

На правах рукописи



Понизов Антон Владимирович

**Комплексный подход к обоснованию решений по закрытию пунктов
глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов**

Специальность 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая
проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук.

Научный руководитель: Уткин Сергей Сергеевич,
доктор технических наук.

Официальные оппоненты: Гупало Владимир Сергеевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Физические процессы горного производства
и геоконтроль», Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет
«МИСиС».

Сорокин Валерий Трофимович,
доктор технических наук, главный технолог
по обращению с ОЯТ и РАО,
Технологическое управление,
Акционерное общество «АТОМПРОЕКТ».

Ведущая организация: Санкт-Петербургское отделение Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева
Российской академии наук.

Защита состоится 23 июня 2022 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета
Д 002.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Института проблем
безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте
<http://www.ibrae.ac.ru/contents/512/>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время в Российской Федерации сформировалась развитая инфраструктура ядерного топливного цикла. На всех его этапах (добыча урана, обогащение урана, изготовление ядерного топлива, переработка отработавшего ядерного топлива) образуются радиоактивные отходы (далее – РАО), в том числе жидкие радиоактивные отходы (далее – ЖРО).

Конечной целью обращения с ЖРО на предприятиях ядерного топливного цикла является их подготовка (переработка и кондиционирование) к обязательному захоронению – безопасному размещению в пункте захоронения РАО без намерения их последующего извлечения.

В качестве основного способа захоронения ЖРО рассматривается их размещение в отвержденном виде: высоко- и среднеактивных долгоживущих РАО – в пунктах глубинного захоронения; среднеактивных короткоживущих и низкоактивных РАО – в пунктах приповерхностного захоронения.

Вместе с тем с 1963 г. в Российской Федерации реализуется практика глубинного захоронения ЖРО, заключающаяся в их контролируемом нагнетании через скважины в глубоководные водоносные (эксплуатационные) горизонты, изолированные от поверхности земли толщей водоупоров. В настоящее время ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (предприятие Госкорпорации «Росатом») эксплуатируются три пункта глубинного захоронения низкоактивных и среднеактивных ЖРО (далее – ПГЗ ЖРО): «Северский» (г. Северск, Томская область), «Димитровградский» (г. Димитровград, Ульяновская область) и «Железногорский» (г. Железногорск, Красноярский край). Практика глубинного захоронения ЖРО, применяемая в нашей стране, является уникальной. Попытки создания установок для глубинного захоронения ЖРО проводились в США до 1980-х годов, однако данная технология не была реализована по причине отсутствия благоприятных геологических условий в районе размещения объектов атомной промышленности.

ПГЗ ЖРО является объектом использования атомной энергии, близок к природно-техногенным водным комплексам и является сложной природно-технической системой, которая включает в себя специально выделенный участок недр, имеющий статус горного отвода, и комплекс подземных (нагнетательные, разгрузочные и наблюдательные скважины) и поверхностных (здания, сооружения, емкости, трубопроводы, насосное и другое технологическое оборудование) объектов, предназначенных для захоронения ЖРО.

Зарубежные специалисты и эксперты Международного агентства по атомной энергии (далее – МАГАТЭ) не относят практику глубинного захоронения ЖРО к рекомендуемым методам захоронения, поскольку, по их мнению, она не соответствует общепризнанному принципу многобарьерности, так как при реализации данной практики не предусмотрена упаковка РАО и другие традиционные инженерные барьеры безопасности, при этом безопасность обеспечивается преимущественно защитными свойствами природной среды.

Эксплуатация ПГЗ ЖРО ведется в течение длительного периода времени, первоначальным проектом срок эксплуатации был установлен не более 25 лет. Однако в связи с отсутствием альтернативной технологии отверждения и образованием большого объема ЖРО, а также с учетом положительного опыта применения практики глубинного захоронения ЖРО, срок эксплуатации ПГЗ ЖРО неоднократно продлевался. При этом, даже с учетом надлежащего технического обслуживания и текущего ремонта, состояние систем и элементов ПГЗ ЖРО находится близко к предельному. Исходя из этого, в существующих планах Госкорпорации «Росатом» предусмотрены мероприятия, направленные на прекращение деятельности по захоронению РАО в жидком виде, в связи с чем становится актуальным вопрос о завершении эксплуатации ПГЗ ЖРО и разработке организационно-технических мероприятий по обеспечению их безопасного закрытия. Особое значение при этом приобретает обеспечение и обоснование долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО на период потенциальной опасности захороненных РАО. Система захоронения РАО представляет собой совокупность подземных сооружений ПГЗ ЖРО, специально выбранного природного геологического образования (эксплуатационные и буферный горизонты, а также перекрывающие водоупоры) в пределах горного отвода недр и захороненных РАО.

Обоснования безопасности технологии подземного захоронения ЖРО, выполненные российскими специалистами и рассмотренные международными экспертами, выявили ряд вопросов, требующих дополнительной проработки. К основным из которых были отнесены:

- обеспечение полноты и системности при описании эволюции системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО посредством анализа полного перечня событий, явлений и факторов природного и техногенного происхождения, а также физико-химических процессов, влияющих на безопасность;

- повышение потенциала детализации геомиграционных геофильтрационных моделей по сравнению с применяемыми моделями, основанными на консервативных предположениях, что в настоящее время трактуется как недостаточное понимание объекта анализа;

- обоснование долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО, в том числе выбранного типа тампонажного материала, применяемого при ликвидации эксплуатационных скважин;

- оценка сценариев возможных нарушений герметичности эксплуатационных скважин после закрытия ПГЗ ЖРО;

- разработка обоснованной концепции закрытия ПГЗ ЖРО, позволяющей аргументированно реализовать технические решения, обеспечивающие долговременную безопасность системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

Представленная совокупность сформулированных вопросов к обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО делает актуальным разработку комплексного подхода для их совместного решения.

Цели и задачи исследования

Целью настоящей диссертационной работы является разработка комплексного подхода к решению актуальных вопросов обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО, включающего:

- определение значимых для долговременной безопасности системы захоронения РАО природных и техногенных факторов;
- выявление и анализ факторов, представляющих наибольшую потенциальную опасность для устойчивого функционирования инженерных барьеров безопасности после закрытия ПГЗ ЖРО;
- исследование характеристик материалов инженерных барьеров безопасности, обеспечивающих долговременную экологическую приемлемость ПГЗ ЖРО после закрытия;
- разработку концептуальных положений по обоснованию организационно-технических мероприятий по закрытию ПГЗ ЖРО.

Для достижения данной цели на примере ПГЗ ЖРО «Железногорский», рассматриваемого в качестве референтного объекта, необходимо было решить следующие задачи:

- определить перечень событий и процессов, важных для долговременной безопасности системы захоронения РАО, с учетом особенностей района и площадки размещения ПГЗ ЖРО, установить основные факторы, влияющие на долговременную безопасность;
- разработать модель процесса потенциально наиболее опасного для обеспечения долговременной безопасности системы захоронения РАО и использовать ее для расчетно-экспериментального исследования сценариев эволюции материалов инженерных барьеров безопасности после закрытия ПГЗ ЖРО;
- определить приемлемые по физико-механическим свойствам тампонажные материалы, предназначенные для обеспечения долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО с учетом проведения анализа изменения их характеристик в конкретных условиях захоронения РАО;
- разработать концептуальные положения по обоснованию решений по закрытию ПГЗ ЖРО с учетом его особенностей.

Научная новизна работы

Научная новизна работы состоит в следующем:

- разработан алгоритм отбора значимых факторов (особенностей, событий и процессов (далее – ОСП), которые необходимо учитывать при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО и обосновании ее долговременной безопасности с учетом природно-техногенной специфики ПГЗ ЖРО;
- определен перечень факторов, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», по разработанному алгоритму отбора ОСП;
- разработана модель процесса заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин применительно к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, с использованием которой оценены границы и скорости распространения компонентов РАО при потенциально

возможных сценариях заколонных перетоков по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железнодорожный» после его закрытия;

– исследованы физико-механические свойства тампонажных материалов, приемлемых для обеспечения долговременной безопасности системы захоронения РАО, определена начальная эволюция показателей их изолирующих свойств применительно к конкретным условиям захоронения РАО;

– разработаны концептуальные положения к обоснованию решений по безопасному закрытию ПГЗ ЖРО и система организационно-технических мер для обеспечения поэтапного безопасного закрытия ПГЗ ЖРО.

Практическая значимость и предложения по внедрению результатов работы

Результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, были использованы при:

– формировании и реализации Госкорпорацией «Росатом» Программы расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию и оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации»;

– формировании и реализации мероприятий Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» в части обеспечения мероприятия «Создание и развитие технологий переработки и кондиционирования радиоактивных отходов»;

– разработке требований по обеспечению безопасности пунктов захоронения РАО (далее – ПЗРО), установленных в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17), и подготовке рекомендаций по выполнению оценки долговременной безопасности ПЗРО и обоснованию безопасности ПГЗ ЖРО, приведенных в руководствах по безопасности при использовании атомной энергии «Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» (РБ-139-17), «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21).

Результаты диссертационного исследования будут использованы при выполнении работ по обоснованию безопасности закрытия ПГЗ ЖРО с учетом суммарного объема захороненных ЖРО (свыше 65 млн м³).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритм отбора факторов (ОСП), важных для обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, и разработанный по данному алгоритму перечень ОСП (51 фактор), характерных для ПГЗ ЖРО «Железнодорожный» с учетом его особенностей.

2. Зависимости изменения высоты вертикальной миграции компонентов РАО во времени для ликвидируемых скважин ПГЗ ЖРО «Железнодорожный», рассчитанные по разработанной модели заколонных перетоков.

3. Зависимости эволюции показателей изолирующих свойств (прочность, плотность, водонепроницаемость) тампонажных материалов на основе портландцемента с добавкой бентонита от времени их контакта с подземной водой и модельным раствором РАО рассматриваемого ПГЗ ЖРО «Железногорский».

4. Разработанная система организационно-технических мер для обеспечения поэтапного безопасного закрытия ПГЗ ЖРО.

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается:

- использованием стандартных методов расчета и аттестованных методик экспериментального определения значений величин;
- подтверждением результатов расчетов результатами экспериментов;
- публикацией результатов исследований в рецензируемых журналах;
- результатами апробации научных докладов по теме диссертации, представленных на заседаниях научно-технического совета ФБУ «НТЦ ЯРБ», а также на совместном заседании научно-технического совета Госкорпорации «Росатом» № 10 «Экология и радиационная безопасность» и № 5 «Завершающая стадия ядерного топливного цикла» (8 октября 2020 г.), научных конференциях и семинарах.

Личный вклад автора

Все результаты научных работ по теме исследования получены диссертантом лично или при его непосредственном участии, а именно диссертант:

- в течение длительного времени выполнял научно-исследовательские работы непосредственно на ПГЗ ЖРО «Железногорский» в качестве сотрудника и руководителя, в том числе по тематике обеспечения безопасности его эксплуатации, реконструкции и продления срока эксплуатации;
- принимал участие в работе миссии МАГАТЭ «Международное экспертное рассмотрение практики глубокой закачки жидких радиоактивных отходов в Российской Федерации» (2012–2013 гг.) в качестве специалиста от российской стороны, а также в подготовке Материалов самооценки для предоставления международным экспертам в рамках Миссии МАГАТЭ по оценке безопасности российской технологии подземного захоронения жидких радиоактивных отходов;
- принимал непосредственное участие в разработке программы научных работ по выполнению рекомендаций МАГАТЭ, которая в 2015 г. была согласована Ростехнадзором и утверждена Госкорпорацией «Росатом»;
- принимал непосредственное участие в разработке моделей и сценариев эволюции событий и процессов на ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- проводил анализ опытных данных, полученных на ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- проводил анализ и обработку экспериментально-расчетных данных, полученных в результате исследований на ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- разработал концептуальные положения безопасного поэтапного закрытия ПГЗ ЖРО и систему ОСП, важных для обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО, после закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский»;

– организовал работу по установлению требований по обеспечению безопасности ПЗРО и разработке рекомендаций по выполнению оценки долговременной безопасности ПЗРО и обоснованию безопасности ПГЗ ЖРО в соответствии с процедурами по разработке и утверждению федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и руководств по безопасности при использовании атомной энергии.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации докладывались на следующих научных мероприятиях:

– V Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томский политехнический университет, г. Томск, 13–16 сентября 2016 г.;

– V Международная конференция молодых ученых и специалистов памяти академика А.П. Карпинского. – ФГУП «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург, 28 февраля – 3 марта 2017 г.;

– Международный общественный форум-диалог «АтомЭко-2017», г. Москва, 21–22 ноября 2017 г.;

– 12-я школа-семинар «Организационное и правовое обеспечение двух систем: СГУК РВ и РАО и ЕГС РАО». – Госкорпорация «Росатом», г. Сочи, 3–8 сентября 2018 г.;

– IX Российская конференция с международным участием «Радиохимия 2018». – Госкорпорация «Росатом», г. Санкт-Петербург, 17–21 сентября 2018 г.;

– 27th International Conference Nuclear Energy for New Europe, NENE 2018, Portorož, Slovenia, 10–13 September 2018;

– 2d International school – seminar. Fundamental basis for advanced treatment of radioactive wastes. IPCE RAS, Moscow, 28 September – 2 October 2018;

– Current Understanding and Future Direction for the Geological Disposal of Radioactive Waste. OECD Nuclear Energy Agency, Rotterdam, Netherlands, 10–11 October 2018;

– Международный семинар «Технологии обращения с ОЯТ и РАО. Достижения и перспективы развития». – Госкорпорация «Росатом», г. Красноярск, 22–26 октября 2018 г.;

– Семинар Ростехнадзора с представителями Центра радиационной и ядерной безопасности Финляндии (STUK) «Принципы и критерии анализа долговременной безопасности объектов захоронения РАО». – г. Москва, 27 ноября 2018 г.;

– Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019». – ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, 23–26 сентября 2019 г.;

– VI Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томский политехнический университет, г. Томск, 20–24 сентября 2021 г.;

– XI Российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях». – Госкорпорация «Росатом», г. Москва, 26–29 октября 2021 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 11 статей в специализированных изданиях, включая восемь статей в изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки Российской Федерации, рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук и семь докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста и содержит 31 рисунок, восемь таблиц. Библиография содержит 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее основная цель, задачи, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, личный вклад автора, апробация и публикации результатов работы.

В **Главе 1** приведен аналитический обзор сведений о сложившейся практике глубинного захоронения РАО в Российской Федерации.

Выполненный анализ работ Рыбальченко А. И., Пименова М. К., Курочкина В. М., Ершова Б. Г., Косаревой И. М., Захаровой Е. В., Зубкова А. А., Букаты М. Б., Хафизова Р. Р. позволил установить, что созданию системы глубинного захоронения ЖРО в нашей стране предшествовали исследования по комплексному обоснованию их радиационной и экологической безопасности при эксплуатации, включая установление критериев к характеристикам применяемых геологических формаций и захораниваемым ЖРО, и сформулированы основные принципы обеспечения безопасности ПГЗ ЖРО после его закрытия. Работы Ферাপонтова А. В., Кудрявцева Е. Г., Хамазы А. А., Шарифудинова Р. Б., Линге И. И., Уткина С. С., Абрамова А. А., Дорофеева А. Н., направленные на формирование и развитие нормативной правовой базы в области обращения с РАО, в том числе при их захоронении, с учетом опыта применения положений международных документов, стали основой регулирующих требований к обоснованию долговременной безопасности ПЗРО. Однако обоснования безопасного закрытия ПГЗ ЖРО и обоснования долговременной экологической приемлемости на период потенциальной опасности захороненных РАО до настоящего времени осуществлено не было.

В аналитическом обзоре систематизированы характеристики ПГЗ ЖРО «Железногорский», приведены сведения о режимах захоронения ЖРО путем нагнетания в два эксплуатационных горизонта: в I эксплуатационный горизонт на глубину 355–500 м – среднеактивных ЖРО, во II эксплуатационный горизонт на глубину 180–280 м – низкоактивных ЖРО.

Анализ опыта эксплуатации рассматриваемого ПГЗ ЖРО с 1960-х годов показал, что характеристики выбранных геологических формаций, инженерно-техническая организация его эксплуатации, выполнение установленных требований к составу ЖРО, подлежащих захоронению, – позволили обеспечить его безопасность для населения и окружающей среды на всем этапе эксплуатации, однако, для обеспечения экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский» после его закрытия требуется всестороннее обоснование его безопасности на длительный период времени.

Проведен анализ рекомендаций экспертов МАГАТЭ по совершенствованию обоснования долговременной безопасности системы РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

Отмечено, что имплементация рекомендаций миссии МАГАТЭ предполагает использование комплексного подхода к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский», учитывающего его особенности по сравнению с другими ПГЗ ЖРО, и его рассмотрение миссией МАГАТЭ в качестве референтного в существующей системе ПГЗ ЖРО.

На основе результатов проведенного анализа, с учетом рекомендаций экспертов миссии МАГАТЭ, диссертантом сформулированы приоритетные направления исследований в рамках проводимой диссертационной работы для обоснования долговременной экологической приемлемости рассматриваемого ПГЗ ЖРО после его закрытия.

В **Главе 2** приведены результаты определения и систематизации факторов (ОСП), важных для обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский» на основе разработанного алгоритма отбора ОСП.

Разработка алгоритма отбора ОСП ПГЗ ЖРО осуществлялась в соответствии с документом МАГАТЭ «The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste» (SSG-23) на основе перечня «Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste», рекомендуемого Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития, с учетом его актуализации. Необходимым условием при разработке алгоритма отбора ОСП ПГЗ ЖРО являлся учет требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14) и «Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии» (НП-064-17). Алгоритм отбора ОСП ПГЗ ЖРО представлен на рис. 1.

Разработанный алгоритм отбора ОСП, важных для обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, в рамках диссертационного исследования был апробирован при определении ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Процедура анализа ОСП ПГЗ ЖРО «Железногорский» состояла в отборе из полного списка ОСП тех факторов, которые индивидуально или в сочетании с другими влияют на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

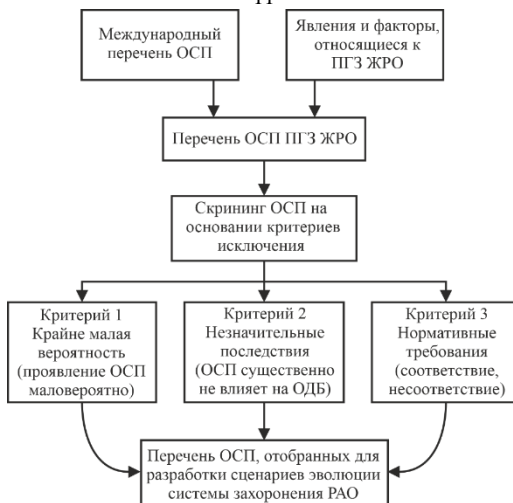


Рис. 1. Алгоритм отбора ОСП ПГЗ ЖРО

ОСП не учитывались при оценке безопасности исходя из следующих критериев:

- нерелевантность (необоснованность) – не имеют отношения к системе захоронения РАО или не могут быть реализованы в данной технологии захоронения РАО;
- крайне малая вероятность – вероятность проявления в течение периода времени, когда ОСП может произойти, существенно ниже установленного уровня;
- незначительные последствия – эффект неизмерим либо ненаблюдаем, либо несущественен;
- возможности регулирования – проявление может быть полностью устранено за счет реализации технических решений и организационных мероприятий.

Отбор ОСП был разбит на два уровня – первичный и более детальный.

В рамках первичного отбора из рассмотрения были исключены такие ОСП, которые не имеют отношения к рассматриваемому ПГЗ ЖРО в силу:

- его географического положения, а также условий и характеристик района и площадки его размещения, таких как вулканическая и магматическая активность, соляной диапиризм и др.
- технологических особенностей процесса захоронения РАО и характеристик (состава) захораниваемых РАО, таких как упаковка РАО и засыпка, возможность извлечения РАО, материалы контейнеров и их характеристики и др.

Второй уровень отбора был ориентирован на рассмотрение тех ОСП, которые могут быть исключены из детального изучения в силу крайне малой вероятности их проявления или незначительного влияния на безопасность системы захоронения РАО.

Дополнительно в процессе реализации алгоритма отбора ОСП наряду с исключениями некоторых факторов был выявлен факт возможности и целесообразности объединения ряда ОСП, так как они характеризуются одними и теми же явлениями или могут вызвать одинаковые (схожие) последствия.

ОСП, важные с точки зрения влияния на долговременную безопасность системы захоронения РАО, использовали при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО. При этом разрабатывался сценарий нормальной эволюции, отражающий наиболее вероятную (естественную) эволюцию системы захоронения РАО, и набор альтернативных сценариев, учитывающих события маловероятные, но способные оказать существенное влияние на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

В соответствии с международной практикой при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО исследуемого объекта учитывали также и маловероятные ОСП. При отсутствии количественных данных о вероятности наступления событий, оказывающих влияние на ПГЗ ЖРО, выполняли качественную оценку возможного негативного воздействия ОСП на систему захоронения РАО.

В сценариях нормальной эволюции системы захоронения РАО учитывали наиболее вероятные события и процессы, происходящие в ПГЗ ЖРО, а также постепенное снижение защитных, прочностных и изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО со временем. В альтернативных сценариях эволюции системы захоронения РАО учитывали ОСП, имеющие малую вероятность реализации и связанные со значительными неопределенностями будущей эволюции района размещения ПГЗ ЖРО.

В результате проведенного анализа был обоснован перечень ОСП, влияющих на долговременную безопасность системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железнодорожский». Выборка из распределений ОСП, учитываемых в сценариях эволюции системы захоронения РАО рассматриваемого ПГЗ ЖРО, приведена в таблице.

Так как особенную ценность для прогнозирования событий и процессов, важных для экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, представляют сведения о событиях и процессах, которые имели место при ликвидации некоторых скважин в процессе эксплуатации ПГЗ ЖРО, – в рамках проведенного анализа были систематизированы сведения о технологических решениях по ликвидации эксплуатационных скважин на различных ПГЗ ЖРО, включая «Железнодорожский».

Анализ технологических решений показал, что потенциальную опасность для обеспечения долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО может представлять образование путей миграции радионуклидов (п.10 в таблице) в результате ухудшения изолирующих свойств тампонажного материала и, как следствие, возникающего заколонного перетока по стволу скважины пластовых вод, содержащих компоненты РАО (далее – заколонный переток компонентов РАО).

Распределение ОСП, учитываемых в сценариях эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский»

№ п/п	Особенности, события, процессы	№ ОСП	Распределение ОСП по сценариям эволюции	
			Нормальный	Альтернативные
1	Динамика захоронения ЖРО	1.1.06	Н	
2	Метасоматоз	1.2.05	Н	
3	Гидрологическая/гидрогеологическая реакция на геологические изменения	1.2.10	Н	
4	Глобальное изменение климата	1.3.01	Н	
5	Региональное изменение климата (района размещения ПГЗ ЖРО)	1.3.02	Н	
6	Гидрогеологическая реакция на климатические изменения	1.3.07	Н	
7	Вторжение человека в систему захоронения РАО (бурение скважин)	1.4.04		А
8	Химический и радионуклидный состав ЖРО	2.1.01	Н	
9	Критерии приемлемости ЖРО для захоронения в ПГЗ ЖРО	2.1.01	Н	
10	Разрушение цементного камня, возникновение вертикальных перетоков компонентов РАО по стволам скважин	2.1.06	Н	
11	Коррозия и разгерметизация обсадных труб эксплуатационных скважин	2.1.09	Н	
12	Радиационные эффекты в системе захоронения РАО	2.1.13	Н	
13	Характеристики эксплуатационных и буферного горизонтов	2.2.02	Н	
14	Характеристики водоупорных горизонтов	2.2.03	Н	
15	Активизация тектонического нарушения (Правобережного разлома)	2.2.04		А
.....				
44	Влияние микробиологических процессов на изменение химического состава захороненных ЖРО	3.2.06	Н	
45	Конвективный перенос	3.2.07	Н	
46	Гидродисперсия	3.2.07	Н	
47	Молекулярная диффузия	3.2.07	Н	
48	Перенос взвешенных частиц	3.2.07	Н	
49	Наличие быстрых путей вертикальной миграции компонентов РАО (вертикальных перетоков)	3.2.07		А
50	Наличие быстрых путей латеральной миграции компонентов РАО (высокопроницаемых зон)	3.2.07		А
51	Миграция компонентов РАО с микробиологическими объектами	3.2.11	Н	

В связи с этим были конкретизированы поставленные при выполнении диссертации задачи обоснования устойчивости инженерных барьеров безопасности и моделирования критических сценариев нарушения их изолирующих свойств, а именно:

- определение способа диагностирования возникновения заколонных перетоков компонентов РАО по стволу скважины;
- моделирование распространения радионуклидов при возникновении заколонных перетоков компонентов РАО по стволу скважин;

– исследование физико-механических характеристик тампонажных материалов, устойчивых на период потенциальной опасности РАО.

В Главе 3 приведены результаты диагностики и моделирования заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» – процессов, представляющих основную опасность для долговременной безопасности системы захоронения РАО закрытого ПГЗ ЖРО, а также по определению состава тампонажных материалов, обладающих изолирующими свойствами, приемлемыми для обеспечения долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности на период потенциальной опасности захороненных РАО.

С целью определения способа диагностики, приемлемого для обнаружения заколонного перетока компонентов РАО по стволу скважины, была осуществлена оценка технического состояния скважины Н-10 с признаками нарушения изолирующих свойств инженерного барьера (превышение фоновых значений интенсивности гамма-излучения и температуры в 20-метровом интервале над кровлей эксплуатационного горизонта). Контроль осуществляли методами гамма-каротажа, термометрии, акустической цементометрии.

На основании результатов проведенных измерений было установлено, что причинами возникновения каналов являются интервалы разрушенного и отсутствующего цементного камня, а также плохое качество его сцепления с горной породой и обсадными трубами, а наибольшему риску образования каналов подвержен контакт «обсадная колонна – цементный камень – горные породы». Целостность труб эксплуатационной колонны была подтверждена стабильным давлением при пневматических опрессовках.

Наличие интервала разрушенного цементного камня в заколонном пространстве, ухудшение сцепления цемента с трубами и породой определяли по результатам акустической цементометрии.

По результатам измерений было выявлено наличие гамма- и термоаномалий над кровлей эксплуатационного горизонта (рис. 2).

На основании полученных опытных данных для оценки последствий воздействия заколонного перетока компонентов РАО по стволам скважин диссертантом в составе коллектива авторов была разработана математическая сеточная модель.

В модели реализован нестационарный режим трехмерного по структуре потока подземных вод. При этом воспроизводилась основная особенность гидрогеологических условий – напор подземных вод во II эксплуатационном горизонте ниже, чем в вышележащем буферном; учтены процессы инфильтрационного питания и испарения подземных вод. Граничные и начальные условия модельного геофильтрационного потока на участке устанавливались по результатам анализа гидродинамической структуры потоков подземных вод различных водоносных горизонтов.

Для расчетов с использованием данной модели применяли программы MODFLOW и MT3DMS, входящие в состав программного комплекса Processing Modflow.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило сделать вывод о том, что модель адекватно описывает динамику изменения границы

области миграции компонентов РАО в вертикальном направлении по законному пространству нагнетательной скважины Н-10 (рис. 3).

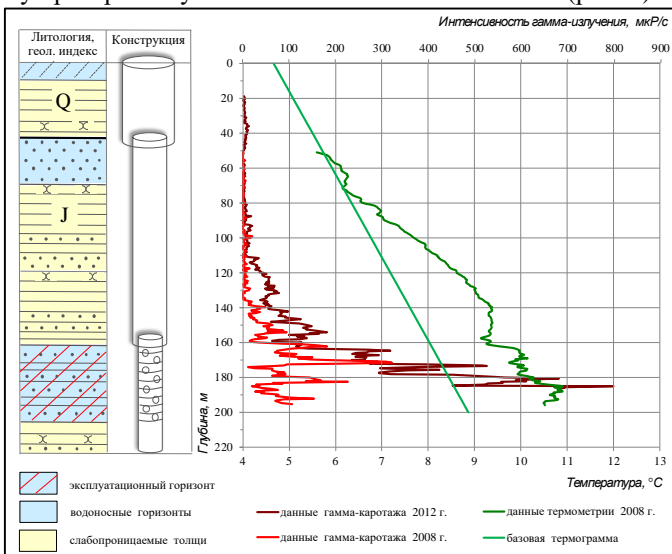


Рис. 2. Признаки законного восходящего перетекания компонентов РАО по стволу скважины Н-10 по данным мониторинга

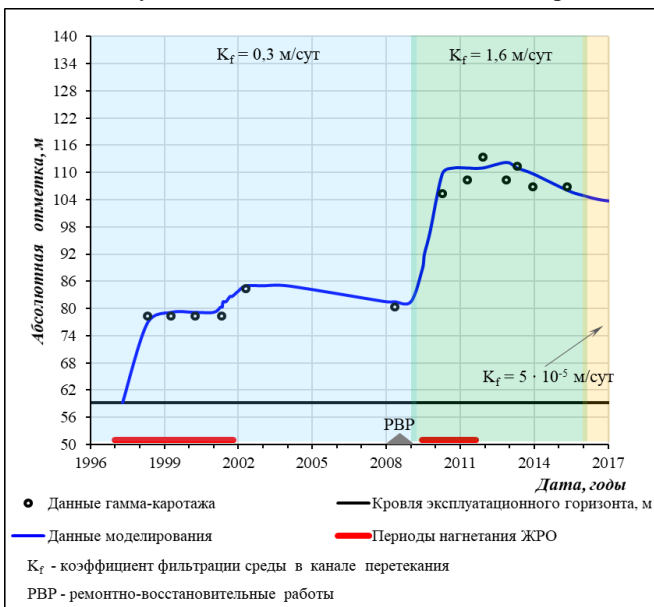


Рис. 3. Изменение дальности вертикальной миграции компонентов РАО по стволу скважины Н-10 во времени по данным мониторинга и моделирования

Согласно результатам проведенных расчетов, максимальная дальность вертикальной миграции компонентов РАО с относительной концентрацией 10^{-4} достигалась через 15 лет после начала перетекания компонентов РАО и составляла 56 м от кровли эксплуатационного горизонта. При этом средняя скорость перетекания вверх по каналу составляла 4 м/год.

Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований заколонных перетоков компонентов РАО на ПГЗ ЖРО «Железногорский» позволили сделать следующие практические выводы:

- заколонные перетоки компонентов РАО развиваются в основном в скважинах, которые используются как нагнетательные: непосредственно над их фильтром и кровлей эксплуатационного горизонта. Перетоки происходят по интервалам разрушенного и отсутствующего цементного камня и участкам с низким качеством его сцепления с горной породой и обсадными трубами, т. е. по каналам повышенной проницаемости и пустотности, протяженность которых может увеличиваться во времени снизу вверх по стволу скважины;

- причины ухудшения герметичности скважин и образования каналов перетоков в их заколонном пространстве обусловлены, главным образом, техногенными ОСП при эксплуатации ПГЗ ЖРО, такими как проявление скрытых дефектов, коррозия и старение обсадных труб;

- процесс заколонного перетока имеет восходящий характер и происходит преимущественно в периоды нагнетания ЖРО. В перерывах нагнетания переток существенно замедляется, прекращается и может стать нисходящим. При этом геологическая среда препятствует восходящему движению компонентов РАО по стволам скважин, проявляя одновременно вмещающие и изолирующие свойства;

- количество компонентов РАО, которое может поступить в горизонты, залегающие выше эксплуатируемого, в результате заколонного перетекания по одной нагнетательной скважине за многолетний период несоизмеримо меньше общего объема ЖРО, размещенных в системе захоронения РАО, и оценивается порядком десятков и первых сотен кубических метров;

- в постэксплуатационный 300-летний период наибольшая дальность миграции компонентов РАО в плане в горизонтах, залегающих выше эксплуатационного, в разных условиях варьируется от десятков до первых сотен метров;

- последствия заколонного перетока подземных вод и компонентов РАО по стволам скважин имеют локальный пространственно-временной масштаб и ограничены буферным горизонтом или флюидоупором, перекрывающим эксплуатационный горизонт, в пределах горного отвода недр;

- способы предотвращения образования каналов и развития в них заколонных перетоков компонентов РАО должны быть направлены на совершенствование тампонажных цементов и методов цементирования скважин. Требуется проведение следующих мероприятий:

- разработка технических решений по усилению конструкции скважин над их фильтром;
- корректировка технологического режима захоронения ЖРО с целью минимизации техногенного воздействия на скважину в период ее эксплуатации;
- создание локальных превентивных гидроизоляционных завес.

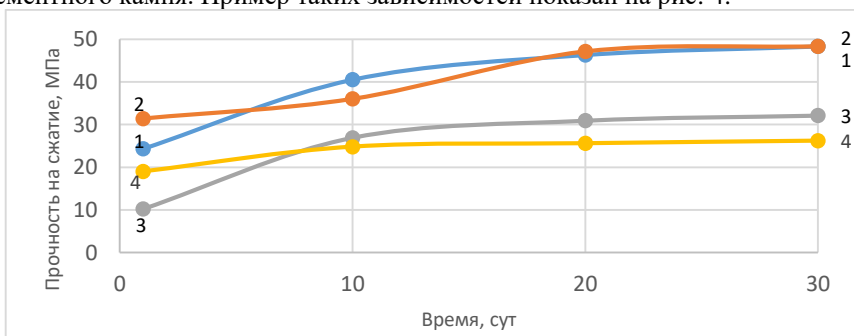
Нагнетательные скважины требуют применения повышенных мер обеспечения безопасности, так как подвержены наибольшему риску развития заколонных перетоков.

В связи с тем, что ключевую роль для предотвращения заколонных перетоков компонентов РАО играет эффективность инженерного барьера безопасности (заколонного тампонажного камня), была проведена оценка характеристик тампонажных материалов, представляющих интерес для ликвидации скважин. В качестве факторов, воздействующих на показатели изолирующих свойств тампонажных материалов, рассматривали: их состав, химический состав водных сред (подземные воды и модельный раствор РАО), температуру водных сред, содержащих тепловыделяющие РАО.

При проведении исследования оценивали влияние данных факторов на характеристики, определяющие защитные и изолирующие свойства инженерного барьера безопасности: прочность, плотность, водонепроницаемость.

В качестве тампонажных материалов использовали портландцемент тампонажный и его смесь с 10 % бентонита; в качестве водных сред: подземную воду эксплуатационных горизонтов в районе ПГЗ ЖРО «Железнодорожный» и модельный раствор захораниваемых ЖРО. Измерение значений характеристик тампонажных материалов, контактирующих с водными средами в течение 1–30 суток осуществлялось с использованием стандартных методов на поверенных приборах.

На основании результатов проведенных исследований были получены зависимости изменения значений определяемых характеристик от времени контакта образцов тампонажных материалов с водными средами и температурных условий их контакта на начальных этапах затвердевания цементного камня. Пример таких зависимостей показан на рис. 4.



1 – портландцемент (температура выдержки 20 °С); 2 – портландцемент (температура выдержки 60 °С); 3 – цементно-бентонитовая смесь в соотношении 90 : 10 % (температура выдержки 20 °С); 4 – цементно-бентонитовая смесь в соотношении 90 : 10 % (температура выдержки 60 °С)

Рис. 4. Зависимости изменения предела прочности на сжатие от времени твердения для образцов тампонажных материалов, контактирующих с подземной водой

Полученные результаты показали достаточную эффективность исследованных материалов инженерных барьеров безопасности (коэффициенты фильтрации для них составляли $(4,4-4,9) \cdot 10^{-9}$ м/сут)

применительно к их использованию для предотвращения возникновения заколонных перетоков компонентов РАО по стволам ликвидируемых скважин исследуемого ПГЗ ЖРО, при этом отмечена стабилизация значений физико-механических характеристик и защитных свойств по достижении 30 суток выдержки в водных средах.

В Главе 4 представлены (с учетом разработанной системы ОСП ПГЗ ЖРО «Железнодорожский» и результатов расчетно-экспериментальных исследований по обоснованию его безопасности) концептуальные положения по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО, в том числе основные концептуальные положения по:

- применению дифференцированного подхода к закрытию конкретного ПГЗ ЖРО;
- системе организационно-технических мер, необходимых для безопасного закрытия ПГЗ ЖРО;
- долговременному мониторингу системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

Сформулированные концептуальные положения были использованы при:

- разработке требований по обеспечению безопасности ПЗРО, установленных в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) и подготовке рекомендаций по выполнению оценки долговременной безопасности ПЗРО и обоснованию безопасности ПГЗ ЖРО, приведенных в руководствах по безопасности при использовании атомной энергии «Состав и содержание отчета по обоснованию безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» (РБ-139-17), «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21);
- разработке системы организационно-технических мер при закрытии ПГЗ ЖРО.

В соответствии с разработанной системой организационно-технических мер, представленной в виде схемы на рис. 5, безопасное закрытие ПГЗ ЖРО обеспечивается выполнением следующих решений:

- применением технических решений по безопасной ликвидации (тампонировании) эксплуатационных скважин, разработанных с учетом текущего технического состояния самой скважины, эволюционного состояния эксплуатационного горизонта, содержащего компоненты РАО, и вышележащих (водоупорных, буферного) горизонтов на участках размещения скважин;
- предусмотрением возможности дальнейшего безопасного использования наблюдательных скважин для целей мониторинга за состоянием системы захоронения РАО;
- ликвидацией скважин, в которые осуществлялось нагнетание высокоактивных ЖРО (на ранних этапах развития атомной промышленности), после установления стабильного температурного режима в эксплуатационном горизонте на участках их расположения;
- дезактивацией демонтируемых (перепрофилируемых) зданий, сооружений, строительных конструкций, систем и оборудования, в том числе

емкостей и трубопроводов, использовавшихся для приема, временного хранения, транспортирования и захоронения ЖРО;

- выводом из эксплуатации объектов (зданий, сооружений, емкостей, трубопроводов, оборудования и др.) наземной инфраструктуры за исключением объектов, необходимых для проведения мониторинга системы захоронения РАО и обеспечения системы физической защиты закрытого ПГЗ ЖРО;

- рекультивацией территории размещения поверхностных объектов ПГЗ ЖРО;

- проведением после завершения каждого этапа закрытия ПГЗ ЖРО анализа результатов выполненных работ, дополнительного обследования ПГЗ ЖРО в объеме, необходимом для своевременной корректировки проектной документации, и принятием необходимых мер по безопасному выполнению работ на последующем этапе закрытия ПГЗ ЖРО;

- проведением при закрытии ПГЗ ЖРО мониторинга системы захоронения РАО, направленного на наблюдение за поведением компонентов РАО;

- проведением контроля радиационной обстановки на площадке размещения ПГЗ ЖРО после закрытия, организацией и проведением радиационного контроля персонала, задействованного при мониторинге;

- выполнением НИОКР на этапах закрытия ПГЗ ЖРО, включающих:

- анализ изменения топографических, гидрометеорологических, климатических, демографических, гидрологических, гидрогеологических, инженерно-геологических, геолого-тектонических, геодинамических, геологических, сейсмотектонических и сейсмических условий района и площадки размещения ПГЗ ЖРО;

- оценку эффективности и достаточности существующих и создаваемых инженерных барьеров безопасности для обеспечения надежной изоляции компонентов РАО;

- прогнозные расчеты для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО с учетом возможных путей и особенностей миграции радионуклидов в окружающую среду и уточнение периода потенциальной опасности захороненных РАО;

- определение значений ожидаемых доз облучения критической группы лиц из числа населения на различных этапах закрытия ПГЗ ЖРО;

- уточнение и пересмотр критериев, характеризующих конечное состояние ПГЗ ЖРО после его закрытия;

- отработку технологии ликвидации скважин и подбор тампонажных материалов для их ликвидации;

- проведением всех работ по закрытию ПГЗ ЖРО в соответствии с программой обеспечения качества;

- подтверждением достижения установленного в проекте закрытия ПГЗ ЖРО его конечного состояния результатами заключительного обследования закрытого ПГЗ ЖРО и оформления необходимой документации на закрытый ПГЗ ЖРО в соответствии с действующими нормативными документами.

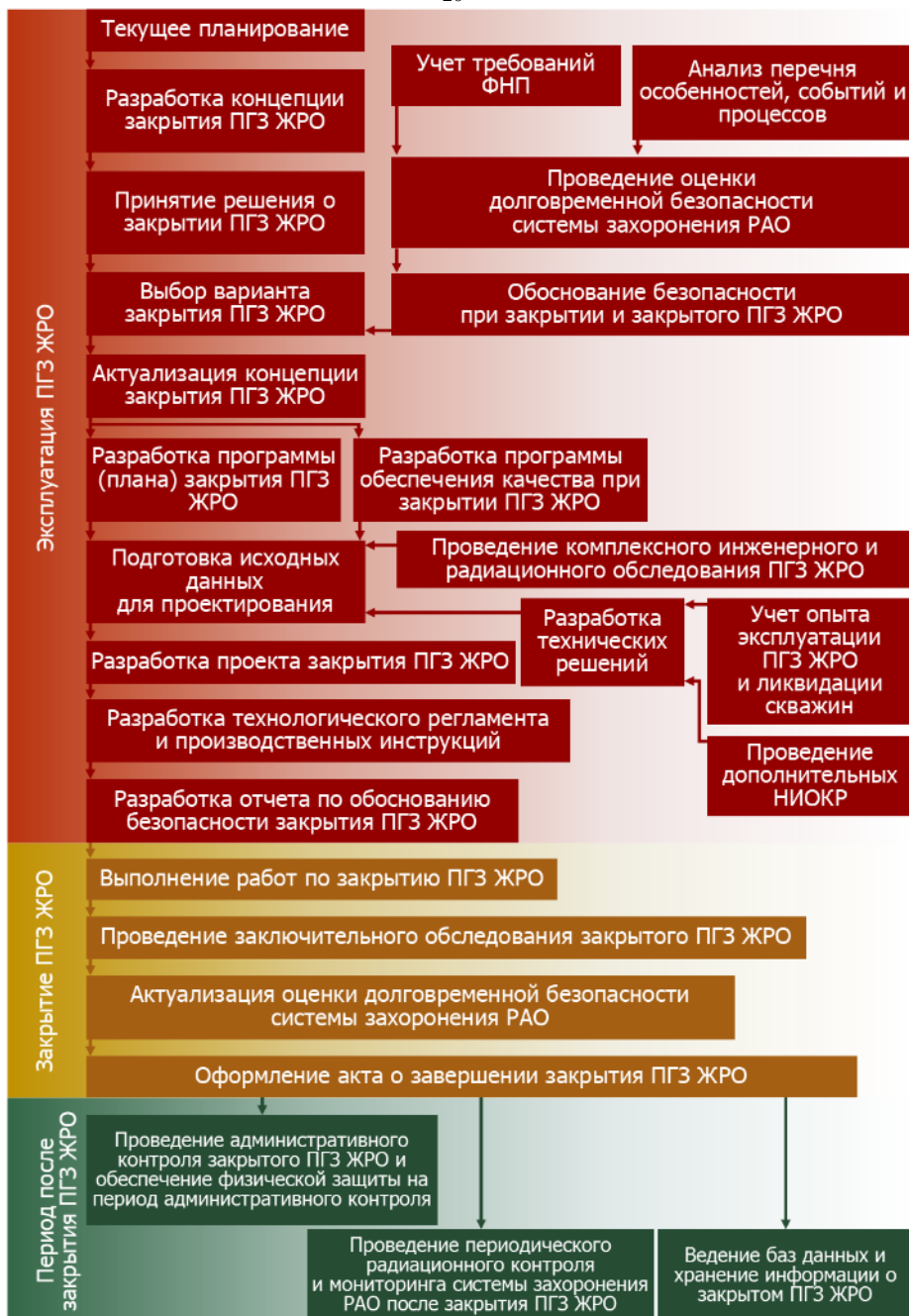


Рис. 5. Общая схема этапов закрытия ПГЗ ЖРО

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В результате выполнения диссертационной работы:

– в соответствии с разработанным алгоритмом отбора особенностей, событий и процессов, важных для обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО выполнен анализ более 150 факторов и с учетом природно-технологической специфики ПГЗ ЖРО «Железногорский» определен перечень из 51 фактора, которые индивидуально или в сочетании с другими являются значимыми для долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО. Разработана система распределения отобранных факторов по сценариям нормальной и альтернативной эволюции системы захоронения РАО исследуемого объекта;

– апробированный в рамках диссертационного исследования алгоритм отбора особенностей, событий и процессов и распределения их по сценариям эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский» может быть применим для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Димитровградский»;

– анализ особенностей, событий и процессов показал, что наибольшую потенциальную опасность для обеспечения долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО может представлять образование путей миграции радионуклидов в результате ухудшения изолирующих свойств тампонажного материала и, как следствие, возникающего заколонного перетока по стволу скважины пластовых вод, содержащих компоненты РАО. В связи с этим разработана модель заколонных перетоков применительно к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, с использованием которой определены границы и скорости возможного распространения компонентов РАО при заколонных перетоках по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» после его закрытия;

– определено, что для предотвращения возможных заколонных перетоков из системы захоронения РАО при ликвидации эксплуатационных скважин необходимо использовать тампонажные материалы, обладающие высокими гидроизоляционными свойствами и обеспечивающие долговременную устойчивость инженерного барьера безопасности на период потенциальной опасности захороненных РАО;

– исследованы физико-механические свойства тампонажных материалов (на основе портландцемента с добавкой бентонита), приемлемых для обеспечения долговременной безопасности системы захоронения РАО, определена начальная эволюция показателей их изолирующих свойств (пределов прочности, плотности, водонепроницаемости) применительно к условиям захоронения РАО на ПГЗ ЖРО «Железногорский» (температуры, состава подземной воды и модельного раствора ЖРО);

– с учетом предложенной системы особенностей, событий и процессов, свойственных ПГЗ ЖРО «Железногорский», а также результатов расчетно-экспериментальных исследований последствий заколонных перетоков и оценки устойчивости инженерных барьеров безопасности разработаны концептуальные положения к обоснованию решений по закрытию ПГЗ ЖРО и система организационно-технических мер для обеспечения поэтапного безопасного закрытия ПГЗ ЖРО.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сафонов А. В., Косарева И. М., Ершов Б. Г., Ревенко Ю. А., Позизов А. В. и др. Экологические аспекты локализации жидких радиоактивных отходов в глубинном хранилище «Северный» // Атомная энергия. 2011. Т. 111. № 2. С. 100–104.

2. Савельева Е. А., Сускин В. В., Позизов А. В. и др. Моделирование литологической неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 21–26.

3. Верещагин П. М., Позизов А. В., Рыбальченко А. И. и др. Идеология, практические и научные результаты 50-летнего опыта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов и нерадиоактивных промстоков предприятий атомной промышленности // Вестник РАН. 2017. Т. 1. № 2. С. 12–23.

4. Позизов А. В., Трофимова Ю. В. Основные геологические факторы, обеспечивающие долговременную безопасность пунктов захоронения радиоактивных отходов. В сборнике: V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти академика А. П. Карпинского. Сборник тезисов. – ФГУП «ВСЕГЕИ», г. Санкт-Петербург, 28 февраля – 3 марта 2017. – 2017. – С. 905–906.

5. Дорофеев А. Н., Савельева Е. А., Позизов А. В. и др. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО // Радиоактивные отходы. 2017. № 1. С. 54–63.

6. Позизов А. В., Ушанова О. Н. Нормативно-правовое регулирование обращения с радиоактивными отходами. В сборнике: IX Российская конференция с международным участием «Радиохимия 2018». – Госкорпорация «Росатом». Сборник тезисов. – г. Санкт-Петербург, 17–21 сентября 2018. – 2018. – С. 440.

7. Сафонов А. В., Захарова Е. В., Позизов А. В. и др. Российский опыт микробиологических исследований подземных вод в зоне глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 39–49.

8. Dariya Boldyreva, Anton Ponizov, Maksim Felitsyn, Aleksandr Vasilishin. The results of the forecast of climate evolution scenarios to be taken into account when assessing the long-term safety of the deep disposal facilities for liquid radioactive waste in the Russian Federation. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, September 10–13, 2018. – P. 805.

9. Chulkov N. V., Ponizov A. V., Vereshchagin P. M. Hydrogeological modeling as method to safety case of liquid radioactive waste management. Fundamental basis for advanced treatment of radioactive wastes. Proceedings and selected lectures of the 2d International school – seminar 2018. Editors: K. E. German, A. V. Safonov, Moscow, September 28 – October 02, 2018. – Pp. 366–367.

10. Anton Ponizov, Dariya Boldyreva. Requirements for safe closure of the deep disposal facilities for liquid radioactive waste in Russian Federation. – Current Understanding and Future Direction for the Geological Disposal of Radioactive Waste. P26 IGSC Safety Case Symposium 2018 Book of Abstracts, Rotterdam, Netherlands, October 10–11, 2018. – P. 119.

11. Шарифутдинов Р. Б., Понизов А. В., Мурлис Д. В. и др. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2018. № 4 (90). С. 20–33.

12. Понизов А. В., Верещагин П. М., Байдарико Е. А. и др. Условия, последствия и пути предотвращения заколонных перетоков жидкостей по стволам скважин на участках глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2019. № 2. С. 56–67.

13. Болдырева Д. А., Василишин А. Л., Понизов А. В. и др. Оценка климатической эволюции в районах размещения пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов для обоснования долговременной безопасности // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2019. № 3 (93). С. 36–46.

14. Маркова Ю. В., Понизов А. В., Чулков Н. В. Концептуальные положения долговременного мониторинга пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов после закрытия. В сборнике: Международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (23–26 сентября 2019 г.) / под ред. Л. И. Лукиной, Н. В. Ляминой. Сборник статей. – Севастополь: СевГУ, 2019 – С. 989–992.

15. Сускин В. В., Уткин С. С., Понизов А. В. и др. Применение эмпирического и расчетного методов при оценке возможных нарушений нормальной эксплуатации на объектах захоронения жидких РАО // *Радиоактивные отходы*. 2020. № 1 (10). С. 22–34.

16. Понизов А. В. Система организационно-технических мер по обеспечению безопасного закрытия пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. Концептуальные положения // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2020. № 4 (98). С. 47–60.

17. Понизов А. В., Пустовгар А. П., Дорофеев А. Н., и др. Исследование характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Железногорский» // *Радиоактивные отходы*. 2021. № 2 (15). С. 63–72.

18. Понизов А. В., Лебедин К. А., Верещагин П. М. Совершенствование подходов к оценке долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов. В сборнике: Материалы VI Международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (20–24 сентября 2021 г.). – Томск: Томский политехнический университет, 2021. – С. 479–480.

Понизов Антон Владимирович

Комплексный подход к обоснованию решений по закрытию пунктов
глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 18.04.2022 г.
Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 1,05. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary.
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66