трития на модели проводились по линиям тока. Для оценки скорости миграции была принята следующая величина активной пористости: для четвертичных отложений 0,35; для кембрийских песчаников – 0,3; для кембрийских глин – 0,07. В качестве радионуклида,

маркирующего пути массопереноса в подземных водах, выбран тритий, инертные свойства которого позволяют рассматривать его в качестве трассера.

Результаты моделирования миграции «исторического» тритиевого ореола загрязнения при изменении гидродинамических условий исследуемой территории позволили установить, что при работе дренажа первой очереди ЛАЭС-2 основное направление движения загрязненных подземных вод совпадает с региональным потоком – в сторону Копорской губы (см.рис.8а). При включении дренажной системы второй очереди ЛАЭС-2 подтягивания «исторического» тритиевого ореола загрязнения с площадки ФГУП «ФЭО» к дренажу первой очереди ЛАЭС-2 стоит ожидать спустя 65 лет, что превышает проектный срок эксплуатации АЭС (60 лет) (см.рис.8б).

Радионуклиды Sr-90 и Cs-137, в отличие от «инертного трассера» – трития, подвергаются процессу сорбции и удерживаются грунтами. По опубликованным данным в четвертичных отложениях территории исследования K_d Sr-90 имеет диапазон 16-70 мл/г, Cs-137 – 1470-7840 мл/г, в ломоносовский песчаниках Sr-90 – 6-67 мл/г, Cs-137 – 11-709 мл/г. Если учесть фактор сорбционной задержки, который был определен по данным мониторинга на площадке ФГУП «ФЭО» и составил, по нашим оценкам, $R = 1,58-1,66$ (см.табл.1), то можно с уверенностью сказать, что эти радионуклиды должны двигаться, по крайней мере, в полтора раза медленнее, чем инертный трассер. Исходя из этого, для Sr-90 и Cs-137 характерное время нахождения в водоносных горизонтах составит около 100 лет.

Согласно представленным результатам, можно утверждать, что за время строительства и эксплуатации ЛАЭС-2 при совместной работе дренажных систем первой и второй очередей не ожидается разгрузки «исторического» ореола радиоактивного загрязнения в дренажные воды ЛАЭС-2.

Несмотря на незначительные, по данным моделирования, изменения в структуре потока и направлении миграции ореола загрязнения, в целях контроля состояния подземных вод территории исследований рекомендуется расширить мониторинговую сеть и организовать отбор проб воды на содержание в ней радионуклидов, рассмотрев возможность расположения мониторинговых скважин по линии тока между ФГУП «ФЭО» и ЛАЭС-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выполненный объем работ, включавший полевой отбор проб и последующую обработку результатов лабораторных экспериментов, позволил впервые для исследуемого района определить параметры взаимодействия образцов почв и донных осадков Копорской губы и русловых отложений с радиоактивными растворами (Sr-90, Cs-137) и установить зависимость сорбционной способности образца от минерализации контактирующего раствора (пресной и морской воды), в результате чего при попадании частиц почвы в морскую воду происходит частичная десорбция радионуклидов. Определение удельных активностей техногенных радиоактивных изотопов в почвах и донных

отложениях, а также обобщение ранее проводившихся исследований позволили установить, что загрязнение рассматриваемых природных сред продуктами деления (Sr-90, Cs-137) находится на уровне глобального фона, в формировании которого большую роль сыграла авария на Чернобыльской АЭС (в 1986 г.). Локальные аномалии техногенного загрязнения Cs-137 приурочены к донным осадкам сбросных каналов и русловых отложений.

2. Обобщив и проанализировав данные многолетнего радиационного мониторинга подземных вод в пределах и вне промышленных площадок СЗ АПК, удалось установить, что большая часть территории характеризуется содержанием техногенных радионуклидов Sr-90, Cs-137 и трития в подземных водах на уровне фона, характерного для данного района. Исключение составляет площадка пункта хранения РАО, где сформировался наибольший по площади техногенный ореол загрязнения, представленный тритием и β -излучающими радионуклидами.

3. Существенную роль в миграции ореола радионуклидного загрязнения играют литологические «окна» в разделяющих слабопроницаемых слоях (в том числе приуроченные к палеодолинам) и разрывы напоров выше- и ниже-залегающих горизонтов, что приводит к гидравлической связи подземных вод четвертичного (верхний) и ломоносовского (нижний) горизонтов. В настоящее время максимальные значения удельной активности трития и суммарной β -активности на территории участка загрязнения на площадке ФГУП «ФЭО» фиксируются в ломоносовском водоносном горизонте, где радиоактивный ореол появился с задержкой, что подтверждает «исторический» характер загрязнения и отсутствие современных поступлений радиоактивных растворов.

4. Используя метод статистических (временных) моментов и многолетний ряд радиологических наблюдений по контрольно-наблюдательным скважинам на площадке ФГУП «ФЭО», проведена количественная оценка параметров переноса ($v=1,4-2,3$ м/год, $D_L=0,19-1,66$ м²/год, $R=1,58-1,66$) продуктов деления в подземных водах. Полученные расчетные значения K_d оказались на порядок ниже лабораторных значений, характерных для Sr - 90 (основной β -излучающий радионуклид).

5. Результаты геофильтрационного моделирования позволили определить пути и время миграции инертного трассера (трития) при изменяющихся гидродинамических условиях. Установлено, что при включении дренажной системы проектируемой ЛАЭС-2 подтягивания «исторического» тритиевого ореола загрязнения с площадки хранения РАО к дренажу действующей ЛАЭС-2 следует ожидать спустя 65 лет. Учитывая фактор сорбционной задержки существующий радиоактивный ореол, представленный сорбируемыми и относительно долгоживущими изотопами Sr-90 и Cs-137, будет мигрировать в направлении ЛАЭС-2 в течение примерно 100 лет прежде, чем радиоактивно загрязненные воды станут частью вод дренажной системы станции. Моделирование подтвердило определяющую роль литологической изменчивости пород в характере гидродинамической связи водоносных горизонтов на локальных участках. Это потребовало привлечения данных

радиационного мониторинга подземных вод, что является новым элементом анализа гидрогеологических условий территории исследования.

Опубликованные работы по теме диссертации

1. **Ерзова В.А.**, С.М. Судариков, В.Г. Румынин, Шварц А.А. Естественная радиоактивность и фоновое содержание техногенных радионуклидов в подземных водах района Ленинградской АЭС // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021. – №4. – С. 53-66. DOI: 10.31857/S0869780921040044

2. **Ерзова В.А.**, Румынин В.Г., Судариков С.М., Шварц А.А., Владимиров К.В. О воздействии объектов северо-западного атомно-промышленного комплекса (СЗАПК) на загрязнение подземных вод (Ленинградская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т.332. – №9. – С. 30-42. DOI: 10.18799/24131830/2021/9/3351

3. **Ерзова В.А.**, Румынин В.Г., Никуленков А.М., Владимиров К.В., Судариков С.М., Вилькина М.В. Прогноз миграции радионуклидов в подземных водах в зоне влияния строительного дренажа Ленинградской АЭС-2 // Записки Горного института. – 2022. (Onlinefirst). DOI: 10.31897/PMI.2022.27

4. Rumynin V.G., Nikulenkov A.M., Rozov K.B., Vladimirov K.V., **Erzova V.A.** The status and trends in radioactive contamination of groundwater at a LLW-ILW storage facility site near Sosnovy Bor (Leningrad region, Russia) // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – V. 237. – P. 106707. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106707

5. **Ерзова В.А.**, Владимиров К.В., Румынин В.Г. Исследование поведения техногенных радиоактивных ореолов на участке исторического загрязнения подземных вод по данным мониторинга // Материалы XV Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». – 2019. – С. 388-398.

6. **Ерзова В.А.** Содержание природных радионуклидов в подземных водах (район г. Сосновый бор Ленинградской области) // Труды XXV Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 120-летию горно-геологического образования в Сибири, 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. – 2021. – С. 244-246.

7. **Ерзова В.А.**, Стародубова Ю.П., Новицкая О.И., Румынин В.Г., Никуленков А.М. Палеодолина как осложняющий фактор при строительстве ЛАЭС-2 // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. Выпуск 23. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (31 марта – 1 апреля 2022 г.). – Москва: изд-во «ГеоИнфо», 2022. – С. 54-69.

Патенты и свидетельства:

1. **Ерзова В.А.**, Судариков С.М. Программа для оценки безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов. Свидетельство о регистрации

программы для ЭВМ 2020616584, 18.06.2020. Заявка № 2020615180 от 04.06.2020.

2. **Ерзова В.А.**, Судариков С.М., Пайор В.А. База данных радиационного мониторинга в районах расположения действующих атомных электростанций России. Свидетельство о регистрации базы данных 2021620457, 11.03.2021. Заявка № 2021620316 от 24.02.2021.