

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ПОНИЗОВ АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ



**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ РЕШЕНИЙ ПО  
ЗАКРЫТИЮ ПУНКТОВ ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ ЖИДКИХ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

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

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д.т.н. С. С. Уткин

Москва, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Глава 1. Состояние проблем глубинного захоронения РАО на ПГЗ ЖРО «Железногорский» .....	13
1.1 Исходные подходы к обеспечению безопасности при создании системы глубинного захоронения ЖРО.....	13
1.2 Краткая характеристика геологической среды района размещения рассматриваемого объекта .....	20
1.3 Краткая характеристика инженерно-технических сооружений .....	32
1.4 Краткая характеристика захораниваемых ЖРО .....	41
1.5 Опыт прогнозирования последствий захоронения РАО на ПГЗ ЖРО ....	44
1.6 Подход МАГАТЭ к обоснованию долговременной экологической приемлемости захоронения РАО .....	45
1.7 Краткие выводы к главе 1 .....	50
Глава 2. Разработка системы особенностей, событий и процессов, важных для обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО..	53
2.1 Методический подход к разработке алгоритма определения факторов (ОСП), важных для долговременной безопасности системы захоронения РАО .....	53
2.2 Определение перечня событий и процессов, важных для обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО .....	58
2.3 Анализ технологических решений по ликвидации скважин на ПГЗ ЖРО.....	89
2.4 Краткие выводы к главе 2.....	95
Глава 3. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов, важных для долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский» .....	97
3.1 Анализ особенностей заколонных перетоков по стволам скважин ПГЗ ЖРО.....	98
3.2 Определение основных параметров расчетной модели заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин.....	104
3.3 Результаты расчетов характеристик заколонных перетоков компонентов РАО .....	109
3.4 Определение физико-механических характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин ПГЗ ЖРО .....	117
3.5 Краткие выводы к главе 3 .....	133
Глава 4. Разработка и применение концептуальных положений по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО .....	136
4.1 Основные концептуальные положения о системе организационно-технических мер, необходимых для безопасного закрытия ПГЗ ЖРО .	138
4.2 Основные концептуальные положения по долговременному мониторингу системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО ....	143

4.3	Практическое применение разработанных концептуальных положений по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО .....	149
4.4	Краткие выводы к главе 4 .....	150
	Заключение.....	152
	Список сокращений и условных обозначений .....	155
	Список литературы.....	157

## ВВЕДЕНИЕ

### **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 глубокозалегающие 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 [1].

ПГЗ ЖРО является объектом использования атомной энергии (далее – ОИАЭ), 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 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 аргументировано 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 «Железногорский» 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. м<sup>3</sup>).

#### **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 «Железногорский» с учетом его особенностей.

2) Зависимости изменения высоты вертикальной миграции компонентов РАО во времени для ликвидируемых скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский», 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 (далее – ФНП) и руководств по безопасности при использовании атомной энергии (далее – РБ).

### **Апробация работы и публикации**

Материалы диссертации докладывались на 13 российских и международных конференциях и семинарах, совместном заседании научно-технического совета Госкорпорации «Росатом» № 10 «Экология и радиационная безопасность» и № 5 «Завершающая стадия ядерного топливного цикла».

### **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, списка литературы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста и содержит 31 рисунок, 8 таблиц. Библиография содержит 114 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает благодарность и признательность своему научному руководителю д.т.н. С. С. Уткину, заведующему отделением ИБРАЭ РАН, а также заместителю директора ИБРАЭ РАН д.т.н. И. И. Линге за помощь и постоянную поддержку при подготовке диссертационной работы.

Автор благодарит коллег, без которых эта работа состоялась бы существенно позже: к.б.н. А. Е. Щадилова за рекомендации и предложения по выполнению работы; д.х.н. И. П. Соколова, к.т.н. П. М. Верещагина, к.х.н. А. В. Родина, А. Л. Василишина и Д. В. Мурлиса за помощь при подготовке настоящей работы. Отдельно автор благодарит К. А. Лебедкина за помощь при подготовке геологической информации по площадке и району размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Автор благодарит за ценные рекомендации трудовой коллектив филиала «Железногорский» ФГУП «НО РАО», в особенности С. В. Кирика, А. И. Лозового и Е. С. Дорожко за консультации по ряду вопросов, связанных с ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Особенная благодарность от автора основоположникам глубинного захоронения ЖРО, без помощи которых данная работа не состоялась бы: к.г.-м.н. А. И. Рыбальченко (ВНИПИпромтехнологии), к.х.н. Е. В. Захаровой (ИФХЭ РАН), к.г.-м.н. А. А. Зубкову (АО «СХК»), Р. Р. Хафизову (ООО «Геолком»), а также Е. А. Байдарико.

Отдельно автор хочет поблагодарить руководство ФБУ «НТЦ ЯРБ» в лице к.т.н. А. А. Хамазы и к.т.н. Р. Б. Шарафутдинова за поддержку и помощь при написании работы.

## **Глава 1. Состояние проблем глубинного захоронения РАО на ПГЗ ЖРО «Железногорский»**

### **1.1 Исходные подходы к обеспечению безопасности при создании системы глубинного захоронения ЖРО**

Проблема, связанная с необходимостью изоляции больших объемов ЖРО, возникла в СССР в середине 1950-х годов и до настоящего времени остается актуальной для Российской Федерации.

Основные этапы и особенности создания системы глубинного захоронения ЖРО в нашей стране изложены в [2]. Применительно к задачам данного диссертационного исследования можно выделить следующие аспекты обоснования требований, которые были сформулированы в части обеспечения безопасности.

В основу создания системы глубинного захоронения ЖРО был положен положительный опыт осуществления разработки полезных ископаемых, добычи углеводородов, а также урана методом скважинного выщелачивания. Накопленные при этом геологические знания показали принципиальную возможность и техническую осуществимость размещения ЖРО в горных породах в глубоко залегающих водоносных горизонтах.

В пользу такого подхода свидетельствовали [2]: изолированность глубоких водоносных горизонтов и комплексов от земной поверхности; зональность подземных вод и низкая интенсивность массопереноса; пористость и трещиноватость горных пород, благодаря которым они вмещают подземные воды, нефть и газ; сохранение нефтегазовых залежей в течение миллионов лет; образование и сохранение месторождений полезных ископаемых, в том числе урана; наличие стабильных (платформенных) участков земной коры и труднодоступность глубокозалегающих формаций для преднамеренного и случайного проникновения человека.

Для проведения необходимых работ, с точки зрения обоснования возможности безопасного глубинного захоронения ЖРО, в 1957 г. в ГОСНИПИ-14 (ВНИПИпромтехнологии) была создана научно-исследовательская лаборатория № 5 [2]. Одновременно к работам были привлечены организации Академии наук, Министерства геологии и других ведомств, в том числе Министерства среднего машиностроения [3].

Уже в 1958 г. были сформулированы следующие основные положения о возможности глубинного захоронения ЖРО [2], которые можно отнести к исходной концепции безопасности ПГЗ ЖРО:

- 1) захоронение ЖРО может быть осуществлено только в определенных геологических условиях, удовлетворяющих ряду требований;
- 2) осуществлению захоронения должно предшествовать изучение геологической среды и ЖРО; объем полученных научных данных должен обеспечивать достаточно надежное прогнозирование последствий захоронения ЖРО;
- 3) захораниваемые ЖРО должны быть совместимы с геологической средой;
- 4) процесс захоронения ЖРО и протекающие в недрах процессы должны контролироваться, режимы нагнетания ЖРО должны в минимально возможной степени изменять естественные условия геологических формаций.

На основании этого Правительством СССР в 1958 г. было принято решение о проведении геологоразведочных работ и других исследований на Сибирском химическом комбинате (Томская область), Горно-химическом комбинате (Красноярский край), Производственном объединении «Маяк» (Челябинская область) и Научно-исследовательском институте атомных реакторов (Ульяновская область).

Геологоразведочные работы проводила специализированная организация Министерства геологии – Всесоюзный гидрогеологический трест (Гидроспецгеология). Институтом физической химии Академии наук СССР (ИФХЭ РАН) был выполнен большой объем научно-исследовательских работ по определению физико-химических свойств ЖРО, оценке их совместимости с горными породами и подземными водами, определению сорбционных характеристик пород по отношению к основным радионуклидам, содержащимся в ЖРО. Приоритетной задачей было обеспечение радиационной безопасности захоронения ЖРО. Для ее решения были выполнены оценки возможного влияния захоронения ЖРО на человека и окружающую среду, прогнозные оценки последствий захоронения, определены гигиенические условия использования земель и недр в местах возможного захоронения. Эти работы осуществлялись Институтом биофизики Министерства здравоохранения СССР [4].

На основании выполненных работ в отношении выбора геологических условий, пригодных для захоронения ЖРО, были сформулированы основополагающие принципы безопасности [2, 5, 6]:

1) изолированность выбранного для захоронения ЖРО геологического образования от земной поверхности и неглубоко залегающих подземных вод, использование которых может быть перспективным для целей водоснабжения, орошения или иных целей (минеральные, бальнеологические воды). Изолированность выбранного водоносного горизонта (водоносного комплекса) обеспечивается наличием перекрывающей толщей слабопроницаемых горных пород, характеризующейся отсутствием в ней литологических окон и проницаемых зон тектонических нарушений в области влияния захоронения ЖРО;

2) достаточность емкостных свойств пласта-коллектора, используемого как эксплуатационный горизонт для нагнетания ЖРО;

3) наличие буферного горизонта, расположенного выше эксплуатационного, и обладающего свойствами, сходными со свойствами эксплуатационного горизонта и предназначенного для дополнительного обеспечения изолированности. Буферный горизонт играет роль резервной емкости на пути возможных перетоков (вертикальной миграции) компонентов РАО по направлению к земной поверхности, то есть является дополнительным барьером безопасности;

4) малоподвижность подземных вод (захоронение ЖРО в зоне затрудненного водообмена подземных вод);

5) удаленность зоны разгрузки подземных вод эксплуатационного горизонта от области влияния захоронения ЖРО;

6) неперспективность участка недр захоронения ЖРО для разработки местных месторождений полезных ископаемых.

Помимо приведенных выше принципов, связанных в основном с удержанием и изоляцией захороненных ЖРО, как важное свойство геологической среды рассматривалась фильтрационная однородность (однородность свойств и характеристик) выбранного для захоронения ЖРО водоносного горизонта. Это свойство обеспечивает возможность формализации результатов геологоразведочных работ в виде достоверной геологической и геомиграционной

модели, что, в свою очередь, обеспечивает возможность прогнозирования миграции компонентов РАО в геологической среде. Считалось, что это условие выполняется для песчано-глинистых осадочных образований с равномерно распределенной пористостью, в которых слабо развиты тектонические нарушения, имеющие в основном пликтивный характер. Удовлетворяют этому требованию и некоторые типы карбонатных коллекторов с двойной пористостью, в то время как характеристики скальных пород с преобладающим трещинным типом пористости или кавернозных карбонатных пород характеризуются высокой степенью неопределенности.

Важным условием безопасности ПГЗ ЖРО являлась возможность сооружения скважин достаточной надежности.

Геологоразведочные работы в районах размещения СХК и ГХК были начаты в 1958 г., а на площадке НИИАР – в 1962 г. Методика проводившихся геологоразведочных работ освещена в монографии [7]. Результаты проведения геологоразведочных работ позволили определить перспективные площадки в районе размещения основных производственных объектов выше указанных предприятий атомной промышленности.

Конкретизация площадок позволила перейти к анализу совместимости ЖРО с горными породами и подземными водами, а именно к выявлению реакций с участием компонентов РАО. Для определения оптимальных давлений нагнетания ЖРО были выполнены исследования физико-химических свойств горных пород выбранных участков [8]. С целью определения совместимости ЖРО с горными породами и подземными водами эксплуатационных горизонтов были изучены физико-химические свойства ЖРО, минералогический состав пород эксплуатационных, водоупорных и буферного горизонтов, а также химические свойства подземных вод эксплуатационных и буферного горизонтов. По результатам исследований было установлено, что для обеспечения безопасной эксплуатации ПГЗ ЖРО должны соблюдаться следующие условия [2]:

– сохранение скелета вмещающих горных пород эксплуатационного горизонта и изолирующих его водоупоров;



– минимизация кольтации (забивки) порового пространства эксплуатационного горизонта мелкодисперсными твердыми веществами (взвесями), содержащимися в захораниваемых ЖРО или образующимися при их контакте с горными породами и подземными водами, тем самым обеспечивается устойчивая (непрерывная) работа нагнетательных скважин;

– обеспечение условий для перехода компонентов РАО, и особенно радионуклидов, в твердую фазу и задержки миграции компонентов РАО пористой средой эксплуатационного горизонта;

– исключение повышенного газообразования и тепловыделения;

– обеспечение ядерной безопасности.

На основании данных, полученных в ходе выполнения натурных, лабораторных и экспериментальных исследований, а затем и опытно-промышленных работ, были сформулированы основные требования к характеристикам ЖРО, направляемых на захоронение, для каждого ПГЗ ЖРО [2]:

– регламентирование содержания в ЖРО мелкодисперсных твердых частиц (в пределах от 5 до 100 мг/л). Пределы соответствовали снижению коэффициента фильтрации растворов в два и более раз;

– ограничение на химический и микробиологический состав ЖРО для предотвращения осадкообразования вблизи скважин (кольтации), а также избежания газообразования в эксплуатационном горизонте;

– установление «пороговых» концентраций по отношению к породам эксплуатационного горизонта – только слабокислые и слабощелочные;

– ограничение по долгоживущим и наиболее энерговыделяющим радионуклидам в ЖРО для обеспечения ядерной безопасности и предотвращения повышенного разогрева горных пород и подземных вод эксплуатационного горизонта.

Эти требования соблюдались в рамках создания и реализации технологии подготовки ЖРО к подземному захоронению (отделение взвесей путем отстаивания или фильтрации, предварительная химическая обработка отходов, обработка прифилтровой зоны нагнетательных скважин и прочее).

Еще одним крупным блоком исследований были работы по определению сорбционных свойств горных пород эксплуатационных, водоупорных и буферного горизонтов [3, 7]. Данные свойства зависят от типа пород, состава и структуры порового пространства, химического состава ЖРО и форм нахождения радионуклидов в растворе. При поступлении ЖРО в эксплуатационный горизонт происходит нарушение геохимического равновесия, характерного для природного состояния процессов, приводящих к изменению кислотно-основных и окислительно-восстановительных свойств системы ( $pH$ ,  $Eh$ ), переходам компонентов РАО в твердую фазу, выщелачиванию компонентов из твердой фазы и установлению нового для пластовых условий равновесного состояния. Твердая фаза, образуемая за счет сорбции на минеральных частицах породы или в составе новообразованных фаз, формирующихся на поверхности таких частиц, может быть связана с минеральным скелетом горной породы или находиться в виде осадков на ее поверхности.

В целом было выделено четыре основных типа горных пород по условиям фильтрации и взаимодействия с компонентами РАО (Таблица 1.1) [2].

Таблица 1.1 – Типы горных пород, характеризующиеся задерживающими свойствами по отношению к компонентам РАО [2]

<b>Типы горных пород</b>	<b>Структура порового пространства и каналов фильтрации</b>	<b>Общая характеристика задерживающих свойств по отношению к радионуклидам</b>
Осадочные породы: пески, слабо сцементированные песчаники	Равномерно распределенные поры малых размеров	Высокая
Скальные магматические и метаморфические породы: граниты, порфириды, базальты, гнейсы и т. д.	Сеть сообщающихся трещин различного размера	Низкая
Осадочные скальные и скальные породы: известняки, мергели, сцементированные песчаники	Сеть трещин и более или менее равномерно распределенные поры в блоках, ограниченных трещинами	Определяется структурой фильтрационного потока, от низкой до высокой
Слабопроницаемые осадочные породы: глины, аргиллиты, алевролиты	Равномерно распределенные поры весьма малых размеров, общая пористость высокая	Очень высокая

Также была определена [2] сорбционная емкость для основных минералов, обнаруженных в породах водоносных горизонтов, планируемых для использования в качестве эксплуатационных (Таблица 1.2). В последующем допускалось, что сорбционная емкость многоминеральной смеси аддитивно складывается в соответствии с минеральным составом породы.

Таблица 1.2 – Сорбционные свойства минералов эксплуатационных горизонтов

<b>Группа минералов</b>	<b>Сорбционная емкость, мг-экв/100 г</b>
Кварц	0–0,1
Каолининовая группа	3–5
Гидрослюды	10–40
Группа монтмориллонита	150
Полевые шпаты	0,5

В лабораторных опытах были определены значения коэффициентов межфазного распределения радионуклидов на песчано-глинистых породах, слагающих эксплуатационные горизонты для различных типов ЖРО. Исследования, выполненные с реальными растворами, также продемонстрировали достаточно прочное закрепление радионуклидов на песчано-глинистых породах. А при последующей фильтрации подземной воды через образцы горной породы было определено, что в жидкую фазу переходило не более 10 % радионуклидов от зафиксированных в твердой фазе. Исследования механических свойств горных пород вмещающей природной среды были направлены на определение оптимальных режимов нагнетания ЖРО в эксплуатационные горизонты, исключая появление механических разрушений. Эксперименты проводили в лабораторных и натурных условиях. На их основе были определены максимально допустимые давления нагнетания ЖРО в скважины, а также установлены его оптимальные значения, которые были обоснованы в проектной документации и установлены в технологических (эксплуатационных) регламентах ПГЗ ЖРО.

Уже на начальной стадии исследований возможности подземного захоронения ЖРО стала понятна важность и необходимость оценки последствий захоронения ЖРО. Необходимо было определить границы области влияния захоронения на окружающую среду и человека, а также областей локализации

компонентов РАО в течение длительных периодов времени. Минимальные периоды локализации определяли из условия естественного распада радионуклидов до безопасных уровней, определявшихся в соответствии с нормативными документами, действующими на тот период времени. В зависимости от категории ЖРО и удельной активности входящих в них основных долгоживущих радионуклидов минимальный период локализации компонентов РАО в системе захоронения РАО составлял от 300 до 900 лет [9].

Прогнозные расчеты миграции компонентов РАО в геологической среде выполняли с использованием аналоговых методов (электрогидродинамических аналогий – ЭГДА-60) [10] для определения поля напоров и общепринятых аналитических методов, основанных на законе Дарси, для расчета линии токов и движения по ним компонентов РАО.

В основу модели окружающей среды (системы захоронения РАО), согласно [10, 11], легли данные геологоразведочных работ, в том числе полученные при бурении и исследованиях в скважинах, а также при опытно-фильтрационных работах. Процессы взаимодействия радионуклидов с горными породами (задержка в результате сорбционных процессов) не учитывались, что обеспечивало консервативность оценок последствий захоронения ЖРО. В результате были определены границы областей локализации компонентов РАО, которые послужили основой для определения будущих границ горного отвода недр.

## 1.2 Краткая характеристика геологической среды района размещения рассматриваемого объекта

Детальное рассмотрение ПГЗ ЖРО «Железногорский» в рамках диссертационной работы обусловлено в основном непосредственной и длительной работой соискателя на данном объекте, в том числе по тематике обеспечения безопасности его эксплуатации, реконструкции и продления срока эксплуатации. ПГЗ ЖРО «Железногорский» может быть признан в качестве референтного объекта для описания ПГЗ ЖРО. В такой роли он, в частности, выступал в ходе миссии МАГАТЭ, проведенной в 2012–2013 гг. в Российской Федерации с целью

рассмотрения процедуры оценки и обоснования безопасности практики захоронения ЖРО рекомендациям безопасности МАГАТЭ [12, 13, 14].

Основополагающим нормативным правовым актом, определяющим правовую основу и принципы регулирования отношений, возникающих при осуществлении деятельности по захоронению РАО на ПГЗ ЖРО, является Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [15] (далее – 170-ФЗ). 170-ФЗ определяет термин – объект использования атомной энергии (ОИАЭ), а также определяет какие объекты относятся к ОИАЭ. Согласно 170-ФЗ жизненный цикл ОИАЭ завершается выводом из эксплуатации (закрытием).

ПГЗ ЖРО в соответствии с 170-ФЗ [15], относится к пунктам хранения, стационарным объектам и сооружениям, не относящимся к ядерным установкам и радиационным источникам, предназначенным для захоронения РАО.

Согласно статье 3 Федерального закона от 11.07.2011 № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [16] ПГЗ ЖРО является пунктом глубинного захоронения РАО, предназначенным для размещения РАО без намерения их последующего извлечения и обеспечивающим радиационную безопасность персонала такого пункта, населения и окружающей среды в течение периода потенциальной опасности РАО, включающим в себя, в том числе сооружение, размещенное на глубине более ста метров от поверхности земли. Регулирующие требования по обеспечению безопасности при обращении с РАО, в том числе требования к обеспечению безопасности пунктов хранения РАО при их размещении, сооружении, эксплуатации, выводе из эксплуатации или закрытии (для ПЗРО), устанавливаются в ФНП [15, 16, 17].

До 2012 г. эксплуатирующей организацией ПГЗ ЖРО «Железногорский» являлось ГХК, после принятия Федерального закона от 11.07.2011 № 190-ФЗ [16] эксплуатация объекта осуществляется силами ФГУП «НО РАО» филиала «Железногорский».

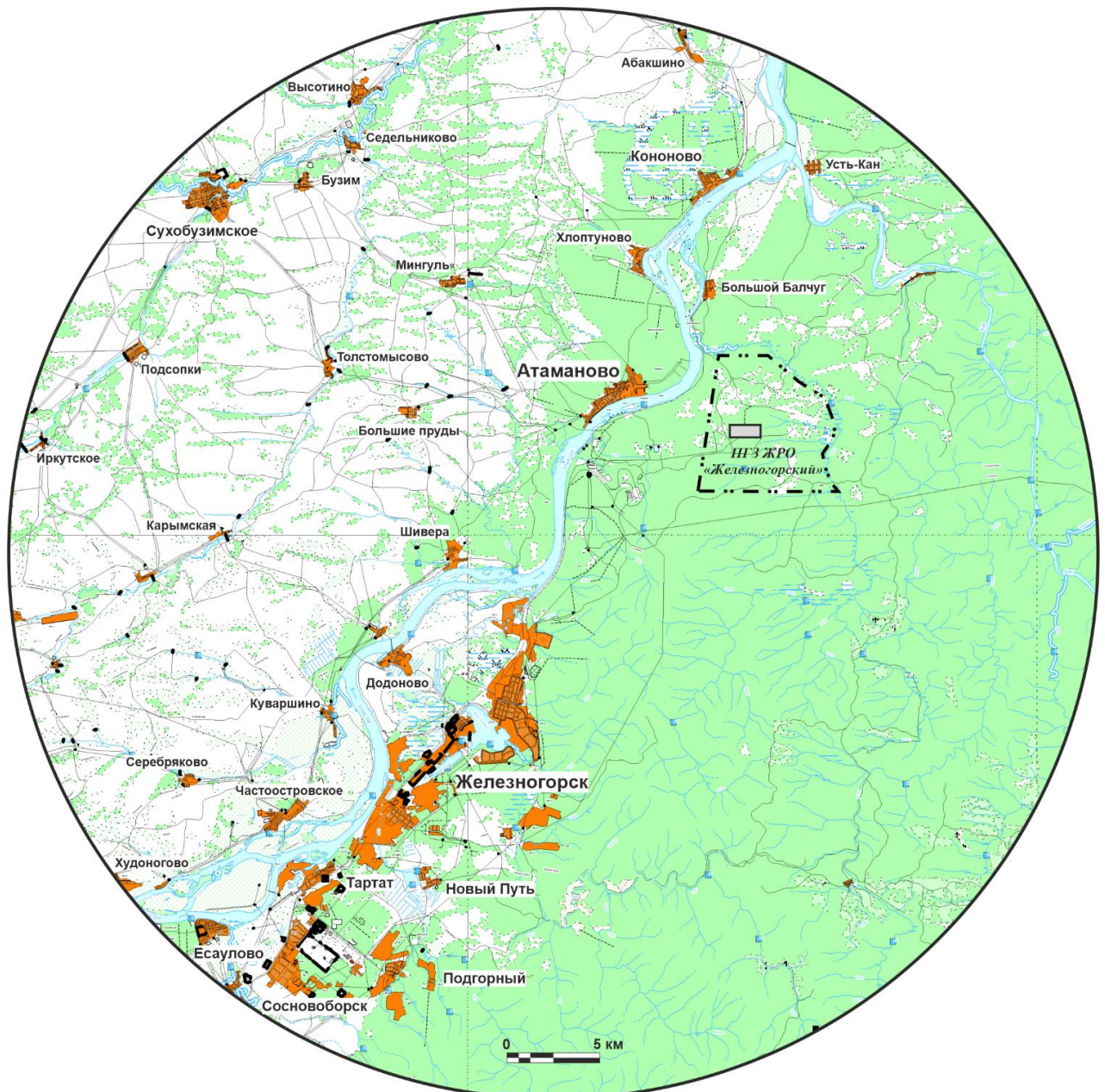
ПГЗ ЖРО «Железногорский» представляет собой природно-техническую систему (природно-антропогенный объект), которая включает:

- комплекс поверхностных объектов – здания, сооружения, емкости, трубопроводы, насосное и другое технологическое оборудование;
- подземные сооружения – эксплуатационные скважины различного назначения (нагнетательные, разгрузочные и наблюдательные);
- область недр, выделенную государственным органом для целей захоронения ЖРО, в виде горного отвода.
- санитарно-защитную зону, установленную по границам промышленной площадки, а также по трассе магистральных трубопроводов.

Недра в пределах горного отвода являются естественными барьерами безопасности и выполняют функции по локализации компонентов РАО и изоляции их от окружающей среды и человека, в том числе и после закрытия ПГЗ ЖРО. В связи с этим геологическое строение места захоронения и свойства горных пород поглощающего (эксплуатационного) и вышележащих (водоупорных, буферного) горизонтов должны отвечать ряду требований и условий, выполнение которых предотвращает негативное воздействие компонентов РАО на человека и природные объекты (окружающую среду) в период эксплуатации, закрытия и после закрытия ПГЗ ЖРО.

Захоронение ЖРО в глубокие геологические горизонты осуществляется с 60-х годов прошлого столетия. Принципиальная возможность захоронения ЖРО была подтверждена при проведении геологоразведочных работ и исследований, а также при обосновании создания ПГЗ ЖРО. Тогда же были сформулированы основные концептуальные положения, касающиеся стадии после прекращения захоронения ЖРО, последствий захоронения ЖРО и возможного воздействия на окружающую среду и человека в будущем. Одним из основных концептуальных положений является тезис о том, что естественные барьеры безопасности (геологическая среда) должны обеспечивать локализацию компонентов РАО и ограничивать воздействие на человека и окружающую среду за счет своих природных свойств.

Площадка размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский» расположена на правом берегу реки Енисей, на водоразделе рек Енисей и Большая Тель, северо-восточнее города Красноярск на расстоянии около 55 км (Рисунок 1.1). Границы промышленной площадки ПГЗ ЖРО «Железногорский» (1,5 км<sup>2</sup>) находятся на удалении 2,5–4,0 км от основных водных артерий района: рек Енисей и Большая Тель. Площадь горного отвода недр ПГЗ ЖРО «Железногорский» составляет 44,9 км<sup>2</sup>, интервал глубин – до 550 м, объем недр в границах горного отвода – 11,3 км<sup>3</sup> [18].



Граница промышленной площадки ПГЗ ЖРО «Железногорский»
  Проекция границы горного отвода участка недр ПГЗ ЖРО «Железногорский»

Рисунок 1.1 – Схема расположения ПГЗ ЖРО «Железногорский»

В границах горного отвода недр на постоянной основе проводятся наблюдения за антропогенным воздействием на геологическую среду обусловленным захоронением ЖРО. Любая деятельность, не связанная с захоронением ЖРО, в пределах границ горного отвода недр запрещена.

Ближайшие населенные пункты: г. Железногорск, с. Атаманово, д. Шивера и с. Большой Балчуг.

ПГЗ ЖРО «Железногорский» расположен в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты (юго-восточная часть Чулымо-Енисейской впадины) и Сибирской платформы (Южно-Енисейский кристаллический массив) в пределах Тельской впадины, сформированной в отложениях докембрийского фундамента и заполненной толщей перемежающихся песчаных и глинистых юрских отложений с максимальной глубиной от поверхности 550 м [19]. Отложения имеют ярко выраженный синклинальный характер. В восточном, южном и юго-восточном направлениях мощность осадочной толщи уменьшается, и на поверхность выходят скальные породы. С запада впадина ограничена тектоническим нарушением субмеридиональной протяженности (Правобережный разлом), плоскость которого заглинизирована и изолирует породы опущенного блока (площадка размещения основных поверхностных объектов) от пород приподнятого блока, в том числе подземные воды опущенного блока от пород приподнятого блока, связанных с рекой Енисей.

Данная впадина имеет ассиметричное строение. Западное крыло крутое, имеет большие углы падения и осложнено крупным тектоническим нарушением. Восточное крыло пологое, оно также осложнено разрывными нарушениями, но меньшей амплитуды.

Слои залегают полого, образуя волнистые структуры обтекания кристаллического фундамента. В зоне тектонического нарушения (Правобережный разлом) наблюдается крутой загиб слоев с уплотнением проницаемых пород и образованием зеркал скольжения в глинистых породах.

В гидрогеологическом отношении район размещения объекта находится в пределах Южно-Енисейского гидрогеологического массива, относящегося



к Восточно-Сибирской гидрогеологической области и находящегося на стыке с Западно-Сибирским артезианским бассейном [20].

В связи с литолого-фациальной невыдержанностью пород осадочного чехла и наличием тектонических нарушений рассматриваемый район отличается сложными гидрогеологическими условиями. Подземные воды приурочены к зоне выветривания метаморфических пород фундамента и проницаемым (песчаным) горизонтам осадочных пород максимальной мощностью 550 м, характеризующихся синклинальным залеганием. Закономерности и направление движения подземных вод определяются гидравлической связью с поверхностными водами, влиянием зоны тектонического нарушения (Правобережного разлома) как непроницаемой границы и захоронением ЖРО в среднюю и нижнюю части осадочной толщи Тельской впадины.

Водонасыщенные толщи пород, расположенные как справа, так и слева от зоны Правобережного разлома (непроницаемой границы), представляют собой отдельные гидравлические системы. Потоки подземных вод в опущенном блоке направлены преимущественно с юга на север и северо-восток, а в поднятом блоке – с северо-востока и с юга на запад и юго-запад. В пределах опущенного блока поток подземных вод II эксплуатационного горизонта характеризуется скоростью движения 10–15 м/год и разгружается в долине реки Большая Тель (Рисунок 1.2), поток подземных вод I эксплуатационного горизонта характеризуется скоростью движения 5–6 м/год, а основной дренажной потоком подземных вод является река Кан, частичная разгрузка происходит в реку Большая Тель (Рисунок 1.3). На поднятом блоке разгрузка подземных вод I горизонта осуществляется в реку Енисей [21].

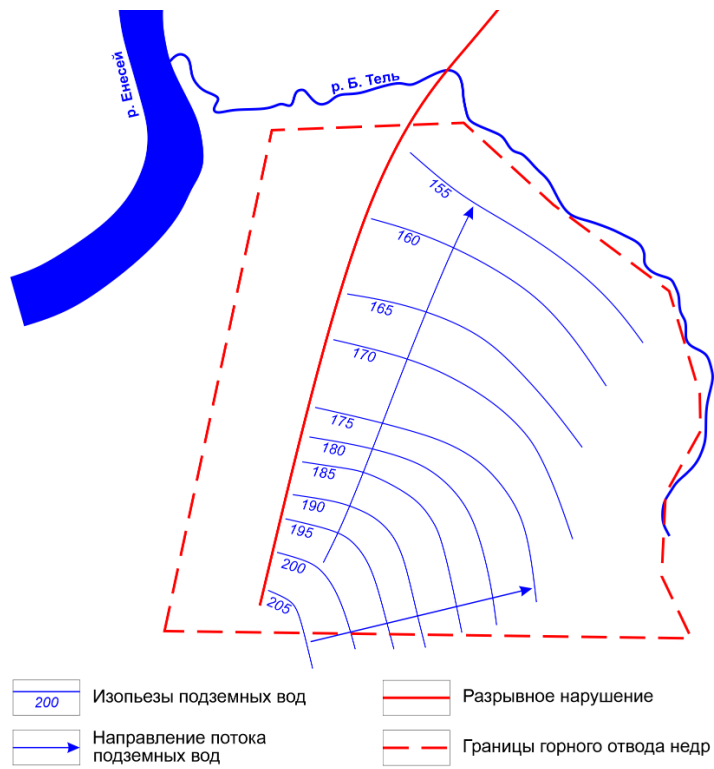


Рисунок 1.2 – Схема изопьез подземных вод II эксплуатационного горизонта (естественный режим)

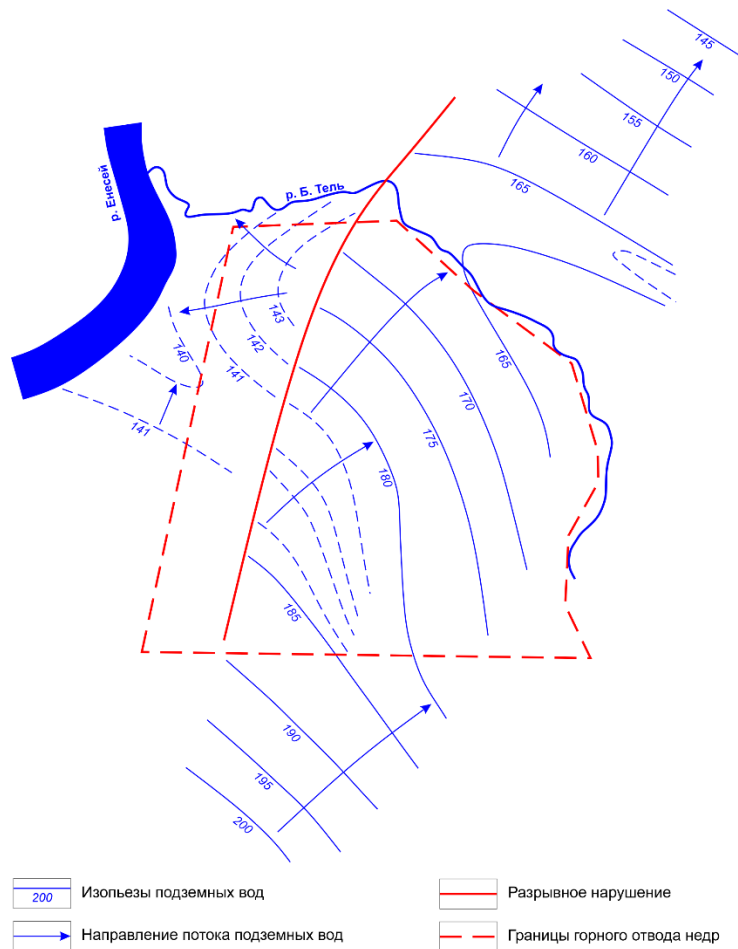


Рисунок 1.3 – Схема изопьез подземных вод I эксплуатационного горизонта (естественный режим)

В гидрогеологическом отношении район размещения ПГЗ ЖРО рассматривается как малый артезианский бассейн, приуроченный к своеобразной геологической структуре, называемой «долиной Черского». Структура открыта к северу и является частью регионального Чулымо-Енисейского артезианского бассейна. Фундаментом и горным обрамлением малого артезианского бассейна являются метаморфические и изверженные породы докембрия. Осадочный чехол сложен терригенными юрскими и четвертичными отложениями, которые образуют впадину в породах фундамента и наиболее погруженные части его приподнятых блоков [22].

Основным источником формирования и пополнения запасов подземных вод являются атмосферные осадки. Областью разгрузки является региональная дрена – река Енисей с притоками, протекающая в общем плане с юга на север в срединной, пограничной по отношению к основным гидрогеологическим структурам зоне Приенисейских тектонических нарушений [23]. К долинам реки Енисей и ее притоков приурочены вытянутые вдоль русел наложенные аллювиальные водоносные горизонты грунтовых вод, составляющие обособленный водоносный комплекс и имеющие тесную гидравлическую связь с поверхностными водотоками.

Естественная изолированность эксплуатационных горизонтов от вышележащих обеспечивается слабопроницаемыми, практически водоупорными толщами глинистых пород в разрезе и водонепроницаемой зоной Правобережного разлома в плане [2, 24].

Все горизонты осадочного чехла характеризуются наличием прослоев различной проницаемости. При этом данные песчано-глинистые отложения горизонтов обладают высокими задерживающими свойствами по отношению к радионуклидам (компонентам РАО). Изолирующие свойства глинистых пород имеют большое значение для обеспечения безопасности захоронения ЖРО. Проницаемость глин и аргиллитоподобных глин водоупорных горизонтов составляет от  $0,22 \cdot 10^{-6}$  до  $1,69 \cdot 10^{-6}$  мкм<sup>2</sup>. Такие значения проницаемости гарантируют надежную изоляцию компонентов РАО от вышележащих горизонтов и земной поверхности [2].

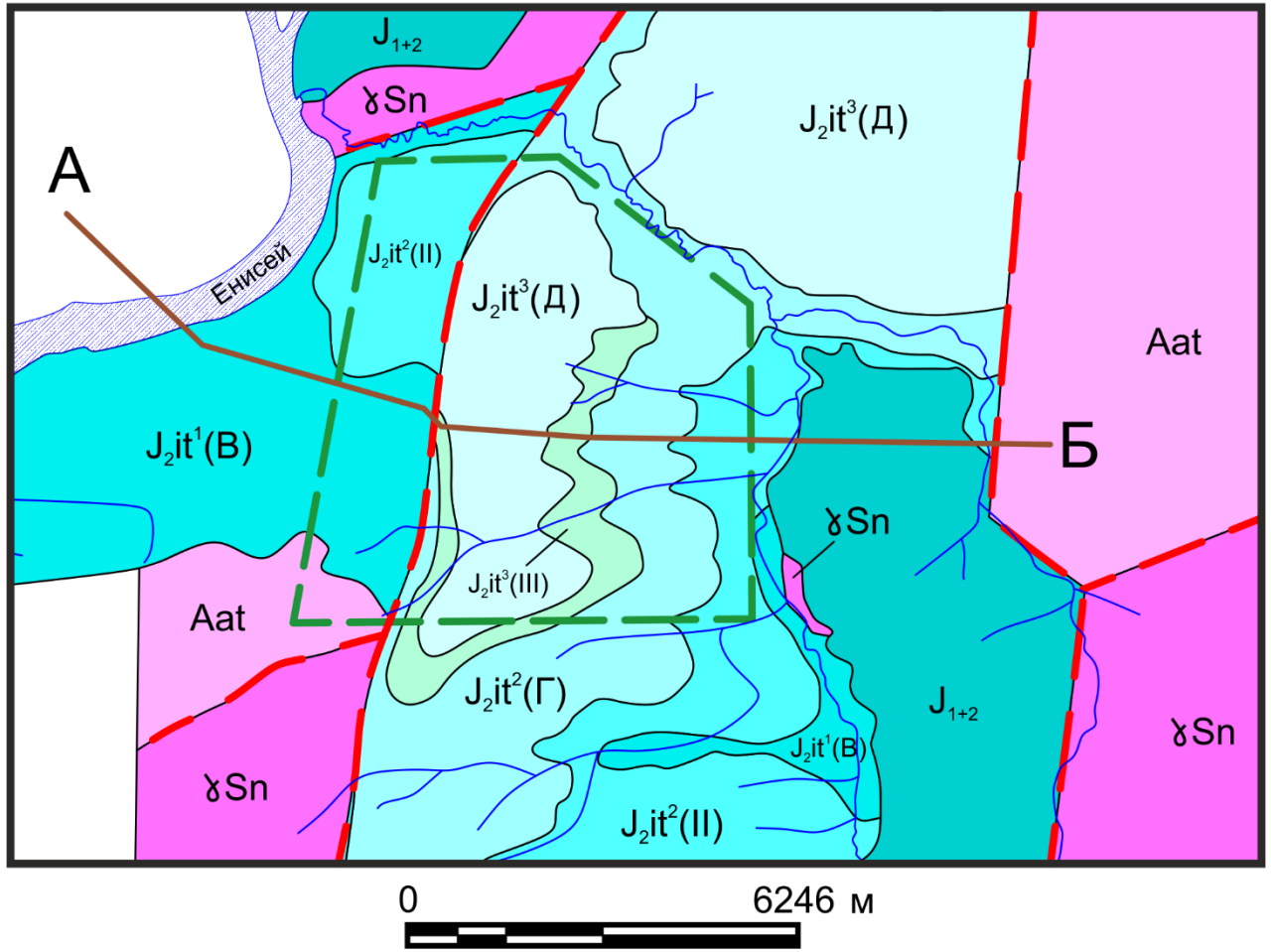
Исходя из стратиграфической принадлежности и литологических особенностей водовмещающих пород, условий залегания и формирования подземных вод на территории выделяются следующие основные водоносные комплексы (Рисунок 1.4 и Рисунок 1.5):

- водоносный комплекс палеоген-четвертичных отложений;
- водоносный комплекс юрских отложений;
- водоносный комплекс метаморфических и изверженных пород докембрия.

Водоносный комплекс юрских отложений представлен чередованием водоносных и водоупорных литологических разностей – слоев и линз преимущественно слабо литифицированных рыхлых песчаников и песков, алевролитов и алевроитов, аргиллитов и аргиллитоподобных глин, бурых углей, конгломератов и галечников. По генезису это континентальные озерно-болотные и аллювиальные отложения. Они выполняют грабенообразную впадину в породах фундамента, образуя крупную синклиналичную структуру. Для юрских отложений характерно циклическое строение – чередование в разрезе проницаемых и водоупорных пород. В составе водоносного комплекса юрских отложений на описываемой территории выделяются следующие водоносные горизонты и разделяющие их водоупоры (сверху-вниз) [25, 26]:

- водоупорные глины верхнеитатской подсвиты – (Д)  $J_{2it}^3$ ;
- водоносный горизонт верхнеитатской подсвиты – (III)  $J_{2it}^3$ ;
- водоупорные глины среднеитатской подсвиты – (Г)  $J_{2it}^2$ ;
- водоносный горизонт среднеитатской подсвиты – (II)  $J_{2it}^2$ ;
- воды спорадического распространения верхней части нижнеитатской подсвиты – (В)  $J_{2it}^1$ ;
- водоупорные глины нижнеитатской подсвиты – (F)  $J_{2it}^1$ ;
- воды спорадического распространения нижней части нижнеитатской  $J_{2it}^1$  и верхнемакаровской  $J_1^3mk^2$  подсвит (Б);
- водоносный горизонт нижнемакаровской подсвиты –  $J_1^2mk^1$  (I);
- водоупорные породы триасово-раннеюрской коры выветривания –  $T_3-J_1^1$  (А).

Геологическая карта дочетвертичных отложений



Геологический разрез по линии А - Б

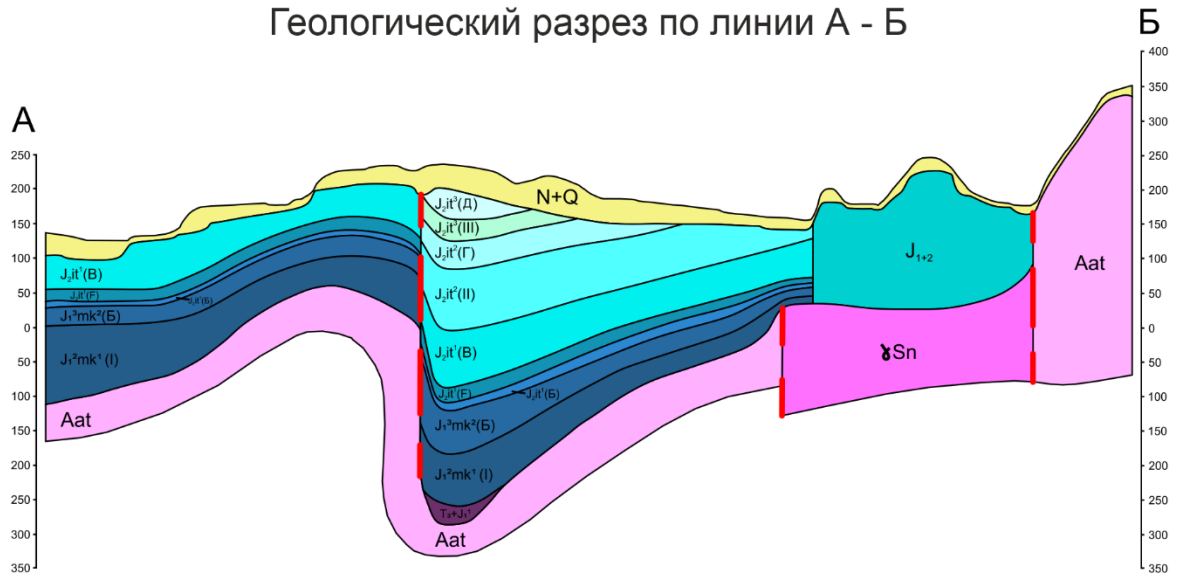


Рисунок 1.4 – Геологическая карта и разрез района размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский»

## Условные обозначения

	Неоген - четвертичные отложения
	Отложения верхнеитатской подсвиты. Глины с прослоями песков и алевритов
	Отложения верхнеитатской подсвиты. Пески средне-тонкозернистые
	Отложения среднеитатской подсвиты. Глины алевритистые и углистые с прослоями песков и алевритов
	Отложения среднеитатской подсвиты. Пески и алевриты с прослоями углистых глин
	Отложения нижнеитатской подсвиты. Глины с прослоями разнозернистого песка
	Отложения нижнеитатской подсвиты. Глины
	Отложения нижнеитатской подсвиты. Пески разнозернистые с прослоями глин
	Отложения верхнемакаровской подсвиты. Глины с прослоями песков, песчаников и алевролитов
	Отложения нижнемакаровской подсвиты. Обломки изверженных и метаморфических пород с песком и глиной
	Отложения триасово-раннеюрские нерасчлененные, дресвяно-щебнистые
	Канская серия. Атамановская толща. Гнейсы, амфиболиты, сланцы
	Гранитоиды нижнеканского массива
	Граница горного отвода недр
	Линия разреза
	Тектонические нарушения
	Реки

Рисунок 1.5 – Условные обозначения к рисунку 1.4

Нижние водоносные горизонты – I эксплуатационный (глубина залегания 355–500 м) и II эксплуатационный (глубина залегания 180–280 м) горизонты используются на ПГЗ ЖРО «Железногорский» в качестве эксплуатационных для захоронения ЖРО. В составе горизонта II выделяются два слоя проницаемых пород, разделенных глинистым слоем. Для захоронения НАО используется нижняя проницаемая пачка, верхняя пачка выполняет роль буферного горизонта вместе с водоносным горизонтом III (Рисунок 1.6).

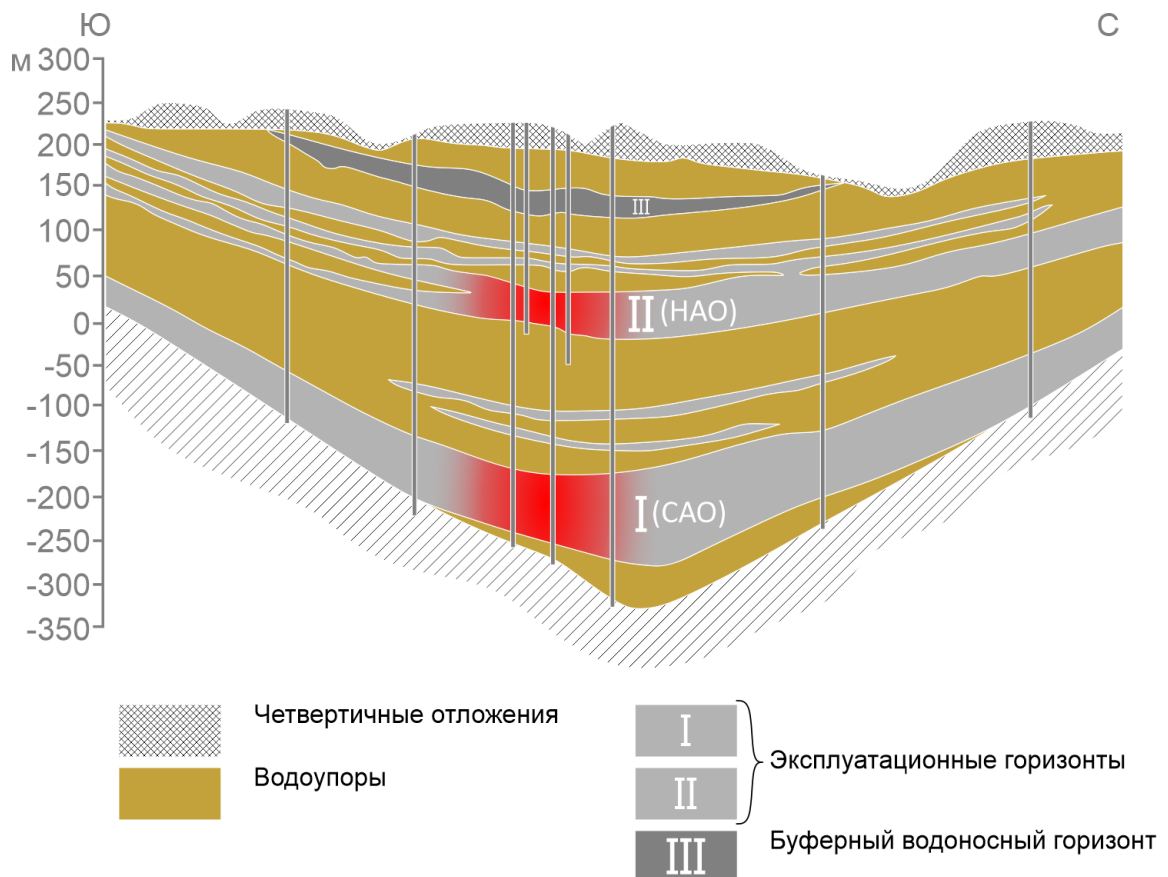


Рисунок 1.6 – Схема разреза ПГЗ ЖРО «Железногорский»

Эксплуатационные горизонты ПГЗ ЖРО «Железногорский» сложены среднезернистыми песками и слабосцементированными песчаниками и характеризуются следующим составом: кварц – 70–80 %, калиевые или натриевые полевые шпаты, ортоклаз, микроклин, плагиоклаз – 5–15 %, минералы группы слюд и гидрослюды – 10 %, глинистые минералы – 3–5 %. В пределах эксплуатационных горизонтов выделяются подчиненные прослои глинистых пород. Фильтрационные и емкостные свойства эксплуатационных и буферного горизонтов приведены в таблице 1.3. Горизонты содержат подземные воды с

малым солесодержанием (до 0,3 г/л), пьезометрические напоры над кровлей составляют 360–370 м для I эксплуатационного горизонта и 62–147 м для II эксплуатационного горизонта.

Таблица 1.3 – Фильтрационные и емкостные свойства эксплуатационных и буферного горизонтов ПГЗ ЖРО «Железногорский» [21]

Параметры	Ед. изм.	I горизонт	II горизонт	III горизонт
Глубина залегания	м	355–500	180–280	50–100
Толщина (мощность)	м	55–85	25–45	25–30
Эффективная толщина (мощность)	м	25–35	23–45	не опред.
Общая пористость	-	0,2–0,25	0,3	0,3*
Эффективная пористость	-	0,07	0,08–0,12	0,1*
Водопроницаемость (гидропроницаемость)	м <sup>2</sup> /сут	5–40	20–80	4–14
Коэффициент фильтрации	м/сут	0,3–1,6	0,1–2,2	0,26
Коэффициент пьезопроводности	м <sup>2</sup> /сут	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	не опред.
Напор над кровлей	м	360–370	62–147	-
Уклон естественного потока (среднее значение)	-	0,0033	0,008	0,0146
Температура горизонта	°С	14–16	9–10	8–9
<b>Примечание:</b> * по аналогии со II горизонтом				

Слабопроницаемые (водоупорные) горизонты сложены различными глинистыми породами: аргиллито-подобными и «жирными» глинами, алевролитами, углистыми глинами, переслаиванием различных глин с подчиненными прослоями песков, иногда известковых. Глинистые горизонты распространены повсеместно в пределах области возможного влияния захоронения ЖРО на окружающую среду и человека и выклиниваются в восточном и южном направлениях на бортах впадины.

### 1.3 Краткая характеристика инженерно-технических сооружений

Решения по размещению ПГЗ ЖРО принимались на основании исходных данных, полученных в результате геологоразведочных работ, исследований и прогнозных расчетов, опыта создания аналогичных систем в других отраслях промышленности и рекомендаций экспертов, рассматривавших результаты предварительных исследований и проектных проработок.

Поверхностный комплекс ПГЗ ЖРО «Железногорский» включает сооружения для приема, временного хранения, транспортирования и нагнетания



ЖРО: трубопроводы от предприятия-поставщика ЖРО (ГХК), приемные емкости, трубопроводы по промышленной площадке, насосное оборудование, системы электро- и водоснабжения, связи и сигнализации, передвижное оборудование, административно-технические здания и сооружения, включая павильоны скважин. При проектировании поверхностного комплекса за основу были приняты решения, ранее применявшиеся при проектировании основных производств предприятий атомной промышленности, прошедшие проверку на практике и доказавшие технологичность и безопасность эксплуатации.

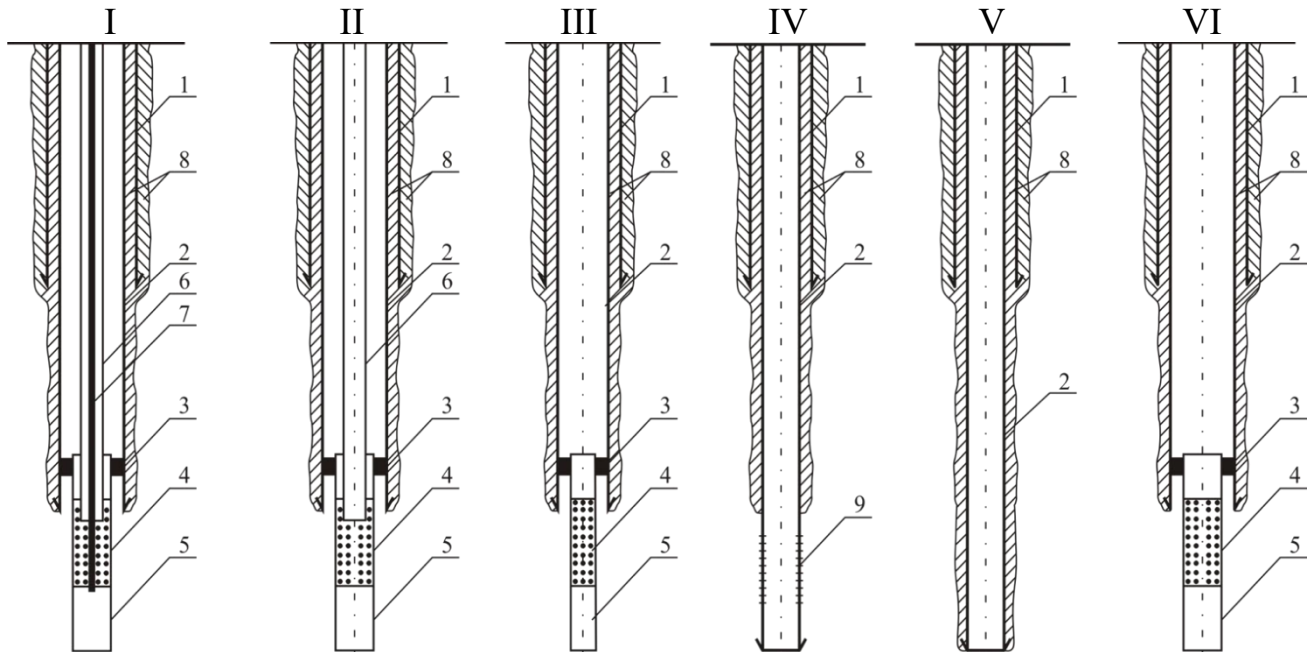
Подземный комплекс ПГЗ ЖРО «Железногорский» представляет собой эксплуатационные скважины различного назначения (нагнетательные, разгрузочные, наблюдательные). При проектировании конструкций скважин частично использовался опыт промышленности по добыче углеводородов, однако условия эксплуатации скважин требовали применения новых материалов, а также технологических решений по сооружению и дальнейшей эксплуатации.

Как правило, эксплуатационные скважины ПГЗ ЖРО, в зависимости от назначения, классифицируются на:

- нагнетательные – предназначены для нагнетания (удаления, закачки) различных типов ЖРО в эксплуатационный (поглощающий) горизонт (пласт-коллектор);
- наблюдательные – предназначены для контроля за распределением компонентов РАО в эксплуатационном горизонте и протекающими там процессами, а также для наблюдений за буферным и вышележащими горизонтами;
- глухие наблюдательные – расположены вблизи нагнетательных скважин, их внутреннее пространство не сообщается с водоносными горизонтами. В скважинах проводится геофизический контроль за процессами распространения тепловыделяющих компонентов РАО;
- разгрузочные – предназначены для выполнения технологических операций по снижению пластового давления в процессе нагнетания ЖРО и регулирования процесса равномерного заполнения полезной емкости

эксплуатационных горизонтов компонентами РАО путем откачки чистых подземных вод из эксплуатационных горизонтов.

Конструкции скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» приведены на рисунке 1.7.



I – нагнетательная скважина для захоронения кислых САО (I горизонт); II – нагнетательная скважина для захоронения щелочных САО (I горизонт); III – нагнетательная скважина для захоронения НАО (II горизонт) и наблюдательная скважина; IV – наблюдательная скважина; V – глухая скважина; VI – разгрузочная скважина.

Конструкция скважин: 1 – кондуктор; 2 – эксплуатационная колонна; 3 – свинцовый сальник; 4 – фильтровая колонна; 5 – отстойник; 6 – лифтовая колонна; 7 – термометрическая колонна; 8 – цементный камень в заколонном и межколонном пространстве; 9 – фильтровая зона (перфорация).

Рисунок 1.7 – Конструкции эксплуатационных скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» [21]

Всего на ПГЗ ЖРО «Железногорский» оборудовано 160 эксплуатационных скважин разного назначения.

Первоначальным проектом была предусмотрена регулируемая схема захоронения ЖРО с линейным расположением нагнетательных и разгрузочных скважин, причем скважины, оборудованные на I и II эксплуатационные горизонты, совмещены в один ряд.

Для захоронения ЖРО было сооружено семь нагнетательных скважин на I эксплуатационный горизонт и четыре на II эксплуатационный горизонт. На 2021 г. эксплуатируется девять нагнетательных скважин на I эксплуатационный

горизонт и три на II эксплуатационный горизонт. Расстояние между нагнетательными скважинами каждого горизонта составляет около 200 м (Рисунок 1.8). Нагнетательные скважины располагаются в центральной части синклинали впадины, характеризующейся наиболее благоприятными условиями для захоронения ЖРО (Рисунок 1.6).

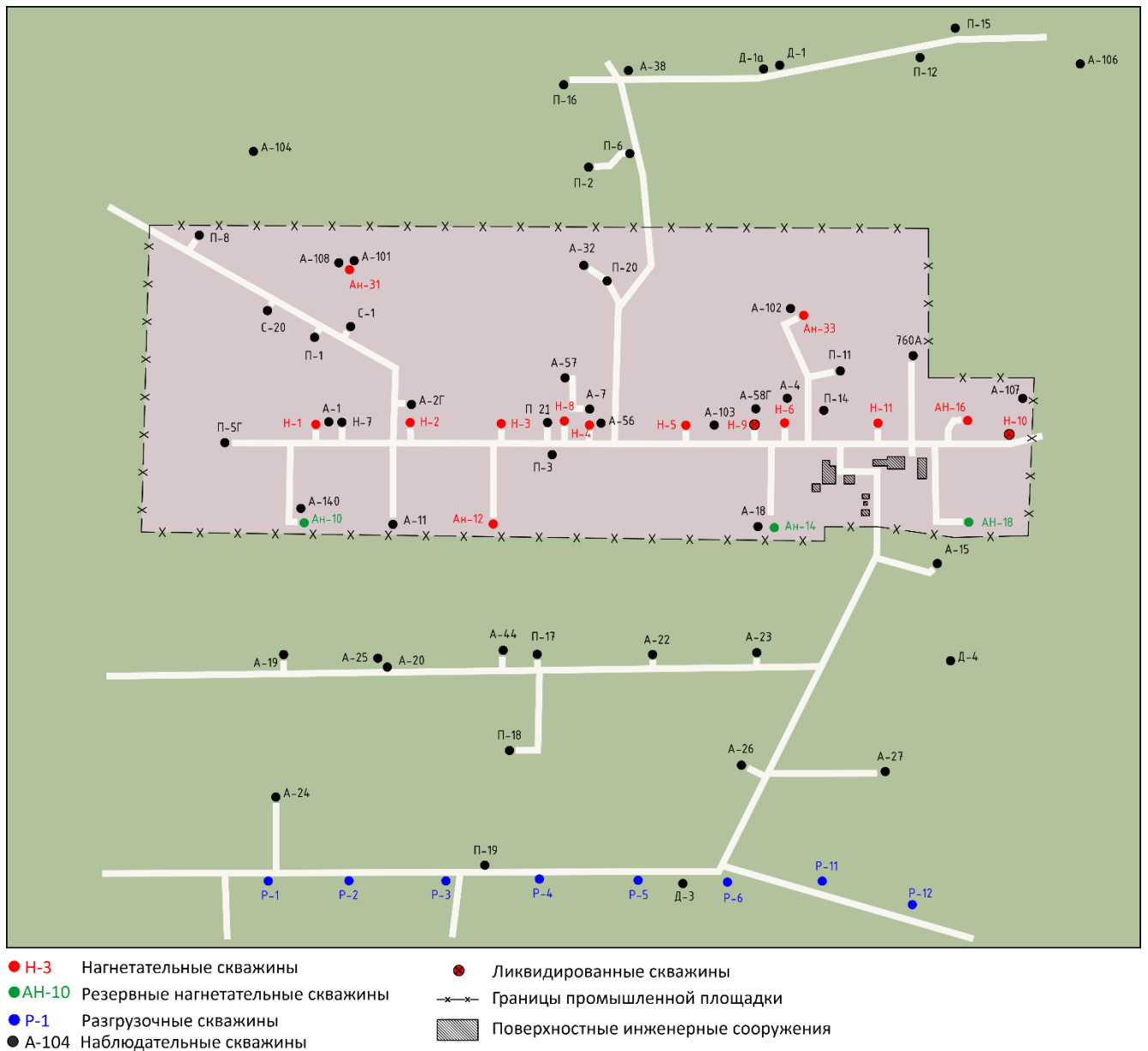


Рисунок 1.8 – Схема расположения центральной части ПГЗ ЖРО «Железногорский»

Разгрузочные скважины I эксплуатационного горизонта (Р-1, Р-2, Р-3, Р-4, Р-5, Р-6, Р-11, Р-12) расположены параллельно створу нагнетательных скважин на расстоянии примерно 1 км к югу от него (в направлении, противоположном направлению движения естественного потока подземных вод). Расстояние между

скважинами в створе около 200 м. Разгрузочные скважины II эксплуатационного горизонта (Р-7, Р-8, Р-9, Р-10) также расположены параллельно нагнетательным скважинам на расстоянии примерно 1,7 км к северу. Дистанция между разгрузочными скважинами составляет около 400 м. Такое расположение скважин позволяет оказывать влияние на формирование искусственной линзы компонентов РАО в эксплуатационных горизонтах, маневрируя объемами и количеством одновременно работающих разгрузочных скважин и оттягивая, таким образом, фронт распространения компонентов РАО в нужном направлении.

Для наблюдения за системой захоронения РАО в рамках мониторинга на 2021 г. ПГЗ ЖРО «Железногорский» оборудовано 132 наблюдательными скважинами: на I эксплуатационный горизонт оборудовано 42 скважины (из них две – глухие), 13 скважин – временно законсервированы; на II эксплуатационный горизонт оборудовано 39 скважин, из них две – глухие, 19 – временно законсервированы. Для контроля за состоянием III буферного и вышележащего горизонтов используются, соответственно, 16 и три скважины.

В настоящее время шесть наблюдательных скважин ликвидированы.

Обзорная схема расположения скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» показана на рисунке 1.9.

Скважины – наиболее ответственные сооружения ПГЗ ЖРО, от технического состояния которых во многом зависит изоляция захороненных ЖРО от окружающей среды и человека, а также локализация компонентов РАО в недрах. Скважина представляет собой потенциальный канал связи эксплуатационного горизонта, содержащего компоненты РАО, с земной поверхностью и неглубокозалегающими горизонтами подземных вод.

Подземная часть скважины представляет собой горную выработку малого сечения (диаметр 0,15–0,3 м) и большой протяженности (сотни метров), оборудованную несколькими обсадными колоннами труб, в нижней части скважина сообщается с эксплуатационным или контролируемым горизонтом.

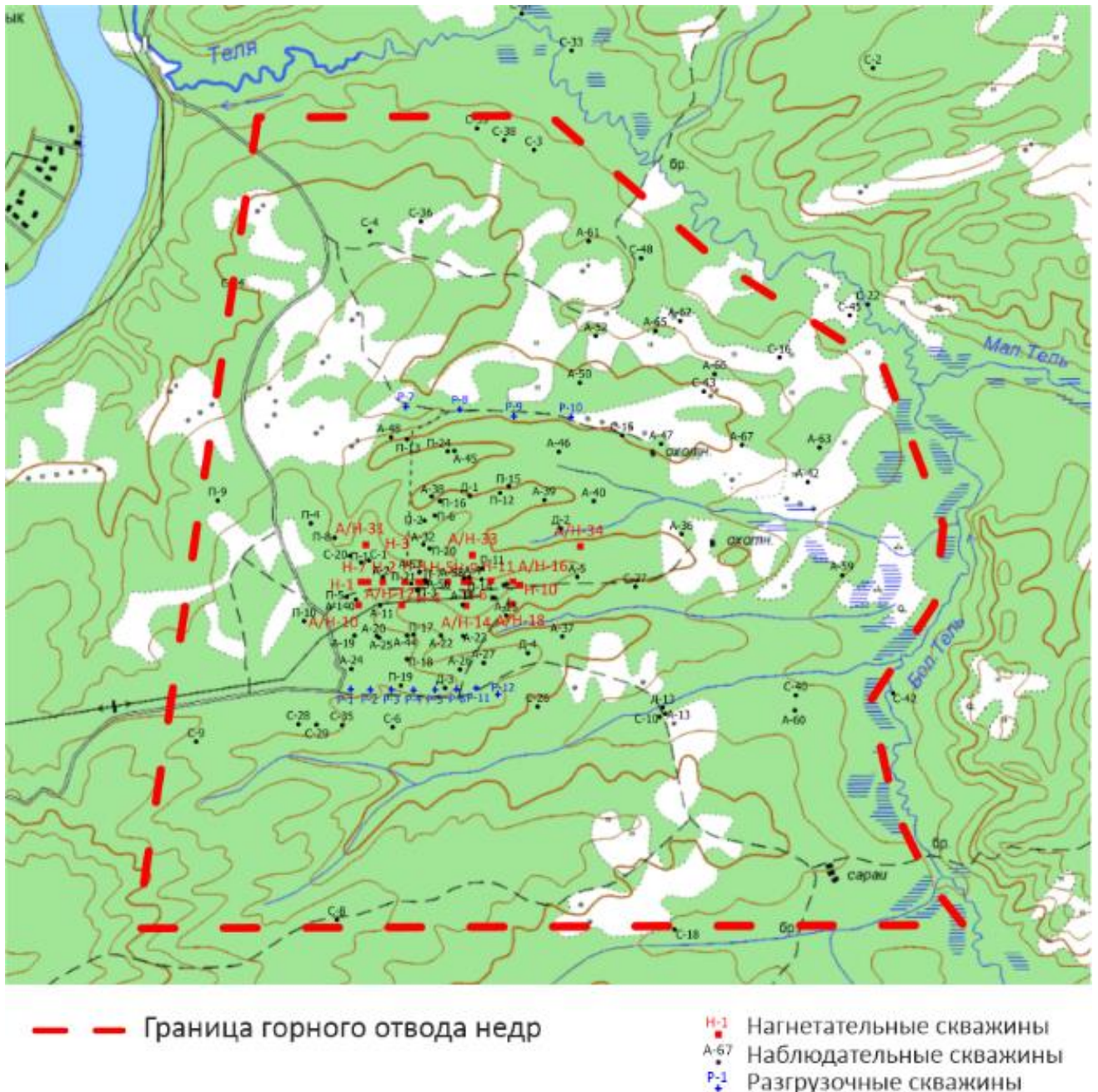


Рисунок 1.9 – Схема расположения эксплуатационных скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский»

Глубины скважин зависят от их эксплуатационного назначения, глубин залегания эксплуатируемых и контролируемых горизонтов. Для ПГЗ ЖРО «Железногорский» глубины скважин не превышают 550 м.

Нагнетательные скважины ПГЗ ЖРО «Железногорский» состоят из поверхностной и подземной частей. Поверхностная часть нагнетательной скважины относится к поверхностным объектам ПГЗ ЖРО и состоит из устьевоего оборудования (обвязки), устанавливаемого в павильонах (сооружениях) непосредственно на устьях эксплуатационной и лифтовой колонн скважины,

задвижек с фланцами для подсоединения трубопровода подачи растворов и других технологических линий (сдувки), измерительных приборов, электроприводов и других исполнительных механизмов, размещаемых в каньонах павильона скважины ниже поверхности земли.

Подземная часть скважины телескопической конструкции состоит из обсадных колонн различного назначения. Заколонное и межколонное пространство между внешней стенкой обсадной колонны и породами заполняется тампонажным цементом, образующим цементный камень, по свойствам идентичный природным образованиям – горным породам.

Эксплуатационный ресурс нагнетательных скважин был установлен при проектировании и принят равным проектному сроку эксплуатации ПГЗ ЖРО – 25 лет. По результатам эксплуатации скважин и накопленному опыту эксплуатационные ресурсы нагнетательных скважин были уточнены – для нагнетательных скважин, используемых для захоронения НАО и щелочных САО, эксплуатационный ресурс составлял 10 лет, для кислых САО – 5 лет [27, 28]. После истечения эксплуатационного ресурса проводится комиссионное обследование скважин с целью установления остаточного ресурса и принимается решение о продолжении эксплуатации скважины, выводе скважины в резерв, ремонте или выводе из эксплуатации с последующей ликвидацией. Для наблюдательных и разгрузочных скважин эксплуатационный ресурс составляет 25 лет, после чего выполняется обследование и принимается решение о продолжении эксплуатации, ремонте или выводе из эксплуатации с последующей ликвидацией [29, 30].

Обоснования возможности эксплуатации скважин приводятся в проектной документации, а также в материалах, представляемых в рамках процедур лицензирования Ростехнадзором и Роснедрами.

В 2009–2010 гг. с целью обоснования безопасной эксплуатации ПГЗ ЖРО ВНИИПромтехнологии подготовлено «Обоснование продления сроков эксплуатации глубокого хранилища полигон «Северный» ФГУП «Горно-химический комбинат» до 2020 года», на которое получены положительные

заключения: государственной геологической экспертизы, заключение по ядерной безопасности захоронения ЖРО.

В 2009 г. ВНИПИпромтехнологии разработана проектная документация «Реконструкция и подготовка к выводу из эксплуатации полигона жидких радиоактивных отходов «Северный» федерального государственного унитарного предприятия «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск), Красноярский край», на которую получено положительное заключение ФГУ «Главгосэкспертиза».

При передаче ПГЗ ЖРО «Железногорский» от ГХК во ФГУП «НО РАО», в период с 2013 по 2014 гг. ВНИПИпромтехнологии выполнена корректировка проектной документации, а также проведены работы по определению остаточного ресурса его элементов. Согласно данным документам Госкорпорация «Росатом» приняла решение продлить срок эксплуатации ПГЗ ЖРО «Железногорский» до 31.12.2023.

В 2019 г. в рамках подготовки обосновывающих материалов для внесения изменений в лицензию на право пользования недрами ВНИПИпромтехнологии показана принципиальная возможность продления срока эксплуатации объекта до 2030 г. (срок действующей лицензии Роснедр заканчивается 31.12.2030).

Основное требование к нагнетательным скважинам – надежная изоляция эксплуатационного горизонта от вышележащих горизонтов по заколонному и межколонному пространству обсадных колонн. Основное требование к наблюдательным скважинам – надежная изоляция контролируемого горизонта от вышележащих горизонтов и земной поверхности, обеспечение доступа приборов при проведении наблюдений в ствол скважины и в интервал контролируемого горизонта.

На ПГЗ ЖРО предусмотрены меры технологического контроля за процессом захоронения ЖРО (измерение давления, температуры и газовыделения), а также мониторинга состояния геологической среды (системы захоронения РАО). Мониторинг осуществляется посредством проведения гидродинамических, геохимических и геофизических измерений в наблюдательных скважинах.

Геофизические измерения проводятся и в измерительных колоннах нагнетательных и разгрузочных скважин. Выполняется также контроль состава откачиваемых вод из разгрузочных скважин, удельная активность вод контролируется постоянно с установленной периодичностью.

Согласно проектным решениям эксплуатация ПГЗ ЖРО предусматривает периодический контроль технического состояния нагнетательных, разгрузочных и наблюдательных скважин. С целью оценки сейсмической активности в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО ведутся регулярные работы по сейсмическому и геодезическому мониторингу.

В рамках диссертационной работы ПГЗ ЖРО «Железногорский» выбран в качестве референтного объекта. В такой роли данный ПГЗ ЖРО выступал, в частности, при проведении в 2012–2013 гг. миссии МАГАТЭ [12, 14].

В пользу признания ПГЗ ЖРО «Железногорский» референтным объектом свидетельствуют:

- «корректно средние», по сравнению с ПГЗ ЖРО в г. Северске и г. Димитровграде, объемы и активности захороненных ЖРО, а также время эксплуатации ПГЗ ЖРО;
- наличие наиболее широкого диапазона элементов технологического процесса (нагнетание под давлением, свободный налив, разгрузочные скважины и т. д.);
- сходные с ПГЗ ЖРО в г. Северске геологические и гидрогеологические условия, но усложненные наличием тектонического нарушения (Правобережный разлом) и близостью открытой гидросферы (река Енисей и ее притоки).

Основные отличия ПГЗ ЖРО «Железногорский» от ПГЗ ЖРО в г. Северске состоят в схеме и технологии захоронения ЖРО. На ПГЗ ЖРО в г. Северске используется нерегулируемая схема (без разгрузочного контура) с центральным круговым (площадка 18) и кустовым (площадка 18а) расположением нагнетательных скважин. При этом на ПГЗ ЖРО «Железногорский» применяется линейная схема нагнетательного контура с разгрузкой эксплуатационных горизонтов. Необходимость разгрузки обусловлена площадной ограниченностью



осадочной толщ и синклиналим характером ее залегания, что не характерно для ПГЗ ЖРО в г. Северске.

ПГЗ ЖРО в г. Димитровграде отличается от двух других по глубине захоронения ЖРО (интервал глубин 1 130–1 410 м, 1 440–1 550 м). Геологический разрез района размещения данного ПГЗ ЖРО представлен мощной толщей преимущественно карбонатных отложений (известняки), проницаемые пористые горизонты изолированы от пресных подземных вод слоями глин и известняков толщиной несколько сотен метров и содержат высокоминерализованные воды, относятся к зоне застойного режима. Скорости естественного движения подземных вод характеризуются значениями не более нескольких сантиметров в год.

#### 1.4 Краткая характеристика захораниваемых ЖРО

ПГЗ ЖРО «Железногорский» предназначен для захоронения ЖРО различного уровня активности и состава. В I эксплуатационный горизонт с 1967 г. осуществляется захоронение щелочных САО при расходах до 300 м<sup>3</sup>/сут и давлениях нагнетания до 1,4 МПа. Дебит разгрузки зависит от расхода нагнетания и за последние десять лет составлял до 30 м<sup>3</sup>/сут. Режимы работы нагнетательных и разгрузочных скважин, схемы их включения устанавливались исходя из условия обеспечения равномерного заполнения I эксплуатационного горизонта на основе анализа контрольных наблюдений.

В состав захораниваемых САО входят соли натрия, кремнекислота. Удельная активность бета-излучающих радионуклидов – не более  $1,0 \cdot 10^7$  Бк/г. Радионуклидный состав представлен в основном следующими радионуклидами: Sr-90, Cs-134, Cs-137, Ru-103, Ru-106 и Ce-134.

В период с 1972 по 2013 гг. на ПГЗ ЖРО «Железногорский» осуществлялось опытно-промышленное захоронение отходов повышенной активности в кислой среде ( $pH$  1–3) [31]. Захоронение данных отходов осуществлялось периодически до трех раз в год, при этом в отдельные годы нагнетание не выполнялось. Перед захоронением ЖРО проводилась предварительная подготовка эксплуатационного горизонта путем нагнетания слабокислых растворов для снижения накопления нуклидов в ближней зоне нагнетательной скважины. Захоронение ЖРО

осуществлялось в три скважины, расположенные в общем ряду скважин на I эксплуатационный горизонт, в режиме свободного налива или при минимальных давлениях на устье скважины, пьезометрическая поверхность подземных вод в районе скважин, в период нагнетания, практически не изменялась.

Во II эксплуатационный горизонт осуществляется захоронение НАО с расходом до 500 м<sup>3</sup>/сут при давлениях до 1,6 МПа. Удельная бета-активность – не более  $1,0 \cdot 10^3$  Бк/г. Радионуклидный состав НАО в целом аналогичен щелочным САО.

К настоящему времени в I и II эксплуатационный горизонты захоронено порядка 7 млн. м<sup>3</sup> ЖРО с общей активностью, с учетом их радиоактивного распада,  $52,7 \cdot 10^{17}$  Бк – на I горизонт и  $32,5 \cdot 10^{14}$  Бк – на II горизонт. Эксплуатация ПГЗ ЖРО «Железногорский» в течение более 55-летнего периода эксплуатации подтвердила безопасность захоронения.

В отношении захораниваемых ЖРО на рассматриваемом объекте установлены критерии приемлемости для захоронения. Основные контролируемые показатели подлежащих захоронению НАО и САО включают [32]:

- пределы по показателю *pH*;
- максимальную удельную активность по альфа-излучающим радионуклидам;
- максимальную удельную активность по бета-излучающим радионуклидам;
- ограничения по макрокомпонентам, в том числе нитрат-иону, сульфат-иону, карбонат-иону, общему солесодержанию;
- ограничение на содержание органических веществ, компонентов экстракционных смесей.

Химический состав захораниваемых ЖРО приведен в таблицах 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4 – Характеристики захораниваемых ЖРО (САО) в I эксплуатационный горизонт ПГЗ ЖРО «Железногорский» [21, 32]

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	Каустический модуль, $\alpha_K = 0,676 \cdot (C_{NaOH}/C_{Al})$	-	3–7
2	Гидроксид натрия	г/дм <sup>3</sup>	4–18
3	Нитрат натрия	г/дм <sup>3</sup>	130–350
4	Алюминий	г/дм <sup>3</sup>	не более 3,4
5	Кремний в пересчете на диоксид	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,08
6	Взвешенные вещества	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,03
7	Хлорид-ион	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,5
8	Сульфат-ион	г/дм <sup>3</sup>	не более 350
9	ТБФ	г/дм <sup>3</sup>	при содержании нитрата натрия 130–250 г/дм <sup>3</sup>
			при содержании нитрата натрия 250–350 г/дм <sup>3</sup>
			не более 0,1
			не более 0,06
10	ГХБД	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,005
11	Фосфор общий	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,06
12	Общее солесодержание	г/дм <sup>3</sup>	не более 450

Таблица 1.5 – Характеристики захораниваемых ЖРО (НАО) во II эксплуатационный горизонт ПГЗ ЖРО «Железногорский» [21, 32]

№ п/п	Характеристика	Ед. изм.	Значение
1	pH	-	не более 7
2	Железо (III)	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,01
3	Солесодержание (сухой остаток)	г/дм <sup>3</sup>	не более 20,0
4	Нитрат-ион	г/дм <sup>3</sup>	не более 10,0
5	Сульфат-ион	г/дм <sup>3</sup>	не более 1,0
6	Карбонат-ион	г/дм <sup>3</sup>	не более 50,0
7	Взвешенные вещества	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,05
8	АПАВ	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,05
9	ТБФ	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,01
10	ГХБД	г/дм <sup>3</sup>	не более 0,005

В ходе эксплуатации ПГЗ ЖРО «Железногорский» изменялись:

- объемы ЖРО, принимаемых на захоронение;
- состав ЖРО (незначительно);
- продолжительность и режимы работы нагнетательных и разгрузочных скважин.

Основными причинами внесения изменений в технологические процессы были:

- по объемам, принимаемым на захоронение ЖРО, – особенности работы основных производств ГХК;
- по составу ЖРО – предотвращение кольматации нагнетательных скважин, повышенного газовыделения и перегрева эксплуатационного горизонта, интенсификация перехода в отвержденные формы;
- по продолжительности и режиму работы нагнетательных и разгрузочных скважин – обеспечение равномерного заполнения эксплуатационного горизонта и сохранение пластового давления в заданных параметрах.

#### 1.5 Опыт прогнозирования последствий захоронения РАО на ПГЗ ЖРО

В настоящее время накоплен опыт по прогнозному моделированию процессов, связанных с захоронением РАО, на площадке размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский», результаты которого опубликованы и приводятся в:

- отчетах по международному проекту под руководством института ПАСА (Австрия), в выполнении которого участвовали также ВНИПИпромтехнологии и ИГЕМ РАН [33, 34];
- монографии [2], обобщающей опыт создания, исследования и осуществления глубинного захоронения ЖРО в геологические формации;
- работе Томского политехнического университета [35];
- работе ВНИПИпромтехнологии по моделированию геофильтрации и геомиграции на ПГЗ ЖРО «Железногорский», выполненной для обоснования продления лицензии на эксплуатацию [36];

– работе ИБРАЭ РАН по созданию постоянно действующей геофильтрационной геомиграционной модели ПГЗ ЖРО «Железногорский» [37, 38].

Каждая из этих работ, так или иначе, развивала знания о ПГЗ ЖРО «Железногорский» и подходы к его моделированию. Накопленный опыт позволяет говорить о важности учета тех или иных процессов, происходящих в системе захоронения РАО, их взаимного влияния друг на друга и о необходимости их моделирования в расчетных моделях.

В таблице 1.6 приведены сведения о программах для ЭВМ, использованных при моделировании системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский», выполненном различными организациями.

Таблица 1.6 – Характеристики программ для ЭВМ, использованных различными организациями для обоснования безопасности ПГЗ ЖРО «Железногорский»

Организация	Программа для расчета фильтрации	Программа для расчета переноса	Моделируемый процесс
ВНИИПромтехнологии [33], [36]	Программа для ЭВМ собственной разработки, MODFLOW	Программа для ЭВМ собственной разработки, MT3DMS	Массоперенос
ИГЕМ РАН [33]	Программа для ЭВМ собственной разработки	JDB-МОС (GeoChem Software, Inc., 1995)	
ИАСА [33]	MODFLOW	МОС3D	
ТПУ (М.Б. Букаты) [35]	Программа для ЭВМ собственной разработки (HydroGeo)	Программа для ЭВМ собственной разработки (HydroGeo)	Массоперенос и химические взаимодействия
ИБРАЭ РАН [37]	Программа для ЭВМ собственной разработки (GeRa)	Программа для ЭВМ собственной разработки (GeRa)	Массоперенос

### 1.6 Подход МАГАТЭ к обоснованию долговременной экологической приемлемости захоронения РАО

В требованиях МАГАТЭ по обеспечению безопасности при захоронении РАО [39] не предусмотрено захоронение РАО в жидком виде.

Под глубинным (геологическим) захоронением РАО в [39] принимают захоронение твердых РАО в пункте глубинного захоронения радиоактивных отходов (далее – ПГЗРО), сооруженном в туннелях, камерах или шахтах в конкретной геологической формации (например, с учетом ее долгосрочной

стабильности и гидрогеологических свойств) на глубине, как минимум, нескольких сотен метров от поверхности земли. Такие ПГЗРО предназначены для захоронения твердых ВАО и долгоживущих САО, а также для захоронения отработавшего ядерного топлива, если оно будет рассматриваться в качестве РАО. При этом, согласно [39], в случае наличия соответствующей конструкции ПГЗРО могут приниматься твердые РАО всех типов.

Что касается захоронения РАО в скважинах, то согласно определению, приведенному в [39], это захоронение твердых РАО в ПЗРО, состоящем из комплекса скважин или одной скважины, глубиной от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Такие ПЗРО скважинного типа предназначены для захоронения только сравнительно малых объемов твердых РАО, в частности, отработавших закрытых источников ионизирующего излучения.

Среди различных вариантов захоронения твердых ВАО и отработавшего ядерного топлива МАГАТЭ рассмотрен вариант захоронения в весьма глубоких скважинах глубиной в несколько километров, однако этот тип ПЗРО для захоронения на сегодняшний день не был принят ни одним из государств-членов МАГАТЭ [39].

Стоит отметить, что рекомендации, приведенные в документах МАГАТЭ, были учтены при создании Единой государственной системы обращения с РАО (далее – ЕГС РАО) [40] и дальнейших преобразованиях, направленных на устойчивое развитие ЕГС РАО, обеспечение экологической, социальной, финансовой, международной приемлемости отечественной практики обращения с РАО, в том числе при захоронении ЖРО в глубокие горизонты [41, 42].

Политика и практика обращения с РАО регулярно освещается в Национальных докладах Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами [43, 44].

Объединенная конвенция ратифицирована Российской Федерацией в 2005 г. [45]. Национальные доклады разрабатываются и представляются

в соответствии с требованиями МАГАТЭ [46, 47]. В настоящее время Российской Федерацией разработано и представлено пять национальных докладов [48, 49]. Шестой национальный доклад разработан и будет представлен на Седьмом совещании по рассмотрению в 2022 г. Пятый и Шестой национальные доклады были подготовлены при непосредственном участии автора, в том числе в части вопросов обеспечения безопасности деятельности по обращению с РАО и их захоронению, а также обеспечения безопасности ПГЗ ЖРО при эксплуатации и после закрытия, учета рекомендаций миссии МАГАТЭ [49].

Информация по практике глубинного захоронения ЖРО представлена в Национальных докладах [48, 49] и регулярно вызывает вопросы Договаривающихся сторон [50]. Причиной вопросов является, в том числе, отсутствие данной практики в перечне методов захоронения, перечисленных в [39].

Основными темами вопросов были:

- обоснование долговременной безопасности ПГЗ ЖРО;
- методика оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО;
- используемые расчетные модели для оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО;
- планы по дальнейшему использованию практики глубинного захоронения ЖРО;
- обоснование возможности продления срока эксплуатации ПГЗ ЖРО;
- концепция закрытия ПГЗ ЖРО.

Способ глубинного захоронения ЖРО в скважинах не рассматривается МАГАТЭ в качестве лучших практик. Это стало поводом для предложений российской стороны организовать специальную миссию экспертов МАГАТЭ по оценке безопасности глубинного захоронения ЖРО, которая состоялась в 2012–2013 гг. [48, 49].

В заключении миссии экспертами МАГАТЭ было отмечено [14], что существенных пробелов в подходе к обеспечению безопасности при эксплуатации ПГЗ ЖРО не выявлено. В частности, существует план действий в чрезвычайных ситуациях; эксплуатация проводится с учетом опыта, накопленного за весь период

осуществления практики глубинного захоронения ЖРО, что позволило существенно улучшить режим эксплуатации; система управления эксплуатации представляется адекватной и не требует каких-либо особых изменений.

Следует отметить, что основной целью миссии МАГАТЭ была оценка соответствия процедуры оценки и обоснования безопасности практики захоронения ЖРО рекомендациям документов МАГАТЭ с выдачей заключения о возможности отнесения глубинного захоронения ЖРО к лучшим практикам.

В отношении долговременной безопасности ПГЗ ЖРО экспертами МАГАТЭ было сформулировано несколько замечаний и рекомендаций, к ключевым из которых следует отнести следующие [51]:

а) отсутствие полноты и системности при:

– описании гидрогеологических свойств района и площадки размещения ПГЗ ЖРО (например, наличия быстрых каналов, определения зон разгрузки, наличия гидравлических связей водоносных горизонтов);

– описании геохимических процессов и свойств новообразований (например, устойчивости системы захоронения РАО);

– рассмотрении сценариев эволюции системы захоронения РАО (например, сценариев, учитывающих геологические и климатические изменения);

– рассмотрении путей возможного облучения человека (например, при моделировании сценария «Водоснабжение»);

– определении набора факторов (особенностей, событий и процессов), учитываемых при оценке долговременной безопасности;

б) недостаточный уровень аргументации, в том числе:

– преобладание консервативных расчетов и качественной аргументации (качественные аргументы должны подтверждаться количественными показателями, а консервативные оценки должны быть заменены более реалистичными);

– использование упрощенных параметров гидрогеологической среды, используемой при моделировании миграции компонентов РАО (перенос потока по



водоносному горизонту), – ввиду сложности ПГЗ ЖРО целесообразно использование полноценного 3D-моделирования;

– отсутствие анализа результатов мониторинга в совокупности с результатами моделирования и расчетов;

в) неопределенности должны быть сформулированы и учтены на всех этапах проведения оценки безопасности ПГЗ ЖРО, а экспериментальные исследования должны быть направлены, в том числе, на снижение неопределенностей;

г) отсутствие подробной концепции закрытия ПГЗ ЖРО, включая обоснование:

– выбора материалов для закрытия эксплуатационных скважин;

– отсутствия вертикальной миграции радионуклидов по открытым и негерметичным скважинам;

– длительности периода радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО, а также величины расчетного периода при проведении прогнозных расчетов;

– работоспособности и безопасности скважин, задействованных в проведении мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

На основе анализа и проработки замечаний миссии МАГАТЭ в 2015 г. разработана «Программа 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» и обоснования концепции их закрытия» [48, 49] (далее – Программа). Программа согласована Ростехнадзором и утверждена Госкорпорацией «Росатом» [48, 49, 52].

В разработке программы активное участие принял автор исследования, а поставленные в рамках программы задачи в части научного обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский» стали предметом диссертационного исследования.

Характеризуя результаты миссии МАГАТЭ, в целом можно отметить, что основные вопросы и рекомендации экспертов МАГАТЭ были связаны с принципиальным подходом МАГАТЭ, согласно которому для принятой концепции захоронения РАО решение основных вопросов долговременной безопасности ПЗРО должно быть осуществлено до начала работ по созданию ПЗРО. В Российской Федерации по объективным причинам порядок и сложившаяся ситуация была иной: общие предпосылки безопасности ПГЗ ЖРО были сформулированы, ПГЗ ЖРО были созданы и длительное время безопасно эксплуатировались, а вопросы будущего закрытия ПГЗ ЖРО должны были быть решены в рамках проектной документации закрытия ПГЗ ЖРО, разрабатываемой за пять лет до завершения эксплуатации ПГЗ ЖРО.

#### 1.7 Краткие выводы к главе 1

1) Созданию системы глубинного захоронения ЖРО предшествовала разработка комплексного обоснования их радиационной и природной безопасности преимущественно на этапе эксплуатации, включая установление критериев отбора по характеристикам применяемых геологических формаций и захораниваемых ЖРО, и сформулированы основные принципы обеспечения безопасности ПГЗ ЖРО, которые следует выполнять после закрытия ПГЗ ЖРО. Полноценного обоснования долговременной экологической приемлемости существующей системы ПГЗ ЖРО до настоящего времени не было осуществлено.

2) Опыт эксплуатации ПГЗ ЖРО «Железногорский», накопленный с 1960-х годов, показал, что выбранные характеристики его геологической формации, инженерно-техническая организация деятельности по его эксплуатации, выполнение установленных требований к ЖРО, подлежащих захоронению, – позволили обеспечить его безопасность для человека и окружающей среды на всем этапе его эксплуатации. Для обеспечения экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский» после его закрытия требуется всестороннее обоснование долговременной безопасности системы захоронения РАО на длительный период времени.

3) Необходимость комплексного обоснования безопасности ПГЗ ЖРО обусловлена также теми обстоятельствами, что:

– при оказании услуг по лицензированию деятельности глубинного захоронения Ростехнадзором и Роснедрами были даны рекомендации по совершенствованию оценки долговременной безопасности;

– глубинное захоронение ЖРО не относится к международно признанной практике;

– экспертами миссии МАГАТЭ в 2013 г. был дан ряд рекомендаций относительно совершенствования обоснования его экологической приемлемости на длительный период времени после закрытия ПГЗ ЖРО.

4) Имплементация рекомендаций экспертов миссии МАГАТЭ предполагает использование комплексного подхода к обоснованию долговременной экологической приемлемости исследуемого ПГЗ ЖРО, учитывающего его особенности по сравнению с другими ПГЗ ЖРО, и результаты его рассмотрения миссией МАГАТЭ в качестве референтного в существующей системе ПГЗ ЖРО.

5) С учетом указанных обстоятельств 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:

- разработать алгоритм отбора и определить по нему 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 (глава 2);

- 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 (глава 3);

- определить приемлемые по физико-механическим свойствам тампонажные материалы для обеспечения долговременной устойчивости инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО с учетом проведения анализа изменения их характеристик в конкретных условиях захоронения РАО (глава 3);

- разработать концептуальные положения по обоснованию решений по закрытию ПГЗ ЖРО с учетом его особенностей (глава 4).

## **Глава 2. Разработка системы особенностей, событий и процессов, важных для обоснования долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО**

### **2.1 Методический подход к разработке алгоритма определения факторов (ОСП), важных для долговременной безопасности системы захоронения РАО**

В соответствии с требованиями МАГАТЭ [39] при обосновании безопасности и связанной с ним оценке безопасности необходимо уделять повышенное внимание особенностям, событиям и процессам в районе и на площадке размещения ПЗРО, которые могут оказывать воздействие на безопасность системы захоронения РАО.

Разработка алгоритма отбора ОСП ПГЗ ЖРО осуществлялась в соответствии с рекомендациями SSG-23 [53]. В соответствии с SSG-23 [53] в качестве международно принятого перечня ОСП рекомендуется перечень, разработанный Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (далее – АЯЭ) «Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste» [54], который содержит более 150 ОСП. В дальнейшем на основе концептуального подхода к учету ОСП, сформулированного в [54], и анализа проектов зарубежных стран по сооружению ПЗРО был подготовлен актуальный перечень ОСП [55], который квалифицируется как полный перечень, требующий рассмотрения при обосновании безопасности ПЗРО.

В рамках настоящей диссертационной работы за основу при разработке алгоритма отбора ОСП был принят рекомендованный АЯЭ перечень ОСП [54] с учетом его последующей актуализации [55] по следующим причинам:

- принят на международном уровне, в том числе и МАГАТЭ, и учитывает многолетний опыт проведения оценок долговременной безопасности ПЗРО организациями зарубежных стран;
- содержит базовый перечень ОСП, достаточный для разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО;
- учитывает аспекты, связанные с основными положениями оценки долговременной безопасности (определение целей, временных рамок оценки,

пространственных областей моделирования и т. д.), что позволяет на начальном этапе оценки не упустить ключевые моменты;

- учитывает требования, установленные в НП-055-14 [56] и НП-064-17 [57];
- имеет последовательную структуру.

Необходимым условием при разработке алгоритма отбора ОСП ПГЗ ЖРО является учет положений нормативных правовых актов Российской Федерации (ФНП и РБ), таких как НП-055-14 [56], НП-064-17 [57], РБ-117-16 [58], относящихся к обеспечению и оценке долговременной безопасности ПЗРО, в том числе ПГЗ ЖРО, а также особенностей (условий и характеристик) районов и площадок размещения ПГЗ ЖРО.

Структурно перечень ОСП АЯЭ разделен на четыре основные категории, которые, в свою очередь, содержат соответствующие факторы (виды ОСП) [59] (Рисунок 2.1):

- Категория 0 (основа оценки безопасности) – это факторы (аспекты), определяющие детальность рассмотрения оценки долговременной безопасности ПЗРО. К ним относятся: определение пространственных и временных рамок оценки долговременной безопасности, конечных результатов прогнозных расчетов, используемых подходов (консервативный / реалистичный), регулирующих требований на данном этапе оценки и т. д.;

- Категория 1 (внешние факторы и воздействия) – это набор ОСП, определяющих воздействия на систему захоронения РАО. Эти факторы можно распределять по времени воздействия, а именно: этап выбора площадки (проектирования), этап сооружения, этап эксплуатации, этап закрытия и далее – временные интервалы после закрытия ПЗРО (начальный период, период деградации инженерных барьеров безопасности, срок работоспособности инженерных барьеров безопасности и т. п.);

- Категория 2 (процессы и явления в системе захоронения РАО) – это те факторы, которые в наибольшей степени определяют эволюцию системы захоронения РАО, и связаны, как правило, с физическими, химическими

и биологическими процессами, происходящими в системе захоронения РАО, а также деятельностью человека;

– Категория 3 (факторы миграции радионуклидов) – это факторы, которые характеризуют процессы миграции радионуклидов и других компонентов РАО в системе захоронения РАО и окружающей среде, и в конечном итоге определяют воздействие на окружающую среду и дозовые нагрузки на представителей критической группы населения.



Рисунок 2.1 – Схема категоризации перечня ОСП [60]

Алгоритм отбора ОСП ПГЗ ЖРО включал следующие действия [61]:

– идентификацию (анализ) ОСП – разработку и классификацию полного перечня ОСП, которые охватывают весь спектр явлений и факторов, потенциально влияющих на долговременную безопасность системы захоронения РАО;

– отбор (скрининг) ОСП – определение подмножества наиболее вероятных ОСП, которые индивидуально или в сочетании с другими ОСП влияют на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

Наиболее вероятные (отобранные) ОСП включали в процесс оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО, в первую очередь, в процесс разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО.

Процесс разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО с использованием алгоритма отбора ОСП (анализ и скрининг) представлен на рисунке 2.2.

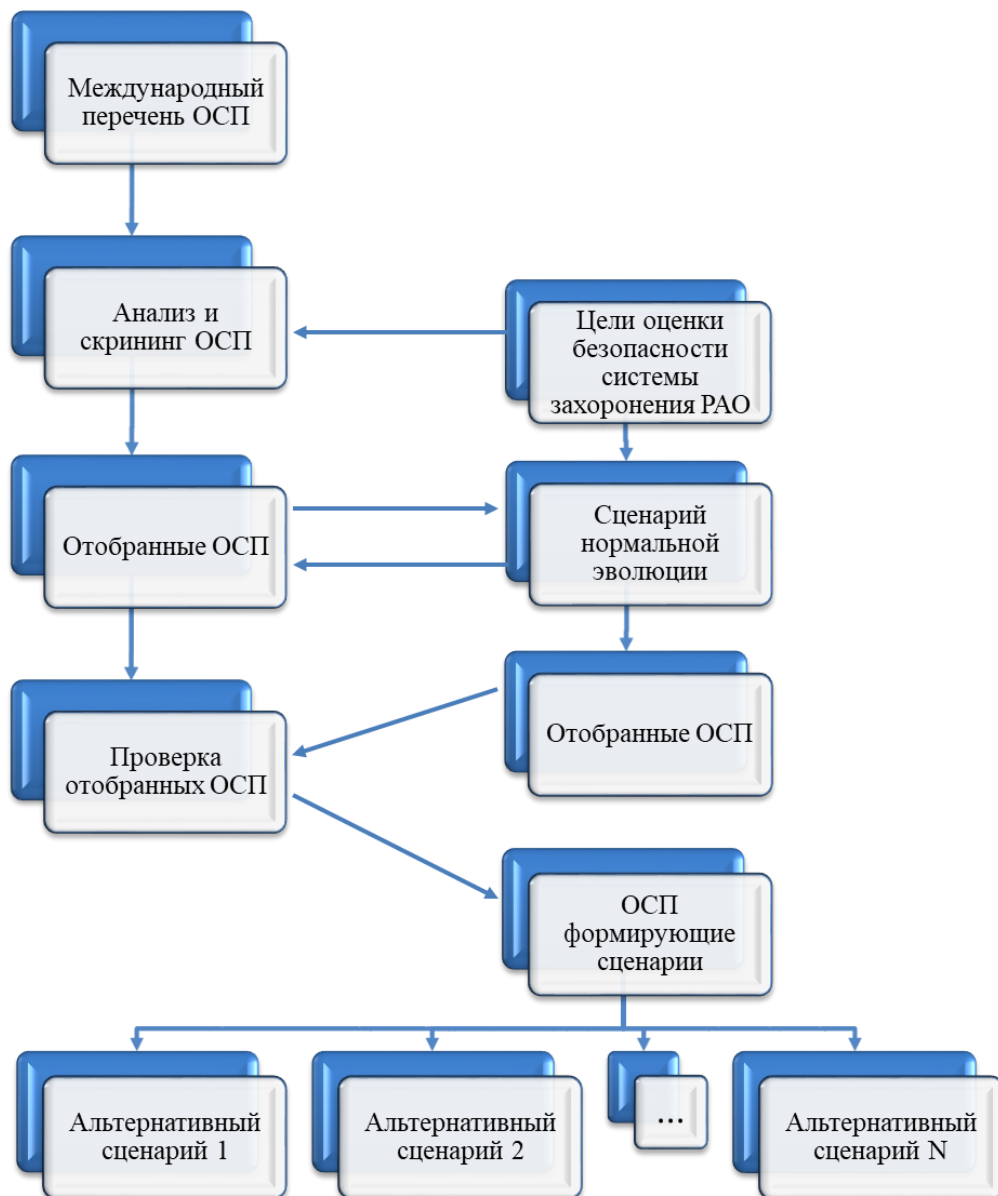


Рисунок 2.2 – Процесс разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО [62]



Исключение ОСП из процесса оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО обосновывали с учетом следующих критериев:

- крайне малая вероятность наступления события или явления;
- незначительные последствия в результате воздействия события или явления на систему захоронения РАО;
- учет ОСП не предусмотрен нормативными требованиями.

С учетом представленных выше процессов разработки сценариев эволюции системы захоронения РАО автором был предложен алгоритм отбора ОСП ПГЗ ЖРО, который приведен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Алгоритм отбора ОСП ПГЗ ЖРО

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».

## 2.2 Определение перечня событий и процессов, важных для обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО

Перечень ОСП АЯЭ [54, 55] разрабатывался для пунктов захоронения твердых РАО, поэтому он не учитывает особенности ПГЗ ЖРО.

В связи с этим перечень ОСП АЯЭ следовало (согласно дифференцированного подхода, рекомендуемого МАГАТЭ) доработать по разработанному алгоритму (раздел 2.1) с учетом особенностей захоронения РАО в ПГЗ ЖРО, а также событий и процессов, которые могут влиять на локализацию компонентов РАО в эксплуатационных горизонтах ПГЗ ЖРО и перенос (миграцию) радионуклидов из системы захоронения в среду обитания человека. Важным вопросом, на который было обращено особое внимание при доработке перечня ОСП АЯЭ, являлось исключение из перечня тех ОСП, которые неприемлемы для ПГЗ ЖРО, исходя из технологических особенностей процесса захоронения РАО, а также из условий и характеристик района и площадки размещения ПГЗ ЖРО «Железногорский».

На первом этапе реализации алгоритма отбора ОСП для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский» был составлен полный перечень ОСП, учитывающий все факторы, потенциально влияющие на эволюцию системы захоронения РАО.

В первую очередь была учтена технологическая особенность самого процесса захоронения РАО, которая состоит в нагнетании ЖРО через специально оборудованные скважины в глубокозалегающие водоносные (эксплуатационные) горизонты, изолированные от земной поверхности мощными слоями практически непроницаемых для компонентов РАО водоупорных горных пород, а также буферным водоносным горизонтом.

Учитывали также следующие особенности технологии захоронения РАО на ПГЗ ЖРО:

- естественным барьером безопасности служит вмещающая горная порода, а конкретнее – локализующие свойства эксплуатационных и буферного горизонтов, а также слабопроницаемых (водоупорных) горных пород;

– инженерными барьерами безопасности служат обсадные колонны скважин, заколонный цементный камень, а также материалы, использующиеся для ликвидации (герметизации) скважин.

На следующем этапе реализации алгоритма был выполнен анализ составленного полного перечня ОСП ПГЗ ЖРО «Железногорский», который состоял в последовательном рассмотрении элементов перечня ОСП и оценке вероятности проявления факторов и уровня их значимости с точки зрения влияния на безопасность системы захоронения РАО.

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.

ОСП исключались из оценки долговременной 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.

Дополнительным критерием было условие, что если ОСП не может быть обоснованно исключен из рассмотрения, то его следует оставить. Консервативно предполагалось, что лучше учесть неважные ОСП, чем пропустить что-то существенное.

Отбор ОСП был разбит на два уровня – первичный и более детальный [61]. В рамках первичного отбора из рассмотрения сразу были исключены ОСП, которые:

1) Не имеют отношения к ПГЗ ЖРО «Железногорский» в силу его географического положения, а также условий и характеристик района и площадки его размещения, среди них оказались:

- вулканическая и магматическая активность;
- гидротермальная активность;
- диагенез;
- соляной диапиризм и растворение солей;
- изменение уровня моря;
- действие теплого климата (тропического и пустынного);
- разработка недр и другие подземные горные работы (вторжение человека);
- разведанные запасы полезных ископаемых;
- близость морей и океанов.

2) Не имеют отношения к ПГЗ ЖРО «Железногорский» в силу технологических особенностей процесса захоронения РАО и характеристик (состава) захораниваемых РАО:

- упаковка РАО и засыпка;
- извлекаемость РАО;
- материалы матриц РАО и их характеристики;
- материалы контейнеров и их характеристики;
- герметизирующие материалы каверн, туннелей и шахт;
- возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления;
- образование летучих веществ, инертных и благородных газов;
- радон и продукты его распада.

Главная задача первичного отбора ОСП состояла в распределении предварительных оценок уровня влияния факторов и частоты (вероятности) проявления для событий или процессов.

Второй уровень отбора ОСП был ориентирован на рассмотрение ОСП, которые могут быть исключены из детального изучения в силу крайне малой вероятности их проявления или низкого уровня влияния на безопасность системы захоронения РАО. Например, крайне малой вероятностью проявления могут характеризоваться такие ОСП, как:

- тектонические движения и орогенез;
- упругая, пластическая и хрупкая деформация;
- метаморфизм;
- климатические изменения в результате деятельности человека;
- взрывы и катастрофы;
- падение метеорита.

Слабое воздействие на систему захоронения РАО могут оказывать факторы, связанные с процессами, происходящими на земной поверхности, такими как:

- эрозия и осадконакопление;
- экологические изменения, связанные с изменением климата;
- исследование площадки без вторжения в систему захоронения РАО;
- деятельность человека на поверхности площадки размещения ПГЗ ЖРО;
- флора;
- фауна.

Последние два ОСП не оказывают воздействия на систему захоронения РАО, однако возможно поступление радионуклидов (компонентов РАО) в растительность, в организмы рыб и животных и, как следствие, в пищевые цепочки, которые, в свою очередь, рассматриваются в рамках оценки доз облучения населения.

К процессам, оказывающим слабое воздействие на систему захоронения РАО, также относили сейсмические явления, так как уровень воздействия землетрясений зависит не только от балльности, но и затухает с глубиной по экспоненциальному закону. Некоторые из процессов, происходящих на земной поверхности, например, изменение гидрологических условий, могут оказать влияние на режим подземных вод, а, следовательно, на состояние системы

захоронения РАО, поэтому не могут быть исключены из рассмотрения просто по факту проявления на поверхности.

В процессе реализации алгоритма отбора ОСП наряду с исключениями ОСП был выявлен факт возможности и целесообразности объединения ряда ОСП, так как они характеризуются одними и теми же явлениями или могут вызвать одинаковые (схожие) последствия. Примером таких ОСП являются:

- непреднамеренные или преднамеренные действия человека;
- буровые работы (вторжение человека в систему захоронения РАО);
- водопользование (скважины, водоемы, плотины).

Данные ОСП могут быть объединены, так как, исходя из технологических особенностей процесса глубинного захоронения ЖРО, все они будут сводиться к одному, а именно – бурению скважины различного назначения в систему захоронения РАО с поднятием на земную поверхность промывочных растворов, шламового (разрушенной в процессе бурения горной породы) и кернового (образцы горной породы) материала, содержащих компоненты РАО, и связанному с этим внешнему облучению человека.

Также целесообразно было объединить следующие ОСП: питание и потребление воды; использование земель и водных ресурсов дикой природы; сельскохозяйственное использование земель и водных ресурсов (включая рыболовство); концентрации радионуклидов в питьевой воде, пище и медикаментах; концентрации радионуклидов в окружающей среде. Объединение основывается на том, что все вышеперечисленные ОСП характеризуются одинаковыми воздействиями и рассматриваются на завершающем этапе оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО, а именно – при определении дозы внутреннего облучения населения.

В результате реализации разработанного алгоритма были отобраны ОСП, важные с точки зрения обоснования безопасности ПГЗ ЖРО, которые использовали при разработке сценариев эволюции системы захоронения. Среди них:

- сценарий нормальной эволюции, отражающий наиболее вероятную (естественную) эволюцию системы захоронения РАО;

– набор альтернативных сценариев, учитывающих события маловероятные, но способные оказать существенное влияние на долговременную безопасность системы захоронения РАО.

При принятии решений по результатам оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО не рассматривали в качестве определяющих сценарии, вероятность которых не может быть адекватно оценена (например, террористический акт, боевые действия), или сценарии, основанные на изменении условий, адекватный прогноз которых в настоящее время не может быть сделан (например, изменение образа жизни и рациона питания населения, повышение безопасности за счет научно-технического прогресса). Подобные расчеты следует рассматривать только как дополнительную информацию.

В рамках диссертационной работы, в соответствии с международной практикой [63], при разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский» учитывали ОСП, вероятность наступления которых больше  $10^{-8}$ /год.

При отсутствии количественных данных о вероятности наступления событий, оказывающих влияние на ПГЗ ЖРО «Железногорский», автором принималась качественная экспертная оценка возможного негативного воздействия события и явления на систему захоронения РАО.

В соответствии со структурой международного перечня ОСП АЯЭ [54, 55] в таблице 2.1 приведено краткое описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», представлены допущения и предположения об эволюции системы захоронения РАО в будущем, которые будут сделаны при обосновании долговременной безопасности системы захоронения рассматриваемого ПГЗ ЖРО, даны рекомендации по учету ОСП.

Следует отметить, что сделанные выводы по учету ОСП для ПГЗ ЖРО «Железногорский» будут во многом справедливы и для всех остальных ПГЗ ЖРО [64].

Таблица 2.1 – Перечень ОСП характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский»

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
0	<b>Основа оценки безопасности</b>	
0.01	Виды воздействия	Внутреннее и внешнее облучение критической группы населения. Радиоактивное загрязнение окружающей среды
0.02	Временные рамки воздействия	В оценке долговременной безопасности приняты следующие временные рамки: от завершения работ по закрытию ПГЗ ЖРО – 100 лет; 100 – 1 000 лет; 1 000 – 10 000 лет; 10 000 – 100 000 лет
0.03	Пространственная область воздействия	Горный отвод недр, площадь проекции горного отвода недр – 44,9 км <sup>2</sup> . Санитарно-защитная зона – 1,8 км <sup>2</sup> , установлена постановлением администрации г. Железногорск от 15.12.2014 № 2463. Области разгрузки эксплуатационных горизонтов
0.04	Принятые допущения о захоронении РАО	Основные предположения (допущения): срок службы инженерных барьеров безопасности для сценария нормальной эволюции и альтернативных сценариев – 300 лет (в период 100 – 300 лет принимается, что происходит линейное изменение коэффициента фильтрации тампонажного материала до 1 м/сут (соответствует коэффициенту фильтрации песка), свыше 300 лет коэффициент фильтрации остается равным 1 м/сут (365 м/год); период контроля (мониторинг системы захоронения РАО и радиационный контроль) после закрытия ПГЗ ЖРО – 100 лет; непреднамеренное вторжение человека в систему захоронения РАО возможно после окончания периода контроля; предполагается потеря знаний о ПГЗ ЖРО после окончания периода контроля
0.05	Принятые допущения о деятельности человека в будущем	Деятельность и поведение человека в будущем является точным отражением настоящего
0.06	Предположения о поведении человека (критической группы населения) в будущем	Варианты деятельности критической группы населения: сельскохозяйственная деятельность; водопользование; непреднамеренное вторжение в систему захоронения РАО
0.07	Допущения о влиянии дозы облучения на эффект	Принята линейная беспороговая зависимость риска стохастических эффектов от дозы облучения



№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
0.08	Цели оценки безопасности	Всестороннее обоснование безопасности ПГЗ ЖРО, подкрепленное доказательствами, результатами моделирования и экспериментальными исследованиями, а также данными мониторинга, подтверждающими непротиворечивость и достоверность прогнозного моделирования миграции радионуклидов из системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО
0.09	Требования регулирующего органа и ограничения	Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии (НП-055-14, НП-058-14, НП-064-17 и др.). Санитарные правила и нормативы (НРБ-99/2009, ОСПОРБ-99/2010 и др.)
0.10	Модель и данные	Оценку долговременной безопасности системы захоронения РАО необходимо выполнять с использованием: консервативного подхода для альтернативных сценариев эволюции системы захоронения РАО; реалистичного подхода для сценариев нормальной эволюции системы захоронения РАО. В рамках реалистичного подхода целесообразно использовать трехмерные геомиграционные и геофильтрационные модели
<b>1</b>	<b>Внешние факторы</b>	
1.1	Пункт захоронения РАО	
1.1.01	Исследование площадки	В период с 1950-х годов проводился комплекс инженерных изысканий, а также физико-химических исследований с целью обоснования возможности размещения и сооружения ПГЗ ЖРО. Дальнейшие исследования и изыскания проводились с целью уточнения полученных характеристик района и площадки размещения ПГЗ ЖРО
1.1.02	Земляные работы / строительство	Сооружение поверхностных и подземных объектов ПГЗ ЖРО осуществлено по проектам в 1960-х годах. Земляные работы проводились при сооружении (строительстве) комплекса поверхностных сооружений, заглублении емкостей и прокладке трубопроводов. Сооружение (бурение) скважин сопровождалось гидроизоляционными работами по оборудованию скважин обсадными колоннами и их крепления тампонажными материалами
1.1.03	Упаковка РАО и засыпка	ОСП не учитывается, так как кондиционирование ЖРО путем их отверждения и размещения в контейнерах (упаковках) не предусмотрено в данной технологии захоронения. ЖРО приводят в соответствие к критериям приемлемости к захоронению на ПГЗ ЖРО
1.1.04	Закрытие и изоляция	Закрытие ПГЗ ЖРО будет осуществляться в соответствии с проектом закрытия ПГЗ ЖРО. Допускается ликвидация отдельных скважин, выработавших эксплуатационный ресурс и

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		(или) имеющих неудовлетворительное техническое состояние, на основании специальных проектов
1.1.05	Записи и маркеры	Картографирование границ ПГЗ ЖРО и внесение их в Единый государственный реестр земель. Маркировка над ликвидированными скважинами в виде указателей и (или) знаков радиационной опасности
1.1.06	Размещение РАО	Захоронение ЖРО производится через нагнетательные скважины в эксплуатационные горизонты. ЖРО захораниваются в два эксплуатационных горизонта: в I эксплуатационный горизонт на глубину 355–500 м – среднеактивные ЖРО, во II эксплуатационный горизонт на глубину 180–280 м – низкоактивные ЖРО. Девять действующих нагнетательных скважин на I эксплуатационный горизонт, три на II эксплуатационный горизонт. Лимит захоронения ЖРО – 100 000 м <sup>3</sup> /год. Всего захоронено по состоянию на конец 2021 г. порядка 7 млн. м <sup>3</sup> ЖРО
1.1.07	Проект пункта захоронения	ПГЗ ЖРО сооружен в 1960-х годах по проектам разработанным ГСПИ-11 (в настоящее время «Головной институт «ВНИПИЭТ») в части поверхностных объектов и ГОСНИПИ-14 (в настоящее время ВНИПИпромтехнологии) – подземные объекты. Реконструкция выполнялась в соответствии с проектной документацией «Реконструкция в связи с продлением проектных сроков эксплуатации ПГЗ ЖРО» (ВНИПИпромтехнологии, 2002 г.) и «Реконструкция и подготовка к выводу из эксплуатации полигона жидких радиоактивных отходов «Северный» федерального государственного унитарного предприятия «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск), Красноярский край», (ВНИПИпромтехнологии, 2009 – 2010 гг.). Корректировка проектной документации была выполнена ВНИПИпромтехнологии в 2014 г. Восемь эксплуатационных скважин были ликвидированы по отдельным проектам
1.1.08	Контроль качества	Контроль качества осуществлялся на всех этапах жизненного цикла ПГЗ ЖРО при сооружении (реконструкции), эксплуатации, а также ликвидации отдельных скважин. Разрабатывались соответствующие документы по качеству (программы обеспечения качества)
1.1.09	График и планирование закрытия пункта захоронения РАО	Планируется разработка и утверждение концепции закрытия ПГЗ ЖРО. На основании данной концепции будет проведено комплексное инженерное и радиационное обследование зданий, сооружений, систем, элементов и оборудования ПГЗ ЖРО, разработана программа (план) закрытия, выполнены необходимые НИОКР и инженерные изыскания, разработана проектная документация закрытия ПГЗ ЖРО, получена необходимая разрешительная документация.

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		Реализация работ по закрытию ПГЗ ЖРО будет осуществляться в соответствии с проектом закрытия ПГЗ ЖРО
1.1.10	Постэксплуатационный контроль	<p>Период постэксплуатационного контроля – 100 лет после закрытия ПГЗ ЖРО.</p> <p>В этот период предпринимаются:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>мероприятия по предотвращению несанкционированного доступа на площадку размещения ПГЗ ЖРО;</li> <li>мониторинг системы захоронения РАО и радиационный контроль.</li> </ul> <p>При необходимости проводятся работы, по созданию дополнительных инженерных барьеров безопасности системы захоронения РАО</p>
1.1.11	Мониторинг пункта захоронения	<p>На ПГЗ ЖРО предусмотрен:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>радиоэкологический мониторинг с целью комплексной оценки влияния ПГЗ ЖРО на экологическую ситуацию в зоне возможного влияния ПГЗ ЖРО;</li> <li>мониторинг состояния недр ПГЗ ЖРО с целью подтверждения безопасности глубинного захоронения, а также локализации РАО в проектных границах;</li> <li>мониторинг состояния естественных и инженерных барьеров безопасности системы захоронения РАО.</li> </ul> <p>Контроль распространения компонентов РАО в эксплуатационных горизонтах осуществляется через систему наблюдательных скважин с применением гидродинамических, гидрохимических и геофизических методов.</p> <p>На ПГЗ ЖРО предусмотрено 132 наблюдательных скважин</p>
1.1.12	Аварии и другие нарушения нормальной эксплуатации	<p>Имевшие место нарушения при эксплуатации ПГЗ ЖРО были связаны с отказами в системах (элементах) и нарушениями регламентных режимов [65].</p> <p>В 1973 г. в целях экономии фонда скважин, нагнетание НАО во II эксплуатационный горизонт выполнялось в одну скважину Н-8 при повышенных давлениях, близких к давлениям гидроразрыва пласта, что привело к ускоренному движению компонентов РАО по зоне гидроразрыва. Давления нагнетания были снижены, была подключена дополнительная нагнетательная скважина, что обеспечило более равномерное заполнение эксплуатационного горизонта.</p> <p>В нагнетательной скважине Н-2, в которую в периодическом режиме удалялись ЖРО повышенной активности в кислой среде, вследствие перекрытия низа лифтовой колонны песчаной пробкой произошла потеря приемистости. После подъема лифтовой колонны и переоборудования устьевого обвязки работоспособность скважины была восстановлена.</p>

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		<p>В 1993 г. было обнаружено ухудшение состояния цементного камня в заколонном пространстве скважин Н-7 и Н-9, использовавшихся для захоронения НАО во II эксплуатационный горизонт. Скважина Н-9 была ликвидирована по специальному проекту. Фильтровая зона скважины Н-7, также по отдельному проекту, была переведена на вышезалегающий буферный горизонт и перепрофилирована в наблюдательную скважину.</p> <p>В 1997 г. при проведении планового обследования в скважине Н-10 было выявлено ухудшение состояния цементного камня в заколонном пространстве за эксплуатационной колонной в интервале 91 – 161 м. В 2002 г. по результатам геофизического контроля технического состояния скважины было подтверждено поступление компонентов РАО по заколонному пространству обсадной колонны из II эксплуатационного горизонта в вышезалегающий слабопроницаемый горизонт Г0 и принято решение о временном прекращении эксплуатации скважины. В 2008 г. был проведен ремонт подземной части нагнетательной скважины: закачка цементного раствора в заколонное пространство обсадной колонны диаметром 219 мм, спуск и цементирование дополнительной обсадной колонны 146 мм. В 2010 г. по данным контрольных наблюдений было вновь установлено ухудшение технического состояния (достижение предельного состояния). В 2015 г. разработан проект ликвидации скважины Н-10, который, после внесения соответствующих изменений в лицензию Ростехнадзора, был реализован в 2021 г.</p> <p>В период эксплуатации ПГЗ ЖРО происходили отказы поверхностного оборудования – прежде всего запорно-регулирующих устройств трубопроводов, течи в местах установки датчиков контрольно-измерительных приборов и автоматики, и т. д.</p> <p>Данные события не привели к значимому загрязнению площадки размещения ПГЗ ЖРО</p>
1.1.13	Возможность извлечения РАО	ОСП не учитывается, так как технология глубинного захоронения ЖРО не предусматривает извлечения РАО из эксплуатационных горизонтов
1.2	Геологические события и процессы	
1.2.01	Тектонические движения и орогенез	ОСП не учитывается, так как ПГЗ ЖРО расположен в районе со спокойным тектоническим режимом, где катастрофические тектонические явления не прогнозируются на период 100 000 лет [21]
1.2.02	Упругая, пластическая и хрупкая деформация	ОСП не учитывается, так как упругая и пластическая деформация, хрупкое разрушение не выявлены и не ожидаются в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО. На период до 100 000 лет не прогнозируется активизация Правобережного тектонического нарушения (разлома). Непосредственно в зоне тектонического нарушения, в зоне крутого загиба слоев, сплошность песчаных горизонтов нарушается, а слои пластичных глин вытягиваются по

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		плоскости нарушения без разрыва сплошности и разобщают водоносные горизонты опущенного и поднятого блоков. Тектоническое нарушение (Правобережный разлом) на период до 100 000 лет будет являться изолирующей границей, которая будет препятствовать распространению компонентов РАО по направлению на запад в сторону реки Енисей
1.2.03	Сейсмичность	ОСП не учитывается, так как землетрясения не будут оказывать значимого воздействия на скважины и эксплуатационные горизонты (систему захоронения РАО) ПГЗ ЖРО. Сейсмическая интенсивность района и площадки размещения ПГЗ ЖРО на период до 100 000 лет не будет превышать интенсивность максимального расчетного землетрясения и останется в пределах 7,0 баллов [21]
1.2.04	Вулканическая и магматическая активность	ОСП не учитывается, так как вулканы в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО отсутствуют, их возникновение, а также возникновение связанных с ними опасных внешних воздействий на ПГЗ ЖРО не прогнозируется в период до 100 000 лет [21]
1.2.05	Метаморфизм	Метаморфизм в ближайшие 100 000 лет не прогнозируется [21]. Возможно развитие метасамотических процессов в эксплуатационных горизонтах, которые приводят к увеличению содержания глинистых минералов (техногенное минералообразование) и будут дополнительно способствовать переходу макрокомпонентов РАО и радионуклидов в твердую фазу
1.2.06	Гидротермальная активность	ОСП не учитывается, так как в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО отсутствуют гидротермальные месторождения и гидротермальные процессы [21]
1.2.07	Эрозия и отложения	ОСП не учитывается, так как оползневые склоны на площадке размещения ПГЗ ЖРО и в местах расположения поверхностных объектов (здания, сооружения, емкости, трубопроводы) отсутствуют, происходящие на поверхности оползневые процессы не воздействуют на систему захоронения РАО. Современные геологические процессы, такие как оползни, обвалы, разрушение берегов и карстовые явления в радиусе нескольких десятков километров от площадки размещения ПГЗ ЖРО не наблюдаются. Прогнозируемые аккумулятивные процессы будут происходить со скоростью, не превышающую современную – не более $10^{-2}$ мм/год. Мощность накопленных осадков за следующие 100 000 лет не превысит 1 м
1.2.08	Диагенез	ОСП не учитывается, так как в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО осадочные отложения претерпели стадию диагенеза, находясь в настоящее время в процессе катагенеза.

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
1.2.09	Соляной диапиризм и растворение солей	ОСП не учитывается, так как по данным геологического изучения в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО отсутствуют соляные пласты, способные привести к развитию соляного диапиризма
1.2.10	Гидрологическая/гидрогеологическая реакция на геологические изменения	Возможно поднятие области питания на юге Тельской впадины и опускание участка частичной разгрузки эксплуатационных горизонтов на севере в долине реки Большая Тель, возможно увеличение угла падения пород и, как следствие, возрастание скорости естественного потока подземных вод
1.3	Климатические события и процессы	
1.3.01	Глобальные изменения климата	Глобальные изменения климата окажут влияние на режим и состав поверхностных вод (прямое влияние) и подземных вод (опосредованное влияние при изменении параметров питания и разгрузки водоносных горизонтов)
1.3.02	Региональное и местное изменение климата	Изменение климатических параметров (температуры и осадков) в районе размещения ПГЗ ЖРО приведет к изменению режима и состава поверхностных и подземных вод, а также может привести к образованию многолетнемерзлых пород
1.3.03	Изменение уровня моря	ОСП не учитывается в связи с удаленностью района размещения ПГЗ ЖРО от морей и океана, а также в связи с высокими абсолютными отметками площадки размещения ПГЗ ЖРО
1.3.04	Перигляциальные процессы	Прогнозируется образование многолетнемерзлых пород рассмотрено в рамках ОСП 1.3.01 и 1.3.02
1.3.05	Эффекты, связанные с действием ледника и ледяного щита (локальные)	ОСП не учитывается, так как обширное покровное оледенение середины четвертичного периода не распространялось до района размещения ПГЗ ЖРО
1.3.06	Действие теплого климата (тропического и пустынного)	ОСП не учитывается, так как тропический и пустынный климат может сформироваться через длительный период времени, который находится вне временных рамок оценок долговременной безопасности системы захоронения РАО
1.3.07	Гидрологическая/гидрогеологическая реакция на климатические изменения	Прогнозируется изменение объема речного стока как реакция на климатические изменения (смотри ОСП 1.3.01)
1.3.08	Экологические изменения, следующие за изменениями климата	ОСП не учитывается, так как экологические изменения не оказывают значительного влияния на систему захоронения РАО

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
1.3.09	Изменение жизнедеятельности человека в связи с климатическими изменениями	ОСП не учитывается. Изменение климата может привести к миграции населения, изменению режимов землепользования и водопользования. При разработке сценариев эволюции системы захоронения РАО можно сделать допущение, что деятельность и поведение человека в будущем является точным отражением настоящего (смотри ОСП 0.05)
1.4	Деятельность человека в будущем	
1.4.01	Влияние человека на климат	ОСП не учитывается. Деятельность человека будет оказывать наиболее сильное влияние на изменение климата в период до 2100 г., в основном в результате эмиссии парниковых газов. Прогнозируется стабилизация антропогенного изменения температуры («аномалии» $\Delta T$ относительно естественного тренда) после 2100 г. на уровне до $\Delta T = +5,5$ °C с последующим относительно быстрым снижением антропогенной «аномалии» с декрементом порядка 1 °C/100 лет. На временном интервале более 1 000 лет (после 3100 г.) вкладом антропогенной составляющей в естественные вариации глобальной температуры и осадков можно пренебречь [66, 67]
1.4.02	Непреднамеренные/преднамеренные действия человека	Непреднамеренные действия человека могут быть связаны с потерей в будущем знаний о системе захоронения РАО, что может привести к таким сценариям непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО, как бурение скважин на воду и т. п. Сценарии, связанные с бурением скважин после закрытия ПГЗ ЖРО рассматриваются в ОСП 1.4.04
1.4.03	Исследование площадки без вторжения в систему захоронения РАО	ОСП не учитывается, так как исследование поверхности площадки размещения ПГЗ ЖРО после закрытия не повлияет на систему захоронения РАО
1.4.04	Буровые работы (вторжение человека)	Проведение буровых работ учитывается в рамках рассмотрения сценариев непреднамеренного вторжения человека в систему захоронения РАО. Последствием бурения скважин или проведения горных работ может быть загрязнение поверхности на участке размещения горной выработки или скважины, разреза выше эксплуатационного горизонта по стенкам выработки, облучение персонала
1.4.05	Разработка недр и другие подземные горные работы (вторжение человека)	ОСП не учитывается, так как отсутствуют предпосылки для разработки недр и ведения подземных горных работ на площадке размещения ПГЗ ЖРО
1.4.06	Деятельность человека на поверхности площадки	ОСП не учитывается, так как поверхностные здания и сооружения, даже с заглубленными фундаментами, не повлияют на систему захоронения РАО

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
1.4.07	Водопользование (скважины, водоемы, плотины)	Бурение скважин для добычи подземных вод рассмотрено в рамках ОСП 1.4.04. Использование поверхностных вод, в которые возможна разгрузка эксплуатационных горизонтов, критической группой населения (сельскохозяйственная деятельность, рыболовство и т. д.) может привести к дополнительному внутреннему и внешнему облучению
1.4.08	Социальное и административное развитие	При потере обществом информации о системе захоронения РАО, возможна реализация сценариев непреднамеренного вторжения человека. Смотри ОСП 1.4.04
1.4.09	Технологическое развитие	ОСП не учитывается. Сценарий технологического развития общества не является консервативным, так как подразумевает полное сохранение информации о системе захоронения РАО
1.4.10	Восстановительные работы	ОСП не учитывается, так как восстановительные работы после закрытия ПГЗ ЖРО не предусматриваются
1.4.11	Внешние взрывы и падения летательного аппарата	ОСП не учитывается, так как частичное разрушение инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО, вследствие внешних воздействий, вызванных взрывами и крушениями, может произойти в верхней части скважин и не приведет к ухудшению изолирующих свойств системы захоронения РАО
1.5	Прочие факторы	
1.5.01	Падение метеорита	ОСП не учитывается, так как вероятность падения метеорита, способного вызвать разрушение естественных и инженерных барьеров безопасности системы захоронения РАО, по экспертным оценкам крайне мала и составляет $10^{-9}$ /год
1.5.02	Эволюция видов	ОСП не учитывается, так как оценить ее влияние на систему захоронения РАО не представляется возможным
1.5.03	Другие внешние факторы неуставленного характера	ОСП не учитывается
<b>2</b>	<b>Область системы захоронения: факторы окружающей среды</b>	
2.1	РАО и инженерные барьеры безопасности (далее - ИББ)	
2.1.01	Состав, радионуклиды и другие элементы	Радионуклидный состав ЖРО известен, ЖРО соответствуют критериям приемлемости для захоронения в ПГЗ ЖРО (раздел 1.4)
2.1.02	Материалы матриц РАО и их характеристики	ОСП не учитывается, поскольку технология глубинного захоронения ЖРО не предусматривает использование матричных материалов
2.1.03	Материалы контейнеров РАО и их характеристики	ОСП не учитывается, поскольку технология глубинного захоронения ЖРО не предусматривает использование контейнеров



№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.1.04	Буферные материалы и материалы засыпки	ОСП не учитывается, так как в технологии глубинного захоронения ЖРО не применяются буферные материалы и материалы засыпки
2.1.05	Герметизирующие материалы пустот, туннелей и шахт	ОСП не учитывается, так как в технологии глубинного захоронения ЖРО не применяются туннели и шахты
2.1.06	Другие инженерные материалы и их характеристики	<p>Эксплуатационная, фильтровая, лифтовая колонны нагнетательных скважин выполнены из сталей марок X18H10T и «Д». Крепление скважин осуществлялось тампонажным цементом для холодных скважин (согласно действующем на тот момент стандартам).</p> <p>При ликвидации эксплуатационных скважин используются тампонажные материалы – цементы, аналогичные природным материалам, способные сохранять свои изолирующие свойства в недрах в течение длительных периодов времени.</p> <p>Ухудшение изолирующей способности цементного камня в заколонном пространстве скважины в нескольких интервалах водоупорных пород, отделяющих эксплуатационный горизонт от верхних горизонтов и земной поверхности, может привести к возникновению перетока компонентов РАО</p>
2.1.07	Механические процессы и условия (в РАО и ИББ)	Механические процессы в системе захоронения РАО возможны только вследствие геологических процессов. Смотри ОСП 2.2.06
2.1.08	Гидравлические/гидрогеологические процессы и условия (в РАО и ИББ)	<p>При нагнетании ЖРО в эксплуатационных горизонтах формируются области повышенных давлений (купол репрессии), который после прекращения захоронения расформировывается. Внешние гидравлические/гидрогеологические воздействия на ЖРО в системе захоронения РАО возникают при изменении уровня режима рек и условий питания эксплуатационных горизонтов. Смотри ОСП 1.2.10 и 1.3.07</p>
2.1.09	Химические/геохимические процессы и условия (в РАО и ИББ)	<p>ОСП учтен при определении и прогнозировании остаточного ресурса ИББ – обсадных колонн эксплуатационных скважин. Химические и геохимические процессы сопряжены с изменением pH и коррозионным воздействием на материалы ИББ.</p> <p>На ПГЗ ЖРО захораниваются нейтральные НАО и щелочным САО. Общая коррозия обсадных труб нагнетательных скважин из нержавеющей стали (X18H10T) при контакте с кислыми ЖРО составляет 0,01 мм/год. При контакте со щелочными растворами ЖРО коррозия труб из углеродистой стали (Д) (оборудованы в основном наблюдательные скважины) не превышает 0,1 мм/год.</p> <p>Подземные воды водоносных горизонтов ПГЗ ЖРО относятся к гидрокарбонат-натриевому типу, маломинерализованы, не содержат агрессивных компонентов, среда нейтральная или слабощелочная [68]</p>

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.1.10	Биологические/биохимические процессы и условия (в РАО и ИББ)	Учтен в ОСП 3.2.06
2.1.11	Термические процессы и условия (в РАО и ИББ)	<p>Максимальный контролируемый разогрев эксплуатационного горизонта связан с захоронением тепловыделяющих РАО (ЖРО повышенной активности в кислой среде) и отмечается в нагнетательных скважинах Н-2 (до 164 °С), Н-3 (до 134 °С), Н-4 (до 53 °С). Повышенная температура в этих скважинах в водоупорном горизонте Б приурочена к его подошве и объясняется общим прогревом водоупорных отложений за счет разогрева эксплуатационного горизонта и конвекцией подземных вод в скважинах.</p> <p>Разогрев геологической среды происходит за счет энергии, выделяющейся при радиоактивном распаде. Как показывают расчеты и опыт наблюдений, через несколько лет после прекращения захоронения тепловыделяющих РАО (ЖРО повышенной активности в кислой среде) происходит снижение температуры. Разогрев при захоронении щелочных САО и НАО не значителен. При прогнозировании процессов в системе захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО целесообразно учитывать изменение (уменьшение) температуры геологической среды [69]. Учтен в ОСП 2.1.13</p>
2.1.12	Газообразование (в РАО и ИББ)	<p>Газовыделение отмечается, как правило в скважинах Н-2, Н-3, Н-5, А/Н-12. В составе газа доминирует азот от 77,9 до 98,3 %, содержание углекислого газа составляет от &lt; 0,2 до 9,2 %, содержание водорода изменяется от &lt; 0,001 до 0,063 %. Основные источники газообразования: последствия взаимодействия захороненных ЖРО, повышенной активности в кислой среде, с породой эксплуатационного горизонта; радиационно-химическое разложение водных растворов; жизнедеятельность денитрифицирующих микроорганизмов. Все перечисленные источники, кроме радиолитического, действуют на достаточно ограниченном интервале времени. Интенсивность радиолитического снижается со временем в связи с распадом захороненных ЖРО повышенной активности в кислой среде. Объемы и состав образующихся при этом газов могут быть оценены из балансовых представлений о протекающих процессах [69, 70]. Учтен в ОСП 2.1.13</p>
2.1.13	Радиационные эффекты (в РАО и ИББ)	В результате воздействия излучения радионуклидов, содержащихся в ЖРО, могут произойти изменение состава подземных вод и изменение вмещающих горных пород (радиолитические процессы). В результате радиолитического могут образоваться едкие вещества, которые ускоряют коррозию обсадных колонн эксплуатационных скважин
2.1.14	Возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления	ОСП не учитывается, так как протекание самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления невозможно ввиду низких значений концентраций ядерно-опасных делящихся нуклидов в эксплуатационных горизонтах. На систему захоронения РАО неоднократно

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		выдавались заключения о ядерной безопасности, разрабатываемые специализированной организацией
2.2	Геологическая среда	
2.2.01	Вмещающие породы, нарушенные при горных выработках	ОСП не учитывается. При проходке (бурении) эксплуатационных скважин происходит нарушение пород, включая водоупорные горизонты. При оборудовании скважин обсадными колоннами гидроизоляция восстанавливается путем цементирования межколонного и заколонного пространства скважин
2.2.02	Вмещающие породы	I эксплуатационный горизонт: пески от крупно- до тонкозернистых; II эксплуатационный горизонт: конгломераты, графелиты, пески
2.2.03	Другие горные породы	Осадочный чехол неоген-четвертичных отложений: галечники, пески, супеси, суглинки и глины. III буферный горизонт: пески рыхлые, тонко- мелкозернистые, реже средне- крупнозернистые кварц-полевошпатовые с прослоями глин. Водоупоры: Д – глины аргиллитоподобные, белесые, в кровле пятнистой окраски (кора выветривания), с прослоем песков (5-10 м) в средней части; Г – глины аргиллитоподобные, углистые; В – глины аргиллитоподобные зеленовато-серые с маломощными прослоями песков, песчаников и алевролитов, локально углистые, в восточном и северо-восточном направлении существенно опесчаниваются; F – глины зеленые и серо-зеленые, аргиллитоподобные, жирные (маркирующий горизонт), в восточном направлении существенно опесчаниваются; Б – глины аргиллитоподобные, сероцветные, с прослоями песков, песчаников и алевролитов; А – дресвяно-щебнистый выветрелый материал, в разной степени каолинизированный, ниже постепенно переходящий в каолиновые глины и конгломерато-брекчии на известковистом цементе спорадического распространения; ARat – биотитовые гнейсы, плагиогнейсы, амфиболиты, сланцы
2.2.04	Крупные нарушения сплошности пород (геосфера)	В связи с литолого-фациальной невыдержанностью пород осадочного чехла и наличием тектонических нарушений, район размещения ПГЗ ЖРО отличается сложными гидрогеологическими условиями. Важную роль играет тектоническое нарушение (Правобережный разлом), которое является основным природным барьером на пути распространения компонентов РАО в сторону

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		реки Енисей. Непосредственно в зоне тектонического нарушения, в зоне крутого загиба слоев, сплошность песчаных горизонтов нарушается, а слои пластичных глин вытягиваются по плоскости нарушения без разрыва сплошности и разобщают водоносные горизонты опущенного и поднятого блоков. Анализ имеющихся данных не дает оснований утверждать о наличии «фильтрационных окон»
2.2.05	Характеристики путей переноса загрязняющих веществ (в геосфере)	Перенос компонентов РАО в эксплуатационных горизонтах до области разгрузки происходит с потоком подземных вод. В случае деградации ИББ системы захоронения РАО возможны вертикальные перетоки загрязненных компонентами РАО подземных вод в вышележащие горизонты. Учен в ОСП 2.1.06 и 2.2.07
2.2.06	Механические процессы и условия (в геосфере)	Учитываются механические процессы и изменение распределение напряжений в породах, составляющих геологические единицы в области размещения РАО, и их эволюция во времени.
2.2.07	Гидравлические/гидрогеологические процессы и условия (в геосфере)	Перенос компонентов РАО потоком подземных вод. I эксплуатационный горизонт достигает мощности 85 м, наибольшая глубины кровли горизонта в центральной часть участка (410–415 м), в северной часть участка (425–440 м). Водоносный горизонт характеризуется высоким напором подземных вод (до 360–370 м). Коэффициенты водопроницаемости по данным опытных работ колеблются от 12 до 108 м <sup>2</sup> /сут. II эксплуатационный горизонт достигает мощности 45 м, наибольшая глубины залегания кровли (150 м) и подошвы (245 м). Высота пьезометрического напора изменяется от 62 до 147 м в центральной части синклинали до 12–73 м на периферии участка. В центральной части участка коэффициент водопроницаемости достигает 19–30 м <sup>2</sup> /сут. Максимальные значения коэффициента водопроницаемости горизонта (до 50–130 м <sup>2</sup> /сут) зафиксированы в долине реки Большая Тель
2.2.08	Химические/геохимические процессы и условия (в геосфере)	При поступлении ЖРО в эксплуатационный горизонт образуется сложная система компоненты РАО – вмещающая порода – подземные воды. В системе захоронения РАО между водными растворами (компоненты РАО и подземные воды) и вмещающими породами протекают многочисленные и разнообразные процессы растворения, окисления, ионного обмена, сорбции, десорбции, комплексообразования, химического разложения, переноса вещества, минералообразования и т. д. Геохимические процессы определяют миграционные свойства радионуклидов
2.2.09	Биологические/биохимические процессы и условия (в геосфере)	Учен в ОСП 3.2.06
2.2.10	Термические процессы и условия (в геосфере)	Учен в ОСП 2.1.13

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.2.11	Газообразование (в геосфере)	Учтен в ОСП 2.1.13
2.2.12	Не выявленные элементы (в геосфере)	ОСП не учитывается
2.2.13	Добыча полезных ископаемых	ОСП не учитывается, так как в районе и на площадке размещения ПГЗ ЖРО нет разведанных месторождений полезных ископаемых
2.3	Поверхностные условия	
2.3.01	Топография и морфология	<p>Площадка размещения ПГЗ ЖРО расположена в «треугольнике» Енисей-Канского междуречья – зоне сочленения трех крупных орографических районов: юго-восточной окраины Западно-Сибирской равнины, Енисейского кряжа, относящегося к Средне-Сибирскому плоскогорью, и хребта Восточный Саян. ПГЗ ЖРО занимает наиболее низкое северное окончание этого «треугольника», приуроченное к бассейну нижнего течения реки Большая Тель. Данная местность носит название «долины Черского» и соответствует древней эрозионно-тектонической впадине, выполненной мощной толщей песчано-глинистых отложений юрского возраста. Борты «долины Черского» резко возвышаются над ее дном. Долины рек слабо выражены и борты их незаметно переходят в склоны водоразделов. Долины рек имеют асимметричную U-образную и корытообразную форму шириной от 50 м до 1 км и почти повсеместно заболочены. Естественной границей между Западно-Сибирской равниной и Енисейским кряжем является река Енисей, которая пересекает Восточно-Саянские горы и протекает в пределах рассматриваемого района с юго-запада на северо-восток.</p> <p>В геолого-геоморфологическом отношении описываемая территория представляет собой предгорную эрозионно-денудационную и эрозионно-аккумулятивную равнины с абсолютными высотами 116–450 м, приуроченные к южной части Красноярского края и расположенные в среднем течении реки Енисей</p>
2.3.02	Почвы	<p>Почвенный покров южной оконечности Енисейского кряжа маломощный и хрящеватый. На большей части территории преобладают горно-таежные кислые неподзолистые почвы, по долинам рек – дерново-подзолистые на рыхлых отложениях.</p> <p>На территориях, прилегающих к площадке размещения ПГЗ ЖРО, отсутствуют пастбища для скота, пахотные земли и земли для другой сельскохозяйственной деятельности.</p> <p>ОСП не учитывается</p>
2.3.03	Водоносные горизонты и водовмещающие породы (приповерхностные)	Над эксплуатационными горизонтами ПГЗ ЖРО, в которых локализованы компоненты РАО, присутствуют водоносные горизонты, содержащие пресные воды. Поступление компонентов РАО в водоносные горизонты и последующее облучение человека в результате

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		водопользования из данных горизонтов возможно в случае возникновения вертикальный переток компонентов РАО или проведения буровых работ
2.3.04	Озера, водотоки (реки, ручьи)	В гидрологическом отношении район размещения ПГЗ ЖРО относится к средней части бассейна реки Енисей. Второй по многоводности рекой на территории вблизи ПГЗ ЖРО является река Кан, которая протекает по северной границе. Река Большая Тель с притоком реки Малая Тель является третьей по величине и многоводности на данной территории
2.3.05	Элементы береговой полосы	ОСП не учитывается, так как процессы эрозии, вызванные воздействием реки Енисей, не приведут к ухудшению изолирующих свойств системы захоронения РАО
2.3.06	Близость морей и океанов	ОСП не учитывается. Расстояние от ПГЗ ЖРО до ближайшего моря (Карское море, залив Обская губа) составляет более 1 500 км. Смотри ОСП 1.3.03
2.3.07	Атмосфера	<p>Район размещения ПГЗ ЖРО находится на юго-западе Средней Сибири, характеризуется резко континентальным климатом с достаточно жарким летом и холодной зимой. Континентальное расположение и вторжение арктических воздушных масс приводит к большой изменчивости погодных условий, сопровождающихся как сильной неустойчивостью с резким падением давления, значительной облачностью, осадками, так и очень устойчивой погодой с низкими температурами воздуха и мощными приземными инверсиями.</p> <p>В районе размещения ПГЗ ЖРО наблюдаются [71]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- туманы (наибольшее число дней с туманами – 52 дня, продолжительность 0,6–17,6 часов);</li> <li>- грозы (в среднем за год 21 гроза, продолжительность 0,5 – 2 часов, скорость ветра достигает до 20 м/с);</li> <li>- град (в среднем за год 1–3 дня, величина зерен не более 5 мм (наблюдались 20–40 мм), продолжительность 5–7 минут);</li> <li>- гололед, изморозь (гололед наблюдается 2-3 дня, продолжительностью 5 часов; в среднем за год наблюдается 17 дней с изморозью, продолжительностью 95 часов);</li> <li>- метели (в среднем за год наблюдается 29 дней с метелями, продолжительностью 4,8 часа (максимальная, наблюдаемая в районе, достигала 72 часа);</li> <li>- пылевые бури (в среднем за год 4–5 дней, продолжительность 1,6 часа (максимальная, наблюдаемая в районе, достигала 10,5 часов), скорость ветра достигает 10–15 м/с).</li> </ul> <p>ОСП не учитывается</p>
2.3.08	Флора	ОСП не учитывается, так как флора не повлияет на систему захоронения РАО
2.3.09	Фауна	ОСП не учитывается, так как фауна не повлияет на систему захоронения РАО

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.3.10	Метеорологические условия	<p>Параметры основных климатических характеристик определены по данным ближайших метеостанций [71]. Среднегодовая температура воздуха составляет плюс 0,5 °С. Наиболее холодный месяц – январь, среднемесячная температура воздуха равна минус 18,3 °С, абсолютный минимум достигал минус 55 °С. В среднем за год отмечается 13–15 непрерывных периодов с температурой минус 30 °С и ниже, средняя непрерывная продолжительность которых составляет 4–7 дней. Самый жаркий месяц – июль, среднемесячная величина температуры воздуха равна 19,4 °С, абсолютный максимум составил плюс 40 °С.</p> <p>Среднегодовая относительная влажность воздуха – 68 %. Годовая норма осадков – 486 мм, из которых 112 мм (23 %) выпадает в холодный (ноябрь – март), 374 мм (77 %) – в теплый (апрель – октябрь) периоды года. Наблюденный суточный максимум осадков – 97 мм, расчетной обеспеченностью 1 % – 111,3 мм. Средняя из наибольших глубин промерзания почвы составляет 175 см, наибольшая в малоснежные зимы составляет 253 см, наименьшая – 128 см. Средняя многолетняя сумма атмосферных осадков равна 479 мм/год. В различные годы по водности годовые величины осадков могут меняться в пределах 270–760 мм/год.</p> <p>Вероятные изменения среднегодовой температуры воздуха и среднегодовой суммы осадков в районе размещения ПГЗ ЖРО (проекции на 100 000 лет) приняты по данным [67].</p> <p>Учтен в ОСП 1.3.01 и 1.3.02</p>
2.3.11	Гидрологический режим и водный баланс	<p>Учитывается гидрологический режим рек Енисей, Кан, Большая Тель, Малая Тель.</p> <p>Река Енисей в пределах района течет в хорошо разработанной долине. Ширина основного русла составляет 500–1 800 м, глубина 3–7 м, скорость течения до 1,5 м/сек.</p> <p>Река Кан впадает в реку Енисей в 10 км ниже по течению от границы горного отвода ПГЗ ЖРО, в своем нижнем течении имеет долину шириной 6–9 км.</p> <p>Река Большая Тель с правым притоком Малая Тель является третьей по величине и многоводности рекой, которая протекает вдоль границы горного отвода ПГЗ ЖРО, огибая его с северной и северо-восточной стороны. Река Большая Тель более других рек связана с деятельностью ПГЗ ЖРО, так как обусловлена дренирующим влиянием реки на залегающие наиболее близко к дневной поверхности водоносные горизонты, развитые на площадке размещения ПГЗ ЖРО</p>
2.3.12	Эрозия и отложения	<p>ОСП не учитывается, так как процессы эрозии и осадения не приведут к ухудшению изолирующих свойств системы захоронения РАО. При этом в районе размещения ПГЗ ЖРО могут происходить эрозионные процессы, которые приведут к медленному разрушению горных пород, расчленению рельефа, а также аккумулятивные процессы, которые будут выражаться в накоплении осадков на поверхности земли</p>

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.3.13	Экологические/биологические/микробиологические системы	Экологические системы не учитываются, так как не оказывают значительного влияния на систему захоронения РАО. Учет биологических/микробиологических систем рассмотрен в ОСП 3.2.06
2.4	Поведение человека	
2.4.01	Характеристики человека (физиология, метаболизм)	Отличительные особенности населения, проживающего в районе размещения ПГЗ ЖРО, отсутствуют. Воздействие захоронения ЖРО на человека может произойти через тысячи лет, за этот период времени деятельность человека может существенно измениться
2.4.02	Взрослые, дети, младенцы и другие группы	Смотри ОСП 2.4.01
2.4.03	Питание и потребление воды	Рацион питания критической группы населения района размещения ПГЗ ЖРО определяется сельскохозяйственными продуктами – зерновыми и мясомолочными, собранными ягодами и грибами, а также потреблением мяса рыб и диких животных, которые могут быть загрязнены радионуклидами. Источником воды для критической группы населения являются реки Енисей, Кан, Большая Тель, Малая Тель, в которые прогнозируется разгрузка эксплуатационных горизонтов ПГЗ ЖРО.
2.4.04	Поведение людей (не связанные с питанием)	Привычки человека связаны со временем, которое проводит человек в различных местах, занимаясь теми или иными видами деятельности. Привычки могут быть связаны с сельскохозяйственной практикой и такими человеческими факторами, как культура, религия, экономика и технологии. Дополнительное радиационное воздействие на критическую группу населения может быть связано с купанием в реке
2.4.05	Характеристики сообщества	В 20-километровую зону вокруг ПГЗ ЖРО входят 14 населенных пунктов, из них один город (г. Железногорск) и 13 сельских поселений. Распределение населения в районе крайне неравномерное. Восточные и юго-восточные территории практически не заселены и не имеют постоянного населения. Максимальная плотность населения приходится на юго-западную область, где расположен г. Железногорск. Средняя плотность населения ~ 39 чел./км <sup>2</sup> . Городское население составляет примерно 130 000 человек, в том числе в г. Железногорск проживает 82 591 человек, в поселке городского типа Подгорный – 6 376 человек, в г. Сосновоборск – 41 080 человек. Численность сельского населения составляет около 18 000 человек. Население ближайшего к ПГЗ ЖРО закрытого административного территориального образования г. Железногорск, с включенными в его состав населенными пунктами Тартат, Додоново, Новый путь и Шивера, составляет около 93 000 человек [71]
2.4.06	Обработка и приготовление пищи и воды	Смотри ОСП 2.4.01, 2.4.03



№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
2.4.07	Местожителство	Смотри ОСП 2.4.05
2.4.08	Использование земель и водных ресурсов дикой природы	Смотри ОСП 2.4.03
2.4.09	Сельскохозяйственное использование земель и водных ресурсов (включая рыболовство)	Смотри ОСП 2.4.03 и 2.4.04
2.4.10	Городское и промышленное использование земель и водных ресурсов	Городское и промышленное использование земель возможно в будущем при утрате информации о системе захоронения РАО. Источником водоснабжения для населенных пунктов могут быть реки Енисей, Кан, Большая Тель, Малая Тель, в которые прогнозируется разгрузка эксплуатационных горизонтов ПГЗ ЖРО
2.4.11	Досуг и другие виды использования окружающей среды	Возможно использование земель и пойменных участков рек в районе размещения ПГЗ ЖРО для отдыха
3	Факторы радиоактивного загрязнения	
3.1	Характеристика загрязнений	
3.1.01	Радиоактивный распад и накопление дочерних радионуклидов	Радионуклидный состав ЖРО известен, ЖРО соответствуют критериям приемлемости для захоронения в ПГЗ ЖРО (раздел 1.4). Учитывается радиоактивный распад радионуклидов в ЖРО, а также все последующие радиоактивные распады дочерних радионуклидов. Смотри ОСП 2.1.13
3.1.02	Химическая стабильность химически токсичных веществ	Изменяется щелочность и кислотность ЖРО в недрах, происходит образование слаборастворимых соединений и их осаждение. Учен в ОСП 3.2.01 и 3.2.02
3.1.03	Неорганические вещества (жидкая / твердая фазы)	Присутствуют растворимые соединения и коллоидные частицы, характерные для ЖРО и их продуктов взаимодействия с вмещающими горными породами катионы, анионы
3.1.04	Образование летучих веществ	ОСП не учитывается, так как в условиях повышенной температуры в эксплуатационном горизонте интенсифицируется процесс газовыделения, при этом вклад летучих веществ в долговременной перспективе малозначителен, поскольку данный процесс в основном происходит при эксплуатации ПГЗ ЖРО
3.1.05	Органические вещества и возможность их образования	Возможно наличие органических веществ в составе ЖРО, включая компоненты экстрактивный смесей. Под действием радиолитического воздействия возможно изменение химического состава органических веществ. Также не исключено взаимодействие органических соединений под действием высокой температуры с окислителями, входящими в состав ЖРО, с выделением газообразных продуктов окисления

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
3.1.06	Благородные газы	ОСП не учитывается, так как благородные газы отсутствуют в составе ЖРО
3.2	Факторы миграции радионуклидов	
3.2.01	Растворение, осаждение и кристаллизация	В связи с термодинамической нестабильностью системы компоненты РАО – вмещающие породы – подземные воды происходит образование новых химических соединений, в том числе малорастворимых и их осаждение, а также кристаллизация и перекристаллизация соединений макрокомпонентов подземных вод. Данные процессы целесообразно учитывать при прогнозировании миграции радионуклидов
3.2.02	Образование и растворимость химических веществ	В ходе физико-химических, радиолитических и микробиологических процессов, протекающих в системе захоронения РАО, происходит большое количество реакций, приводящих к образованию новых соединений. Меняются концентрации, степени окисления и растворимости химических элементов, температура, концентрации водородных и гидроксильных ионов $pH$ , окислительно-восстановительный потенциал $Eh$ . Образование и растворимость химических веществ являются одними из факторов, влияющие на поведение и перенос радионуклидов в подземных водах
3.2.03	Процессы сорбции/десорбции	Сорбционные процессы в системе захоронения РАО оказывают существенное влияние на миграционные характеристики радионуклидов и взаимосвязаны с процессами, описанными в ОСП 3.2.01 и 3.2.02
3.2.04	Коллоиды, их взаимодействие и перенос радионуклидов	Коллоидный перенос радионуклидов учитывается, так как наблюдается в песчаных породах с порами достаточно крупных размеров. При этом предполагается, что распределение радионуклидов между жидкой фазой и твердой фазой (представленной как коллоидом, содержащимся в подземных водах, так и вмещающими породами) является равновесным. Количественно это распределение характеризуется величиной коэффициента распределения $Kd$
3.2.05	Химические/комплексобразующие вещества, их влияние на образование и перенос загрязняющих веществ	Комплексообразование в гидрогеохимических системах осложняет сорбционные процессы. Комплексообразование может усиливать или замедлять/предотвращать процессы сорбции и соосаждения. Влияние комплексобразующих веществ зависит от химического состава подземных вод и компонентов РАО
3.2.06	Влияние микробиологических, биологических процессов и растений	В эксплуатационных горизонтах ПГЗ ЖРО обнаружено разнообразное микробное сообщество, в том числе денитрифицирующие бактерии. Денитрифицирующие бактерии способны переводить основную массу нитрат-ионов в молекулярный азот в интервале $pH$ , минерализации, температуры, характерных для захоронения ЖРО.

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		<p>Численность микроорганизмов и скорости биогенных процессов сульфатредукции и метанобразования в подземных водах были низки и возрастали в зоне дисперсии компонентов РАО.</p> <p>Микроорганизмы, присутствующие в эксплуатационных горизонтах, способны образовывать газы (азот, двуокись углерода, сероводород) из компонентов РАО (нитрат-, ацетат- и сульфат-ионов) [72].</p> <p>Подземные воды в районе ПГЗ ЖРО характеризуются низкой общей минерализацией и невысокой концентрацией органических субстратов, способных поддерживать рост микроорганизмов, однако поступление компонентов РАО приводит к интенсификации микробных процессов и увеличению численности бактерий разного типа, в первую очередь восстанавливающих нитрат-ионы.</p> <p>В подземных водах обитает микробное сообщество, использующее в процессе жизнедеятельности серу, азот, железо и углерод. Осуществляемые ими микробиологические процессы в эксплуатационном горизонте способствуют самоочищению пластовых вод от макрокомпонентов РАО с образованием газов и малорастворимых осадков (новообразований). Биогенное удаление окислителей может привести к снижению редокс-потенциала системы, и тем самым способствовать иммобилизации (включению) радионуклидов. Образование биогенных минеральных фаз железа, марганца, карбонатов также может приводить к иммобилизации радионуклидов. При этом, образование органических биогенных соединений (биокolloидов), что может влиять на миграционную способность радионуклидов.</p> <p>Перенос радионуклидов микроорганизмами учтен в ОСП 3.2.11</p>
3.2.07	Перенос в водной фазе	<p>Перенос радионуклидов из системы захоронения РАО в жидкой фазе возможен и обусловлен следующими процессами:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>конвективный перенос;</li> <li>молекулярная диффузия;</li> <li>гидродисперсия.</li> </ul> <p>Возможны вертикальные перетоки загрязненных компонентами РАО вод в вышележащие горизонты, в случае нарушения ИББ системы захоронения РАО</p>
3.2.08	Перенос в твердой фазе	<p>Перенос радионуклидов из системы захоронения РАО в твердой фазе возможен при проведении буровых работ, а также при отборе керна (проб горных пород).</p> <p>Учет данного процесса рассмотрен в ОСП 1.4.04</p>
3.2.09	Перенос в газообразной фазе	<p>ОСП не учитывается, так как перенос радионуклидов в газообразной фазе возможен только в период эксплуатации ПГЗ ЖРО в результате отклонений от условий нормальной</p>

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		эксплуатации, включая аварии. Радиоактивные вещества в форме газовых соединений и в виде паров при глубинном захоронении ЖРО не образуется
3.2.10	Атмосферный перенос	Перенос радиоактивно загрязненных взвешенных частиц пыли и почвы возможен при проведении буровых работ в систему захоронения РАО. При этом, учитывается внутреннее облучение человека за счет ингаляции взвешенных частиц. Учет данного процесса рассмотрен в ОСП 1.4.04
3.2.11	Перенос загрязняющих веществ животными, растениями, микроорганизмами	Радиоактивное загрязнение водных объектов и почв является исходным звеном в дальнейшей цепочке путей облучения человека (внешнего облучения от подстилающей поверхности, внутреннего облучения от прямого и вторичного (ресуспензия) загрязнения растительности), а также за счет корневого поступления радионуклидов в растения. Радионуклиды могут поступать в пищевую цепочку в результате полива сельскохозяйственных угодий или личных огородов загрязненной водой, а также потребления человеком местной животноводческой продукции. Вместе с тем при оценке переноса загрязняющих веществ в окружающей среде учитывается влияние не только животных и растений, но микроорганизмов. В процессе жизнедеятельности микробное сообщество использует компоненты, содержащиеся как в подземных водах и породах, так и в РАО, при этом продуцируются такие газы, как метан, водород, азот, сероводород, происходит осаждение металлов, сорбируются и накапливаются радионуклиды. Основными биогеохимическими процессами, влияющими на миграцию радионуклидов, является изменение степени окисления радионуклидов в ходе окислительно-восстановительных реакций, биосорбция и связанное с ними изменение химических форм радионуклидов и их мобильности. В ряде случаев наблюдается образование биокolloидов с радионуклидами (Am, Pu, U), что увеличивает скорость миграции в определенных интервалах геосферы [72].
3.2.12	Перенос загрязняющих веществ в результате деятельности человека	Перенос радионуклидов из системы захоронения РАО в среду обитания человека возможен в случае проведения буровых работ и водопользования из мест разгрузки эксплуатационных горизонтов для сельскохозяйственной деятельности. Учен в ОСП 1.4.04 и 2.2.07
3.2.13	Потребление загрязняющих веществ по пищевым цепочкам	Формирование пищевых цепочек для различных сценариев вторжения человека и использования вод после выхода загрязнителя в биосферу. При этом внутренне облучение человека будет обусловлено сельскохозяйственной деятельностью (разведение и употребление домашнего скота, выращивание продуктов питания на открытом грунте и в теплицах) и рыбном хозяйстве.

№ ОСП	Особенности, события, процессы	Описание ОСП, характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», и их учет при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО
		Смотри ОСП 2.4.03 и 2.4.04
3.3	Факторы облучения	
3.3.01	Концентрации радионуклидов в питьевой воде, пище и медикаментах	Смотри ОСП 2.4.03 и 2.4.04
3.3.02	Концентрации радионуклидов в окружающей среде	Смотри ОСП 2.4.03
3.3.03	Концентрации радионуклидов в непищевых продуктах	ОСП не учитывается, так как при выполнении работ по закрытию ПГЗ ЖРО комплекс наземных объектов (здания, сооружения, емкости, трубопроводы, насосное и другое технологическое оборудование) планируется дезактивировать и демонтировать. Образующиеся при этом РАО будут захораниваться в установленном проекте закрытия ПГЗ ЖРО порядке
3.3.04	Характер облучения	Смотри ОСП 0.01
3.3.05	Дозиметрия	Дозы облучения критической группы лиц населения определяются по всем возможным путям – внешнее и внутреннее облучение, в том числе при ингаляционном поступлении, поступлении по пищевым цепочкам
3.3.06	Радиотоксичность и радиационные эффекты	Учитывается радиационное воздействие на человека – лицо из критической группы населения, которая может подвергнуться наибольшему радиационному воздействию в отдаленном будущем. Смотри ОСП 2.4
3.3.07	Токсичные нерадиоактивные вещества	ОСП не учитывается, так как в рамках оценки долговременной безопасности ПГЗ ЖРО рассматриваются только радиационные эффекты
3.3.08	Радон и продукты его распада	ОСП не учитывается, так как в состав РАО отсутствует радон и его дочерние элементы

Анализ ОСП, происходящих в системе захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО показал, что значительная часть ОСП может быть учтена в сценариях эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский». В сценарии нормальной эволюции системы захоронения РАО учитывали наиболее вероятные события и процессы, происходящие в системе захоронения РАО рассматриваемого ПГЗ ЖРО, а также постепенное снижение защитных, прочностных и изолирующих свойств инженерных барьеров безопасности ПГЗ ЖРО «Железногорский» со временем. В альтернативных сценариях эволюции системы захоронения РАО учитываются ОСП, имеющие крайне малую вероятность реализации и связанные со значительными неопределенностями будущей эволюцией системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО [73].

В таблице 2.2 представлен результат реализации алгоритма отбора ОСП характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский», а также распределение этих ОСП по сценариям эволюции системы захоронения РАО.

Таблица 2.2 – 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	

№ п/п	Особенности, события, процессы	№ ОСП	Распределение ОСП по сценариям эволюции	
			Нормальный	Альтернативные
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
16	Геомеханические процессы при захоронении ЖРО	2.2.06	Н	
17	Гидравлические/ гидрогеологические процессы и условия в системе захоронения РАО	2.2.07	Н	
18	Химические/геохимические процессы и условия в системе захоронения РАО	2.2.08	Н	
19	Топография и морфология района и площадки размещения ПГЗ ЖРО	2.3.01	Н	
20	Характеристики первого от поверхности земли водоносного горизонта	2.3.03	Н	
21	Характеристики реки Енисей	2.3.04	Н	
22	Характеристики притоков реки Енисей (реки Большая Тель и Кан)	2.3.04	Н	
23	Гидрологический режим и водный баланс реки Енисей и ее притоков	2.3.11	Н	
24	Характеристики критической группы населения	2.4	Н	
25	Радиоактивный распад компонентов РАО и образование дочерних радионуклидов	3.1.01	Н	
26	Энерговыделение компонентов РАО вследствие радиоактивного распада	3.1.01	Н	
27	Содержание неорганических веществ в ЖРО	3.1.03	Н	
28	Содержание органических веществ в ЖРО и возможность их образования	3.1.05	Н	
29	Растворение минералов эксплуатационных горизонтов	3.2.01	Н	
30	Структурные и химические преобразования минералов эксплуатационных горизонтов	3.2.01	Н	
31	Формирование новообразованных фаз в системе захоронения РАО	3.2.02	Н	
32	Растворение новообразованных фаз в системе захоронения РАО	3.2.02	Н	
33	Структурные преобразования новообразованных фаз в системе захоронения РАО	3.2.02	Н	
34	Обменные процессы с минералами эксплуатационных горизонтов	3.2.03	Н	

№ п/п	Особенности, события, процессы	№ ОСП	Распределение ОСП по сценариям эволюции	
			Нормальный	Альтернативные
35	Сорбция радионуклидов на минералах эксплуатационных горизонтов и новообразованных фазах	3.2.03	Н	
36	Десорбция радионуклидов с минералов эксплуатационных горизонтов и новообразованных фаз	3.2.03	Н	
37	Образование коллоидов при взаимодействии компонентов РАО с эксплуатационными горизонтами	3.2.04	Н	
38	Миграция компонентов РАО в составе коллоидов и псевдоколлоидов	3.2.04	Н	
39	Задержка коллоидов эксплуатационными горизонтами	3.2.04	Н	
40	Влияние комплексообразующих веществ на миграцию компонентов РАО	3.2.05	Н	
41	Влияние микробиологических процессов на растворение минералов эксплуатационных горизонтов и новообразованных фаз	3.2.06	Н	
42	Влияние микробиологических процессов на изменение валентности радионуклидов	3.2.06	Н	
43	Включение компонентов РАО в микробиологические объекты	3.2.06	Н	
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	

Приведенные в таблице 2.2 ОСП (51 фактор) учитывали при формировании сценариев эволюции системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский» и разработке требований и рекомендаций по обоснованию его безопасности после закрытия.



2.3 Анализ технологических решений по ликвидации скважин на ПГЗ ЖРО

Особенную ценность для прогнозирования событий и процессов, важных для экологической долговременной приемлемости ПГЗ ЖРО, представляют опытные сведения о событиях и процессах, которые имели место при ликвидации отдельных скважин в процессе эксплуатации ПГЗ ЖРО.

В рамках анализа были рассмотрены технологические решения по ликвидации эксплуатационных скважин на различных ПГЗ ЖРО, включая «Железногорский» [12, 68, 74].

Опыт эксплуатации ПГЗ ЖРО показал, что наиболее распространенным осложнением, приводящим к необходимости ликвидации скважин, является падение приемистости нагнетательных скважин. Другой причиной ухудшения технического состояния эксплуатационных скважин является разрушение конструктивных элементов (инженерных барьеров) скважины [2, 75, 76]. Как пример, можно привести скважину Н-2 на ПГЗ ЖРО «Северский» [74], в которой в 1978 г. была обнаружена гидравлическая связь III эксплуатационного горизонта с вышележащим буферным горизонтом в результате ухудшения заколонной цементации. Причиной этого события оказалось неправильное освоение скважины при ее сооружении с выносом песчаного материала из эксплуатационного горизонта.

К настоящему времени ликвидированы:

- 32 скважины на ПГЗ ЖРО «Северский»;
- 21 скважина на ПГЗ ЖРО «Димитровградский»;
- 8 скважин на ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Количественные показатели, относящиеся к ликвидации скважин, можно оценить на примере ПГЗ ЖРО «Димитровградский». Анализ проектной и эксплуатационной документации показал, что на ПГЗ ЖРО «Димитровградский» из 21 ликвидированной скважины [68, 74]:

- 12 были ликвидированы по причине выработки эксплуатационного ресурса;

- 5 из-за некачественного цементного камня в заколонном и межколонном пространстве;
- 2 из-за коррозии труб обсадных колонн;
- 2 по иным причинам.

Минимальный срок эксплуатации скважины до ее ликвидации составлял 4 года, объяснением этого могут быть последствия нарушения технологии сооружения скважины. При этом максимальный срок эксплуатации ликвидируемых скважин составлял 44 года. Наибольшее количество скважин было ликвидировано при достижении 30–35 лет с начала эксплуатации ПГЗ ЖРО «Дмитровградский» (Рисунок 2.4).

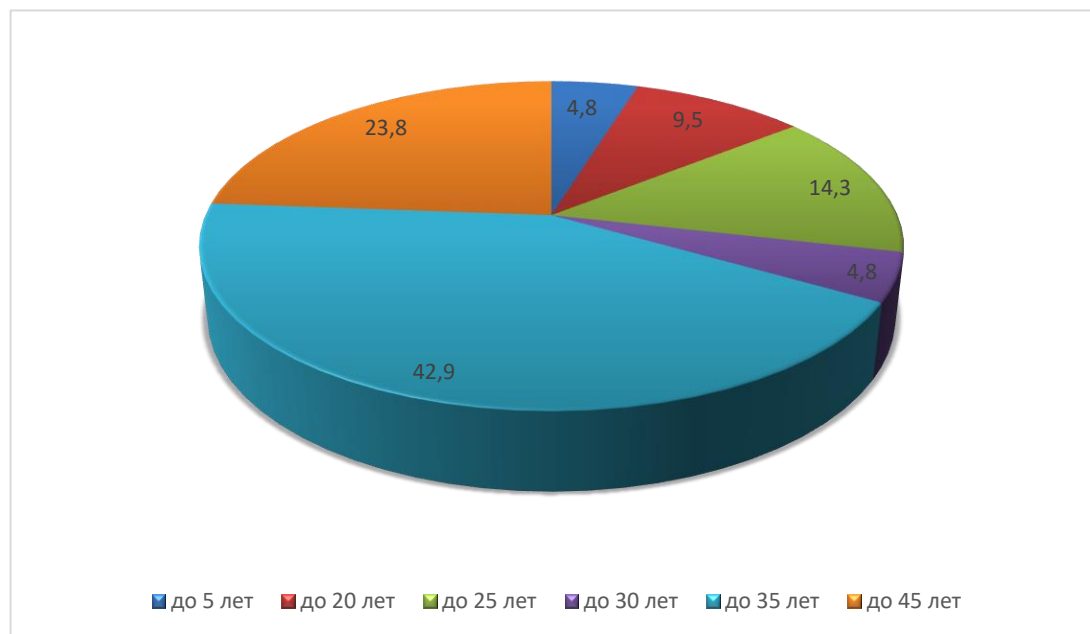


Рисунок 2.4 – Распределение относительного количества ликвидированных скважин от времени их эксплуатации

Для цементации (тампонирования) ликвидируемых скважин применяли раствор, приготовленный из сульфатостойкого тампонажного цемента по ГОСТ 1581-96 [77]. Для получения более плотного цементного камня в колонном пространстве скважин использовали цементный раствор с удельным весом 1,8 г/см<sup>3</sup>. Технология ликвидации скважин, помимо тампонирования обсадных колонн скважин, предусматривала нагнетание под давлением тампонажного раствора в эксплуатационный горизонт для создания дополнительного изолирующего экрана.

Количество применяемого сухого цемента для цементации колонны скважины в основном составляло 20–40 т, а для цементации призабойной зоны эксплуатационного горизонта – до 30 т [68, 74]. Пример распределения количества ликвидированных скважин по массе используемого цемента представлен на рисунке 2.5.

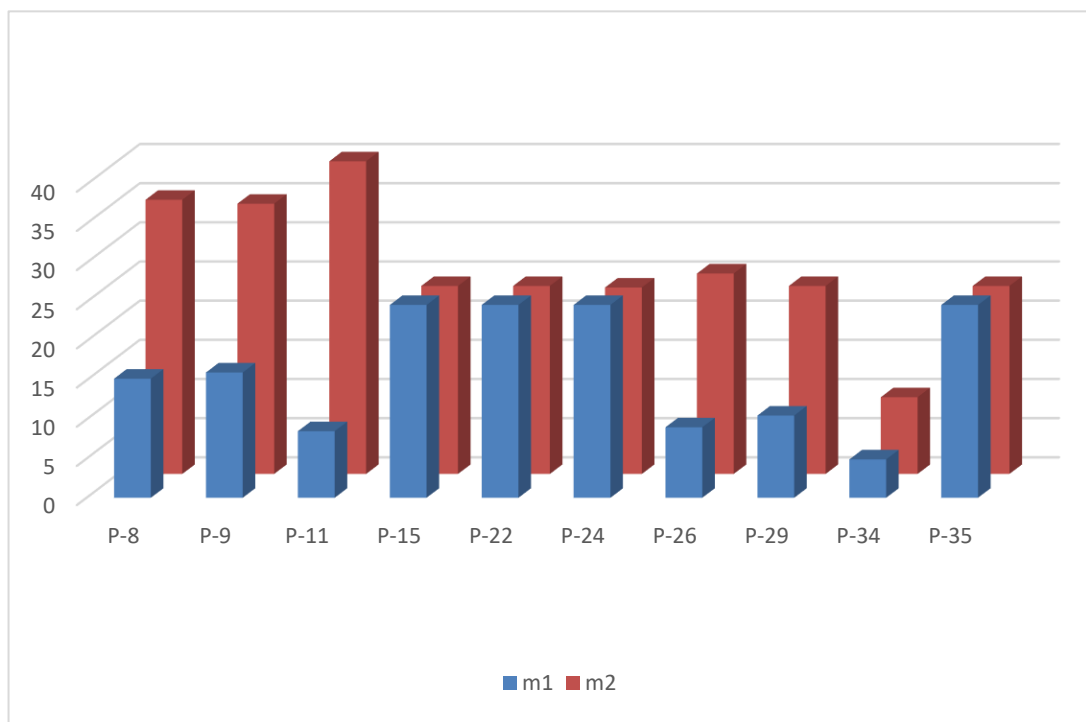


Рисунок 2.5 – Распределение массы используемого при ликвидации скважин цемента для призабойной зоны  $m_1$  и цементирования колонн  $m_2$

Проведенный анализ опыта ликвидации скважин на ПГЗ ЖРО «Димитровградский» позволяет сделать следующие обобщения.

Ликвидируемые скважины могут быть разделены на две основные группы:

- скважины с удовлетворительным состоянием заколонного цементационного материала и отсутствием взаимосвязи между эксплуатационными, буферным и вышележащими горизонтами, но с выработанным эксплуатационным ресурсом (достижение критических показателей надежности конструктивных элементов скважины, предельного объема и / или активности захороненных ЖРО);

- скважины, которые требуют при их ликвидации дополнительной изоляции заколонного пространства по причине коррозии труб обсадных колонн и / или некачественного цементного камня в заколонном и межколонном

пространстве (неудовлетворительное техническое состояние скважины). Для ликвидации скважин данной группы требуется применение особой технологии.

Способы ликвидации эксплуатационных скважин основаны на технологиях широко применяемых в различных областях деятельности, связанной с использованием недр – разработка месторождений полезных ископаемых, строительство [78].

На первом этапе ликвидации скважин производится нагнетание в эксплуатационный горизонт кольматирующих растворов, которые образуют практически непроницаемую зону в эксплуатационном горизонте на расстояниях первых метров от скважины. Благодаря этому, компоненты РАО, как радионуклиды, так и химические соединения, в последующем не будут контактировать с конструктивными элементами скважины и тампонажными материалами, применяемыми для ликвидации скважин. На втором этапе осуществляется тампонирующее внутреннее пространство обсадных колонн скважин.

В результате ликвидированная (затампонирующая) скважина представляет собой размещенное в геологической среде искусственное образование в виде вертикального тела, состоящего из цементного камня, в котором заключены обсадные металлические трубы. При этом в эксплуатационном горизонте вокруг фильтра скважины образуется дополнительный инженерный барьер безопасности – цементное кольцо радиусом 0,3–0,5 м при длине фильтра – 50 м, а внутри скважины – дополнительный барьер, являющийся препятствием для возможных заколонных и внутриколонных перетоков компонентов захороненных РАО и подземных вод вверх по стволу скважины. Данный способ применяют для ликвидации скважин первой группы, в частности был реализован на скважине Р-3 ПГЗ ЖРО «Димитровградский» [68].

Вместе с тем, на основании результатов проведенного анализа следует отметить, что для случаев, когда качество заколонной цементации является неудовлетворительным, требуется дополнительное применение мер для обеспечения сохранности барьером безопасности изолирующих свойств в течение длительного периода времени. В большинстве случаев для таких скважин

необходимо выполнять дополнительную перфорацию «проблемных» участков (интервалов) либо перфорацию в интервале вышележащего водоупорного горизонта и создавать дополнительные горизонтальные изоляционные экраны, предотвращающие межпластовые перетоки грунтовых вод и миграцию компонентов РАО [78].

Для скважин, доступ во внутреннее пространство которых может быть затруднен, например, из-за наличия песчаной пробки, постороннего предмета или ограничен высоким уровнем радиоактивного загрязнения внутренней поверхности колонн (исключение загрязнения бурового инструмента и геофизического оборудования), приемлема технология тампонирувания с использованием инъекционных скважин, сооружаемых на расстоянии 10–15 м от ликвидируемых скважин и вскрывающих вышележащие горизонты. Нагнетание цементного раствора в этом случае выполняют в режиме гидроразрыва пласта в интервалах нахождения слабопроницаемых пород. Примером ликвидации скважины с применением данной технологии может являться ликвидация нагнетательной скважины Н-10 ПГЗ ЖРО «Железногорский», используемой для захоронения ЖРО (НАО) во II эксплуатационный горизонт [68, 79].

В связи с установленным признаком перетока по стволу скважины Н-10, наличием области поглощения за колонной диаметром 219 мм (раздел 3.1), ликвидация данной скважины была выполнена с использованием инъекционных скважин. Бурение инъекционных скважин глубиной 140 м выполнялось до подошвы водоупора (горизонт Г0), залегающего над II эксплуатируемым эксплуатационным горизонтом, далее производилась перфорация инъекционных скважин в интервале слабопроницаемых пропластков водоупора (119–139 м) и нагнетание цементного раствора при максимальных давлениях, не превышающих давление гидроразрыва пласта. После подтверждения геофизическими методами наличия цементного раствора за стенками скважины Н-10 выполнялись ликвидационные мероприятия ствола скважины путем заполнения колонны скважины цементным раствором до устья. Конструкция ликвидируемой скважины после проведения работ по ликвидации представлена на рисунке 2.6 [68].

При этом стоит отметить, что одна инъекционная скважина осталась в качестве наблюдательной за состоянием недр в районе ликвидированной скважины Н-10, остальные скважины ликвидированы, как выполнившие свое технологическое предназначение, путем заполнения их стволов тампонажным цементом.

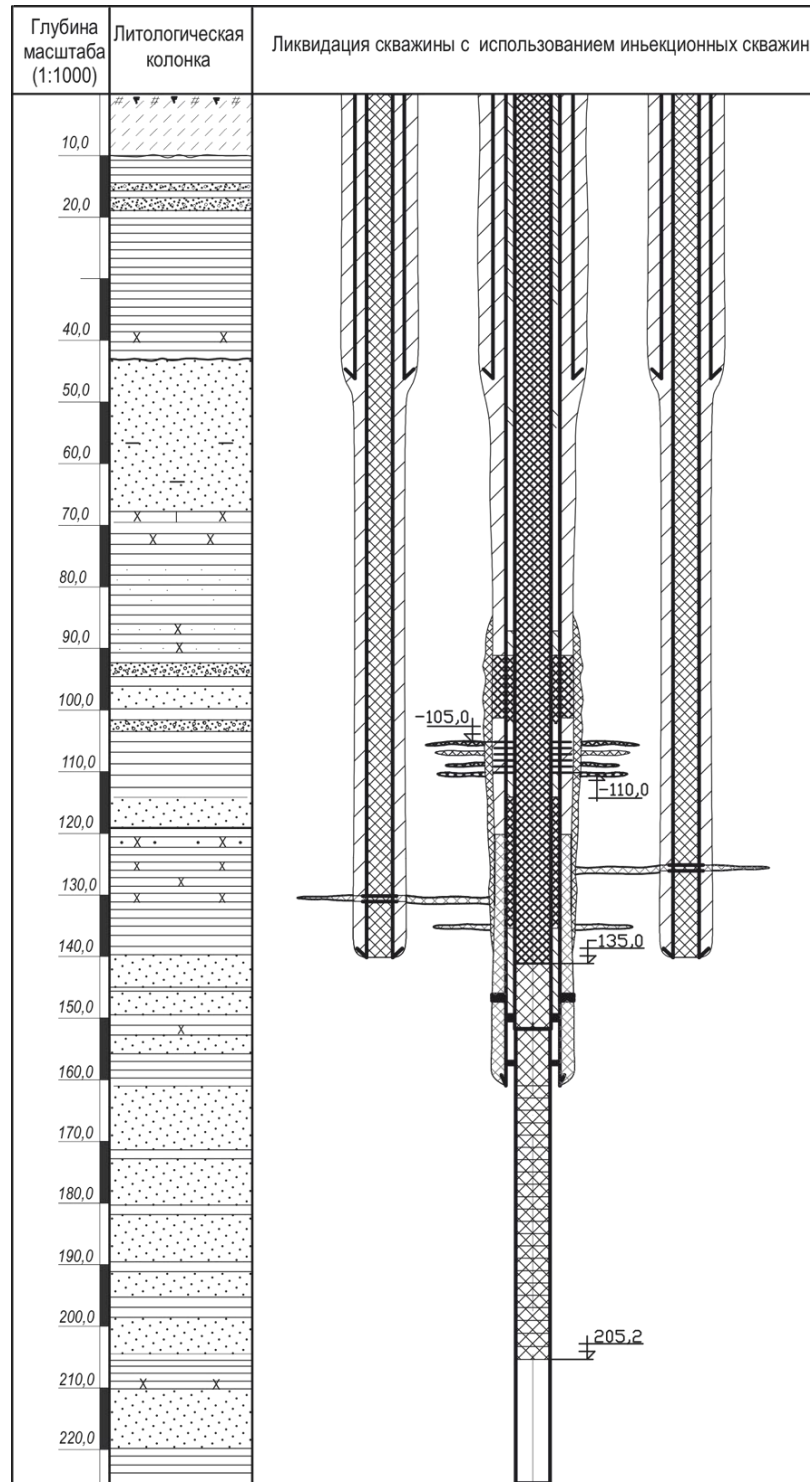


Рисунок 2.6 – Конструкция ликвидируемой скважины с использованием инъекционных скважин [79]

Согласно результатам проведенного анализа [68, 74], способы ликвидации эксплуатационных скважин на ПГЗ ЖРО обеспечили требуемый уровень безопасности ликвидируемых скважин: поступления компонентов РАО по стволам ликвидируемых скважин по данным многолетних наблюдений не установлены, компоненты РАО локализованы в местах нахождения – эксплуатационных горизонтах.

#### 2.4 Краткие выводы к главе 2

1) Разработан и обоснован алгоритм отбора ОСП, важных для обоснования долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский», применительно к его особенностям.

2) Выполнен анализ ОСП, относящихся к процессам проходящих в системе захоронения РАО, важным для обоснования ее безопасности, и разработан перечень ОСП, необходимый для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО «Железногорский».

3) Разработана система распределения ОСП (51 фактор) по сценариям эволюции системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский».

4) Апробированный в рамках диссертационного исследования алгоритм отбора ОСП характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский» может быть применим для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Димитровградский».

5) Анализ технологических решений по ликвидации отдельных скважин на ПГЗ ЖРО позволил разделить ликвидируемые скважины на две основные группы:

– с удовлетворительным состоянием заколонного цементационного раствора и отсутствием взаимосвязи между эксплуатационными, буферным и вышележащими горизонтами, но с выработанным эксплуатационным ресурсом (достижение критических показателей надежности конструктивных элементов скважины, предельного объема и / или активности захороненных ЖРО);

– требующие при их ликвидации дополнительной изоляции заколонного пространства по причине коррозии труб обсадных колонн и / или некачественного цементного камня в заколонном и межколонном пространстве

(неудовлетворительное техническое состояние скважины). Для ликвидации скважин второй группы требуется применение особой технологии.

б) Было отмечено, что для случаев, когда качество заколонной цементации является неудовлетворительным, требуется создавать дополнительные горизонтальные изоляционные экраны, предотвращающие межпластовые перетоки грунтовых вод и миграцию компонентов РАО. В большинстве случаев для создания таких экранов в скважинах необходимо выполнять дополнительную перфорацию интервалов некачественного цементного камня либо перфорацию в интервале вышележащего водоупорного горизонта.



### **Глава 3. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов, важных для долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО «Железногорский»**

Согласно требованиям п. 5 НП-055-14 [56] при захоронении РАО должен соблюдаться принцип «многобарьерности – долговременная безопасность захоронения РАО в период после закрытия ПЗРО» (в данном случае ПГЗ ЖРО) «должна обеспечиваться применением системы барьеров безопасности на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду». При этом, «нарушение целостности одного из барьеров безопасности или вероятное внешнее событие природного или техногенного происхождения не должны приводить к снижению уровня долговременной безопасности системы захоронения РАО» [56]. Также требования НП-055-14 [56] установлено, что «система барьеров ПГЗ ЖРО должна обеспечивать безопасность захоронения РАО в период их потенциальной опасности с учетом возможных внешних воздействий природного и техногенного происхождения в районе размещения ПГЗ ЖРО, а также с учетом протекающих в системе захоронения РАО физических и химических процессов, сохранять изолирующие свойства при воздействии на них вмещающих горных пород, а также при тепловом воздействии на них тепловыделяющих РАО».

Требованиями НП-055-14 [56] определено, что «инженерные барьеры безопасности ПГЗ ЖРО должны выполнять свои функции после его закрытия в заданном проекте объеме в течение установленного и обоснованного в проекте ПГЗ ЖРО срока без технического обслуживания и ремонта». К инженерным барьерам безопасности ПГЗ ЖРО согласно НП-055-14 [56], относятся:

- обсадные колонны нагнетательных скважин, выполненные из коррозионностойких материалов и обсадные колонны наблюдательных скважин из углеродистых сталей;
- заполненное тампонажным материалом заколонное пространство (пространство между внешней стенкой колонны и горными породами), а также внутриколонное пространства (при ликвидации скважин), предотвращающие

попадание компонентов РАО в горные породы выше кровли эксплуатационного горизонта.

Обсадные колонны изолированы цементным камнем как с внешней, так и с внутренней стороны, что предотвращает разуплотнение материала обсадных труб в результате коррозионных процессов.

Анализ ОСП, представленный в разделе 2.2, показал, что при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО ПГЗ ЖРО должно учитываться событие, связанное с деградацией инженерного барьера скважин вследствие коррозии обсадных колонн или разрушении материала герметизации заколонного пространства, приводящее к возникновению перетоков по стволам скважин и загрязнению вышележащих горизонтов.

### 3.1 Анализ особенностей заколонных перетоков по стволам скважин ПГЗ ЖРО

Буровые скважины на участках захоронения ЖРО нарушают природную изолированность вскрытых ими водоносных горизонтов и могут быть каналами, по которым развивается процесс заколонного межпластового перетекания природных сред (подземных вод, нефти, газа) и техногенных (химических и других компонентов) отходов.

Под заколонным перетоком понимают процесс вертикального восходящего или нисходящего движения отходов из одного водоносного горизонта в другой за обсадной колонной труб скважины, как правило, по интервалам негерметичного заколонного пространства [80]. Развитие восходящего перетекания отходов по таким каналам в ряде случаев приводит к негативным последствиям – загрязнению неглубокозалегающих пресных подземных и поверхностных вод, а также земной поверхности [81, 82].

Основными материалами для анализа являлись результаты геологоразведочных и специальных гидрогеологических работ, а также данные мониторинга состояния недр и технического состояния скважин на ПГЗ ЖРО «Железногорский». Мониторинг включал: результаты гидродинамических, гидрогеохимических и геофизических наблюдений и исследований, выполненных

в полевых условиях методами гидропрослушивания, химопробования, гамма-каротажа, термометрии и другими.

Заколонный переток начинается по каналам повышенной проницаемости и пористости, которые образуются в межколонном пространстве скважин как на этапе застывания цементного раствора, так и после его отверждения. Причинами возникновения каналов являются интервалы разрушенного и отсутствующего цементного камня, а также плохое качество его сцепления с горной породой и обсадными трубами. Контакт «обсадная колонна – цементный камень – горные породы» подвержен риску образования каналов [83]. Анализ опубликованных случаев и теоретических представлений о причинах разрушения затвердевших цементов, бетонов и горных пород, а также о причинах нарушения герметичности заколонного пространства скважин показал, что возникновение проницаемых каналов вызвано в основном техногенными факторами и является следствием физических и химических воздействий на инженерные элементы скважины и окружающие ее геологические слои [2, 81, 84, 85, 86, 87].

На протяжении «жизненного цикла» скважины испытывают следующие воздействия: механические статические и вибрационные нагрузки на обсадные трубы, цементный камень и горные породы; гидроудары в прифильтровой зоне при пусках-остановках насосов; изменение температуры; изменение окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий; воздействия, возникающие в результате протекания физико-химических и микробиологических процессов. Сочетание процессов и воздействий в каждой конкретной скважине различно, скорость их протекания также неодинакова, но последствия общие – изменение первоначальных состава, структуры и свойств инженерных элементов скважины, горных пород и подземных вод, а также напряженно-деформированного состояния отдельных участков и всего ствола скважины в целом. Разрушению цементного камня и образованию каналов за стенкой скважины способствуют изначально невысокое качество заколонной цементации, геодинамические явления при нагнетаниях на небольшие глубины (до 200–300 м), а также такие кратковременные, но интенсивные виды работ, как: опрессовка колонн,

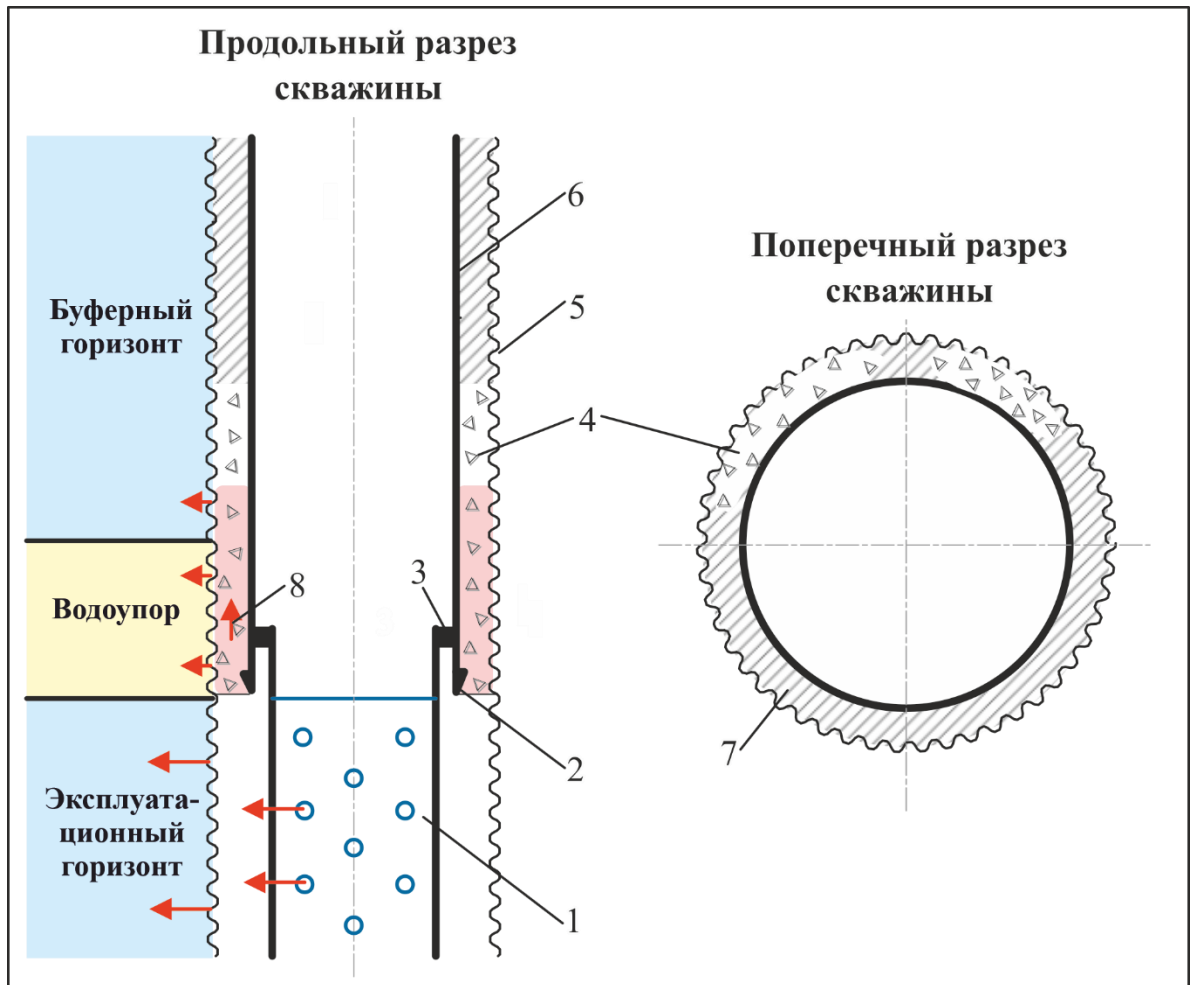
перфорация, кислотная обработка, откачка воды с выносом песка, гидроразрывы [2]. Наибольшему техногенному воздействию подвергаются нагнетательные скважины, поэтому вероятность образования в них каналов и развития перетоков выше, чем в других типах скважин. Практика эксплуатации ПГЗ ЖРО подтверждает данный вывод (раздел 2.3): образование каналов и возникновение заколонных перетоков были отмечены преимущественно в нагнетательных скважинах. Случаи перетоков по стволам наблюдательных скважин были выявлены только в скважинах, расположенных вблизи нагнетательных скважин, то есть в области наибольшего повышения напора/давления подземных вод и других видов техногенного воздействия.

Исходя из определения термина «заколонный переток» причиной его развития следует считать движущую силу – градиент напора, который вызывает движение отходов по межколонному пространству скважины от областей с большим напором к областям с меньшим напором при наличии канала фильтрации.

Наряду с факторами, которые способствуют образованию каналов и развитию по ним перетоков, существуют значимые геологические факторы, предотвращающие и ограничивающие данный процесс – эффект кольматации, явление ползучести (долговременной деформируемости в результате проявления реологических свойств) пластичных глин, проявление горного и пластового давлений, которые приводят к смыканию и заполнению трещин и других пустот горными породами вокруг ствола скважин и даже к смятию обсадных труб [88].

Схема протекания процесса заколонного перетока жидкостей приведена на рисунке 3.1.

Методы и методики определения интервалов и направления заколонного перетекания жидкостей разработаны и детально изложены в специализированной литературе и нормативно-методических документах [29, 89].



1 – фильтр; 2 – башмак колонны; 3 – сальник; 4 – интервал разрушенного цементного камня; 5 – стенка скважины (горных пород); 6 – обсадные трубы, 7 – цементное кольцо; 8 – направления движения жидкостей.

Рисунок 3.1 – Геолого-техническая схема характерной конструкции скважины и канал заколонного перетекания жидкостей

На ПГЗ ЖРО «Железногорский» за последние 30 лет было обнаружено три случая заколонного перетока: в нагнетательных скважинах Н-7, Н-9 и Н-10. Детальный анализ процесса перетекания выполнен на примере случая возникновения перетока в скважине Н-10, который был выявлен более 20 лет назад в 1997–1998 гг., после 30 лет ее эксплуатации.

Эксплуатационный горизонт на участке скважины Н-10 залегает на глубине 161 м, сложен песчано-глинистыми отложениями мощностью до 44 м, перекрыт двумя слабопроницаемыми глинистыми толщами общей мощностью 90 м. Трехколонная конструкция скважины включает: 1) кондуктор, диаметром 325 мм и толщиной стенки 10 мм в интервале глубин 0–46 м; 2) эксплуатационную колонну, диаметром 219 мм и толщиной стенки 8 мм в интервале 0–161 м;

3) фильтровую колонну, диаметром 140 мм и толщиной стенки 8 мм в интервале 152–225 м, сооруженные из стальных труб (марки «Д»). Заколонное пространство кондуктора и эксплуатационной колонны зацементировано тампонажным цементом до устья (предположительно обратным способом). Фильтр скважины – интервал перфорации труб с проволочной обмоткой длиной 44 м (интервал 161–205 м), охватывает полную мощность эксплуатационного горизонта. После сооружения в скважине Н-10 был проведен комплекс работ по освоению и повышению приемистости, включавший откачки и нагнетания воды. Глубина залегания естественного уровня воды – 45 м, пластовое давление – 1,76 МПа. Нагнетание низкоактивных ЖРО производилось в Н-10 в период с 1973 по 2011 гг. в прерывистом режиме с расходом до 300 м<sup>3</sup>/сут под давлением до 0,8 МПа на устье [79].

С целью контроля и оценки технического состояния в скважине Н-10 периодически проводились геофизические исследования: гамма-каротаж, термометрия, акустическая цементометрия. Данные геофизических исследований в 1997–1998 гг. позволили обнаружить ухудшение качества заколонной цементации в 40-метровом интервале непосредственно над кровлей эксплуатационного горизонта и фильтром скважины, а также признаки заколонного восходящего перетекания подземных вод и компонентов захороненных РАО: превышение фоновых значений интенсивности гамма-излучения и температуры горных пород в 20-метровом интервале. Дальнейшие исследования, проведенные в скважине Н-10, подтвердили:

1) целостность труб эксплуатационной колонны (по стабильному давлению при пневматических опрессовках);

2) наличие интервала разрушенного цементного камня в заколонном пространстве, ухудшение сцепления цемента с трубами и горной породой (по данным акустической цементометрии);

3) наличие гамма- и термоаномалий над кровлей эксплуатационного горизонта (Рисунок 3.2).

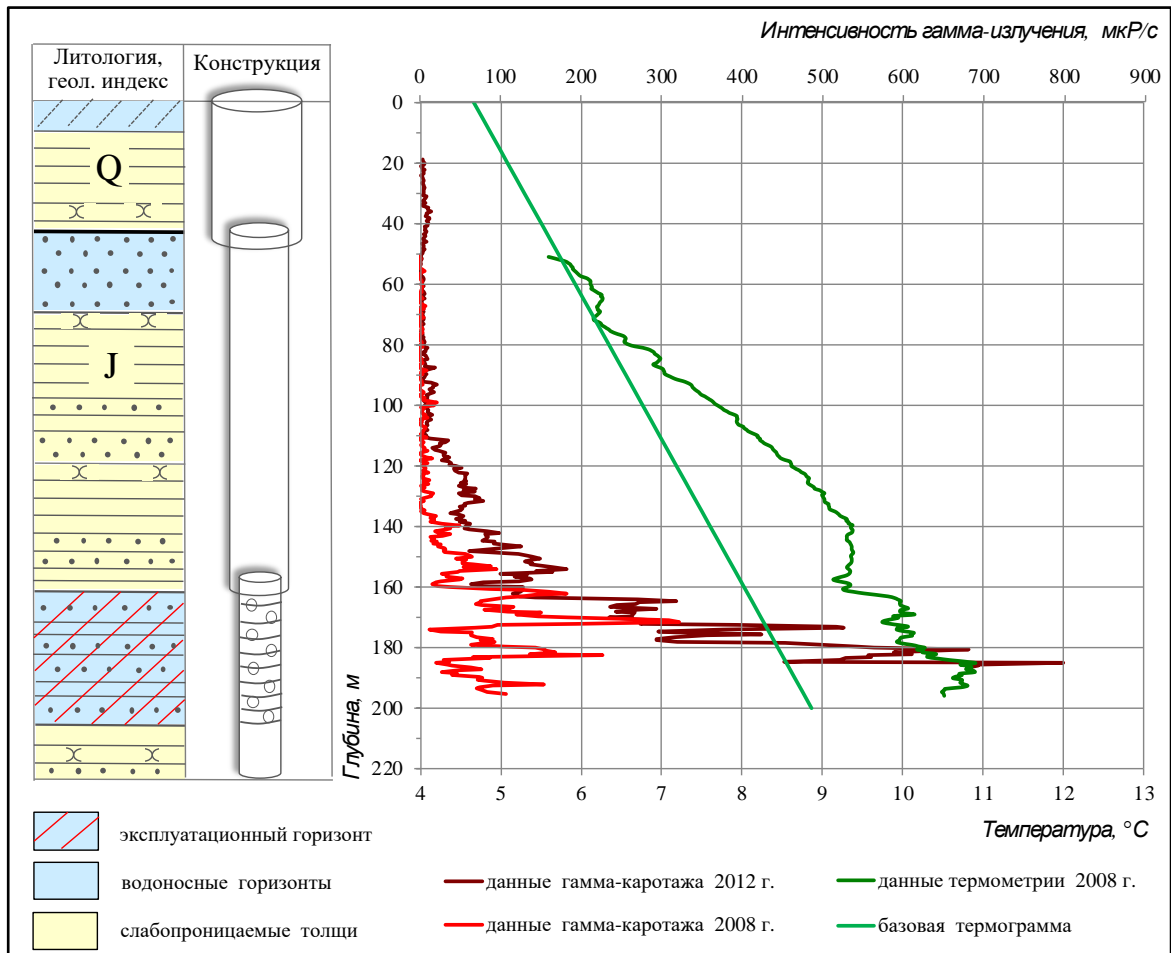


Рисунок 3.2 – Признаки заколонного восходящего перетекания компонентов РАО по стволу скважины Н-10 по данным гамма-каротажа и термометрии

Кроме этого, было отмечено увеличение высоты интервала нарушенной герметичности заколонного пространства скважины до 70 метров (в интервале глубин 91–161 м).

Нагнетание ЖРО в скважину Н-10 с 2002 г. было прекращено после введения в эксплуатацию резервных нагнетательных скважин. Выполненные в 2008 г. ремонтно-восстановительные работы на скважине Н-10, направленные на формирование дополнительных цементных барьеров в негерметичных участках заколонного пространства скважины через созданные в эксплуатационной колонне перфорационные отверстия и установку дополнительной колонны с пакером, не обеспечили надежную изоляцию эксплуатационного горизонта от вышележащих горизонтов.

Исследования технического состояния скважины Н-10 после пробного нагнетания ЖРО в 2009–2011 гг. показали, что заколонное перетекание

возобновилось и дальность миграции компонентов РАО из эксплуатационного горизонта вверх по стволу скважины увеличилась, что могло быть следствием продолжения разрушения цементного камня под воздействием перфорации, воздушных опрессовок, нагнетаний технической воды в 2008 г. при ремонтно-восстановительных работах и привело к увеличению фильтрационно-емкостных свойств материала в заколонном пространстве скважины. В связи с этим эксплуатация скважины Н-10 была остановлена. По данным гамма-каротажа после 2012 г. отмечена стабилизация размера области вертикальной миграции компонентов РАО вверх по стволу скважины и тенденция ее уменьшения.

### 3.2 Определение основных параметров расчетной модели заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин

С целью оценки последствий возможных нарушений герметичности эксплуатационных скважин после закрытия ПГЗ ЖРО автором:

- обоснована необходимость учета процессов образования заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин при оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО на примере ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- для определения последствий заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин разработан план проведения расчетного моделирования, включая определение начальных и граничных условий, временных интервалов моделирования;
- на основании полученных расчетных данных самостоятельно выявлены искомые зависимости и проведен их анализ.

Для выполнения поставленной задачи диссертантом в составе коллектива авторов [90] была разработана математическая сеточная модель на основе использования системы уравнений фильтрации и миграции веществ в пористой среде, описывающей закон сохранения массы в несущей среде (флюида), закона Дарси, связывающего скорость фильтрации с перепадом давлений, закона сохранения массы каждого компонента в фазе [91].

Расчетная область охватывала в плане участок размером 400×400 м с центральным положением скважины-канала перетекания, в разрезе,



от поверхности земли до глубины залегания подошвы эксплуатационного горизонта 200–230 м. Пространственно-временная вычислительная сетка была построена с учетом фактических природно-технических условий ПГЗ ЖРО «Железногорский», в том числе реальных диаметра скважины Н-10, длины канала перетекания, дальности вертикальной миграции компонентов РАО по нему, расхода и давления нагнетания.

Расчетный период времени состоял из двух основных этапов:

- 1996–2016 гг. – этап образования и эволюции канала перетекания, развития заколонного перетекания;
- 2017–2315 гг. – 300-летний прогнозный этап, следующий после ликвидации скважины и канала перетекания, прекращения восходящего перетекания, восстановления естественных условий.

В модели реализован нестационарный режим трехмерного по структуре потока подземных вод и воспроизведена основная особенность гидрогеологических условий – напор подземных вод в эксплуатационном горизонте ниже, чем в вышележащем буферном. Учтены процессы инфильтрационного питания и испарения подземных вод. Граничные и начальные условия модельного геофильтрационного потока на участке максимально приближены к реальным, установленным по результатам анализа гидродинамической структуры потоков подземных вод различных водоносных горизонтов. Для такого анализа использовались данные геологоразведочных работ и многолетних режимных наблюдений за колебаниями уровня и давления воды в скважинах ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Созданная модельная водонапорная система в юрских отложениях в естественных условиях так же, как и реальная природная система, характеризуется общими для разных горизонтов показателями процесса фильтрации: в плане направление потока подземных вод северное, к региональным дренам под уклоном 0,002–0,003; вниз по разрезу до глубин 200–250 м происходит снижение напоров (градиент напоров 0,1), способствующее нисходящему движению подземных вод. В нарушенных гидродинамических условиях,

имитирующих период нагнетания ЖРО, модельные повышения напора в эксплуатационном горизонте были близки к фактическим и составляли 10–30 м. Такие повышения соответствуют 10–15 % от природного пластового давления [2]. Градиент напора подземных вод между эксплуатационным горизонтом и вышележащим буферным горизонтом в периоды работы скважины Н-10 изменялся в пределах 0,04–0,16 в зависимости от расхода и длительности нагнетания ЖРО.

Значения параметров, характеризующих фильтрационно-емкостные свойства отложений геологического разреза участка, изменялись в ходе калибровки модели с учетом результатов ранее выполненных геологоразведочных работ, в том числе опытно-фильтрационных и литературных данных. Слабопроницаемая толща (относительный водоупор), перекрывающая эксплуатационный горизонт, представлена в модели в виде однородного в плане, слоистого и анизотропного в разрезе пласта мощностью 90 м. В разрезе водоупора выделено три литологических разности: пески, песчаники, глины. Значения коэффициентов фильтрации ( $k_{xy}$ ) каждой разности в горизонтальном направлении в результате калибровки модели составили соответственно  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$ ,  $10^{-4}$  м/сут, коэффициенты фильтрации ( $k_z$ ) в вертикальном направлении в 10 раз меньше. Значения активной пористости получены равными в слоях песков – 0,2, песчаников – 0,25 и глин – 0,3. Такие значения близки к значениям общей пористости указанных отложений, определенной по данным геологоразведочных работ.

Параметры продольной и поперечной гидродисперсии (дисперсивности) указанных литологических разностей также характеризуются различными значениями. Продольная дисперсивность ( $\delta_L$ ) по результатам калибровки модели составила: 1 м в песках, 0,5 м в песчаниках и 0,1 м в глинах. Поперечная (горизонтальная и вертикальная) дисперсивность ( $\delta_T$ ) в 10 раз меньше продольной. Коэффициент молекулярной диффузии, который изменяется в широких пределах в зависимости от генезиса, степени литификации, пористости горных пород, принят равным  $1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сут в слоях песков и песчаников и  $1 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/сут в глинах.

Моделирование выполнено по схеме конвективно-дисперсионного переноса с учетом молекулярной диффузии геохимически нейтрального компонента, без учета радиоактивного распада. Основным показателем для сопоставления модельных и фактических данных о миграции компонента-индикатора являлась высота (абсолютная отметка) положения границы интервала повышенного гамма-излучения над кровлей эксплуатационного горизонта, определенная по данным гамма-каротажа. Было принято, что в модели эта граница соответствует минимальной относительной концентрации ( $C/C_0$ ) мигранта и составляет  $1 \cdot 10^{-4}$ , где  $C$  – текущая концентрация компонента, равная в начальный момент времени 0,  $C_0$  – концентрация компонента в ЖРО, равная 1.

Решение уравнений геофильтрации и геомиграции выполнено численным сеточным блочно-центрированным балансовым методом конечных разностей. Для расчетов применялись программы MODFLOW и MT3DMS, входящие в состав программного комплекса Processing Modflow (version 8.0.43, Simcore Software) [92, 93].

Канал перетекания моделировался как интервал повышенной проницаемости в перекрывающем эксплуатационный горизонт водоупоре над фильтром скважины Н-10 высотой в разрезе 70 м и площадью поперечного сечения  $0,04 \text{ м}^2$  ( $20 \times 20 \text{ см}$ ), которая близка к площади сечения эксплуатационной колонны скважины диаметром 22 см (219 мм). Активная пористость среды в канале не отличалась от пористости окружающих горных пород, т.е. изменялась по высоте канала от 0,2 до 0,3, и во времени оставалась постоянной. Указанные высокие значения активной пористости традиционно применяются в практике долговременных прогнозов миграции компонентов РАО в системе захоронения, что обусловлено длительностью процессов перераспределения компонентов РАО в реальном трещинно-пористом пространстве эксплуатационных горизонтов и постепенным заполнением компонентами РАО практически всей имеющейся полезной емкости данных горизонтов [2, 94]. Горизонтальный коэффициент фильтрации ( $k_{xy}$ ) в канале соответствовал среднему коэффициенту фильтрации глин  $5 \cdot 10^{-5} \text{ м/сут}$ .

Многовариантное моделирование условий эксплуатации скважины Н-10 и развития процесса заколонного перетекания позволило установить, что основными параметрами, определяющими пространственно-временные закономерности изменения напора и концентрации веществ в канале, могут являться вертикальный коэффициент фильтрации ( $k_z$ ) и продольная дисперсивность ( $\delta_L$ ) среды в канале. Результаты модельных экспериментов позволили оценить возможные значения этих параметров и диапазон их изменения в пространстве и времени.

Первоначально, в период начала разрушения цементного камня и образования канала перетекания в 1997–2009 гг.,  $k_z$  среды в канале составлял 0,3 м/сут. В дальнейшем, после проведения ремонтно-восстановительных работ, когда нагнетание ЖРО в скважину было возобновлено в 2009 г., проницаемость канала увеличилась примерно в пять раз:  $k_z$  стал равным 1,6 м/сут. Полученное в модели увеличение проницаемости среды в канале перетекания подтверждает влияние техногенных воздействий на фильтрационные свойства материала в заколонном пространстве скважины. Сочетание значений коэффициента фильтрации (0,3–1,6 м/сут) и пористости (0,2–0,3) среды в канале перетекания по классификации, предложенной Н. А. Плотниковым и дополненной Е. Е. Керкисом [95], характерно для пород со средней и низкой проницаемостью. В период после ликвидации канала перетекания и прекращения нагнетания ЖРО в скважину Н-10,  $k_z$  был постоянным и равным среднему коэффициенту фильтрации глин ( $5 \cdot 10^{-5}$  м/сут) для имитации худшего варианта условий перетекания.

Коэффициент фильтрации среды в канале в начале развития процесса перетекания был практически равен коэффициенту фильтрации эксплуатационного горизонта и составлял 0,4 м/сут.

При оценке продольной дисперсивности среды ( $\delta_L$ ) в канале перетекания учитывалось, что размер данного параметра может существенно отличаться от дисперсивности окружающих горных пород и быть переменным как по его высоте, так и во времени, потому что значения дисперсивности зависят от размера неоднородностей (минеральных зерен, блоков), геометрических особенностей

пустотного пространства, а также скорости фильтрации. Результаты моделирования показали, что значения  $\delta_L$  в канале могут максимально в пять раз превышать  $\delta_L$  в наиболее проницаемых прослоях (песках) геологического разреза и достигать 2–5 м так же, как в трещиноватых породах, и что размер данного параметра может уменьшаться по высоте канала перетекания.

### 3.3 Результаты расчетов характеристик заколонных перетоков компонентов РАО

Сравнение расчетных и экспериментальных данных позволило сделать вывод, что модель адекватно описывает динамику границы области миграции компонентов РАО в вертикальном направлении по заколонному пространству нагнетательной скважины Н-10. Наблюдалось хорошее совпадение ее фактического и расчетного положения во времени (Рисунок 3.3). Максимальная дальность вертикальной миграции компонентов РАО с относительной концентрацией  $10^{-4}$  по данным моделирования и мониторинга наблюдалась через 15 лет после начала процесса перетекания компонентов РАО и составляла 56 м от кровли эксплуатационного горизонта. Исходя из таких значений расстояния и времени, средняя действительная скорость перетекания вверх по каналу составляла около 4 м/год или 0,01 м/сут. Протяженность области наибольших относительных концентраций (0,5–1) нейтрального компонента, соответствующая зоне конвективного переноса (поршневого вытеснения) вод эксплуатационного горизонта, на этапе эксплуатации скважины Н-10 в канале перетекания была в шесть раз меньше длины канала и не превышала 12 м от кровли эксплуатационного горизонта. Длина области относительных концентраций нейтрального компонента в канале, соответствующая зоне дисперсии компонентов РАО (менее 0,5), была в четыре раза больше длины зоны поршневого вытеснения и составляла 44 м.

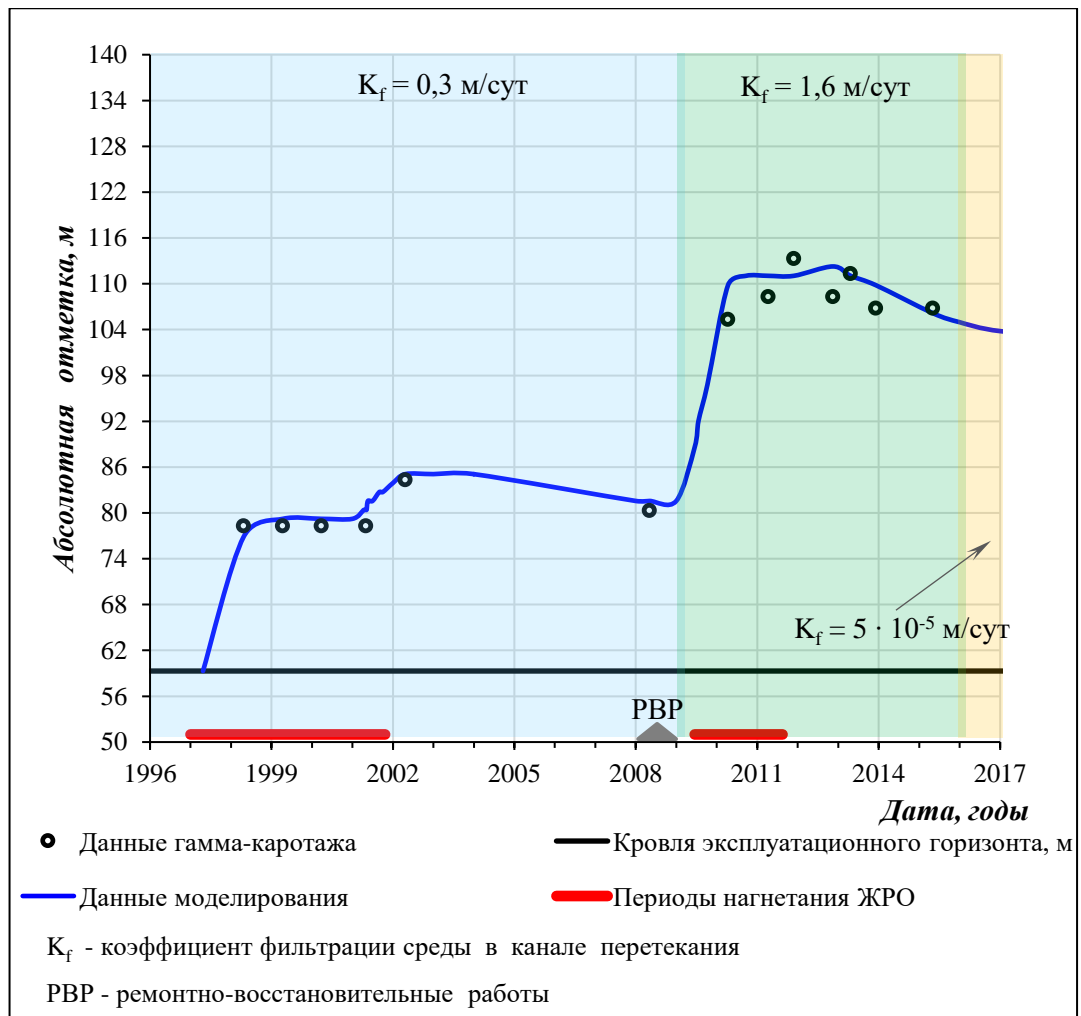
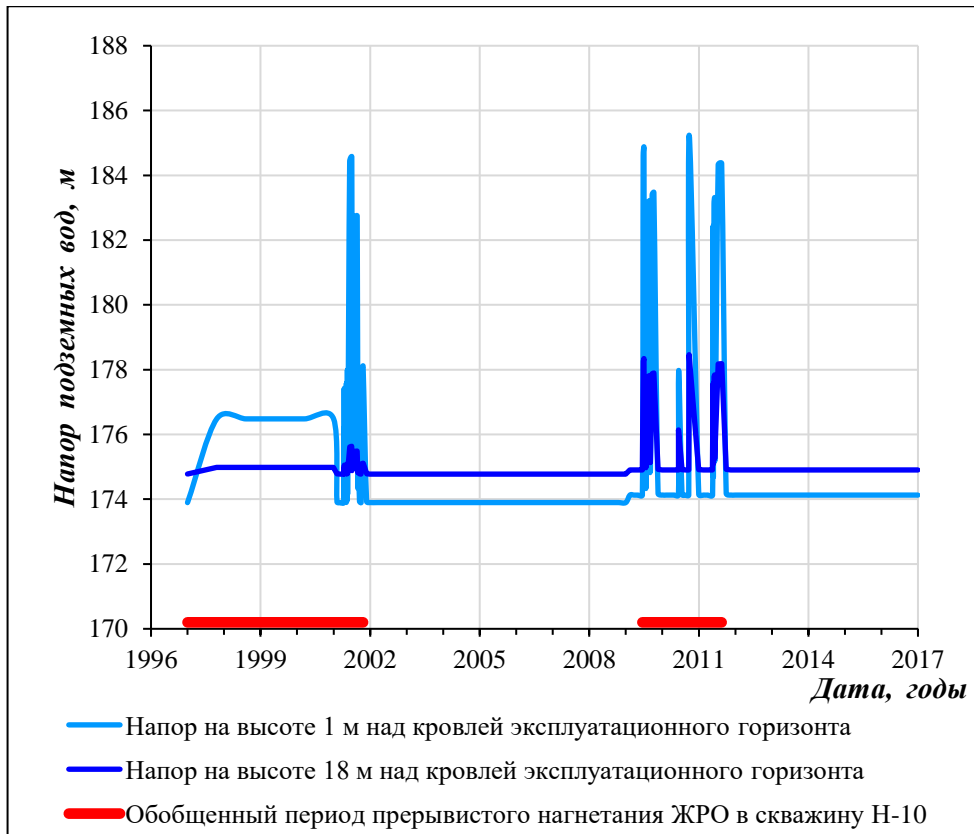


Рисунок 3.3 – Изменение высоты миграции компонентов РАО по стволу скважины Н-10 во времени по данным мониторинга и моделирования

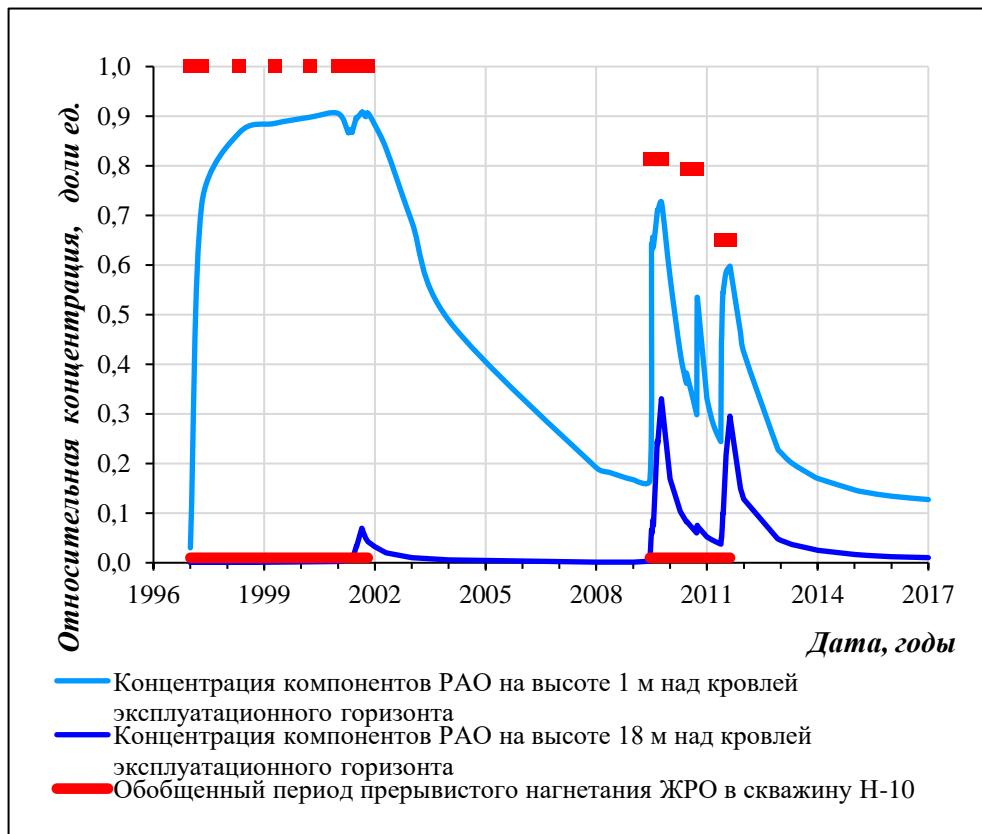
На основе данных моделирования с использованием аналитических формул была выполнена оценка показателей перетекания (расхода, скорости, объема перетока) в наихудших условиях. Согласно расчетам, при наибольшем коэффициенте фильтрации 1,6 м/сут, градиенте напора 0,16 и площади поперечного сечения канала  $0,04 \text{ м}^2$ , скорость фильтрации составляла 0,3 м/сут, расход перетекания  $0,01 \text{ м}^3/\text{сут}$  (около  $4 \text{ м}^3/\text{год}$ ). При этом в эксплуатационный горизонт через Н-10 захоранивалось  $100\text{--}300 \text{ м}^3$  ЖРО за одни сутки. С учетом полученного значения расхода перетекания, общий объем жидкости с компонентами РАО, который мог поступить в вышележающие горизонты по стволу скважины Н-10 за прошедший 20-летний период существования канала перетекания, но только в периоды работы скважины – всего около 100 суток в календарном году, составляет порядка  $20 \text{ м}^3$ . Объем перетекания значительно

меньше объема ЖРО, захороненного через скважину Н-10 за всю ее эксплуатацию (порядка 900 тыс. м<sup>3</sup>), а также общего объема, размещенного во II эксплуатационном горизонте системе захоронения РАО до ликвидации скважины (более 4 млн. м<sup>3</sup>).

Моделирование подтвердило установленную по данным мониторинга взаимосвязь заколонного перетекания компонентов РАО и условий эксплуатации скважины. В динамических условиях, в период нагнетания ЖРО, в канале перетекания существенно повышаются напоры, градиент напора, скорость фильтрации жидкости (Рисунок 3.4 а). Соотношение напоров разных водоносных слоев изменяется на противоположное относительно природного и начинается восходящее течение жидкостей. В канале также повышается концентрация компонентов РАО и увеличивается дальность их миграции вверх по стволу скважины (Рисунок 3.3 и Рисунок 3.4 б). В статических условиях, после прекращения нагнетания ЖРО, происходит достаточно быстрое восстановление природных напоров, снижение концентрации и высоты миграции компонентов РАО. Причинами снижения концентрации рассмотренного нейтрального компонента в канале в статических условиях по данным моделирования является в основном вытеснение компонента природными конвективными потоками подземных вод (латеральным с юга на север и профильным нисходящим), а также развитие процессов дисперсии. В реальных природно-техногенных условиях снижению концентрации компонентов РАО в канале, в окружающих его горных породах и восстановлению природных гидрогеохимических условий также способствуют физико-химические процессы (сорбция, радиоактивный распад и др.).



а)



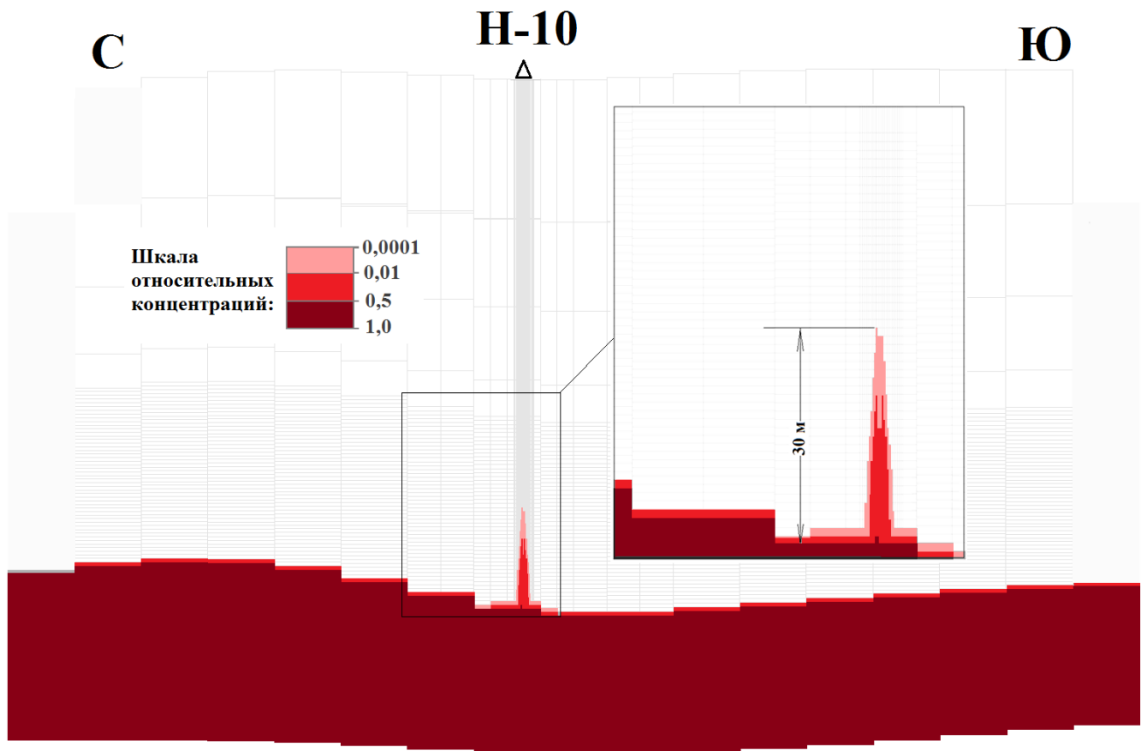
б)

Рисунок 3.4 – Графики колебания напора подземных вод (а) и концентрации нейтрального компонента (б) в канале перетекания во времени по данным моделирования

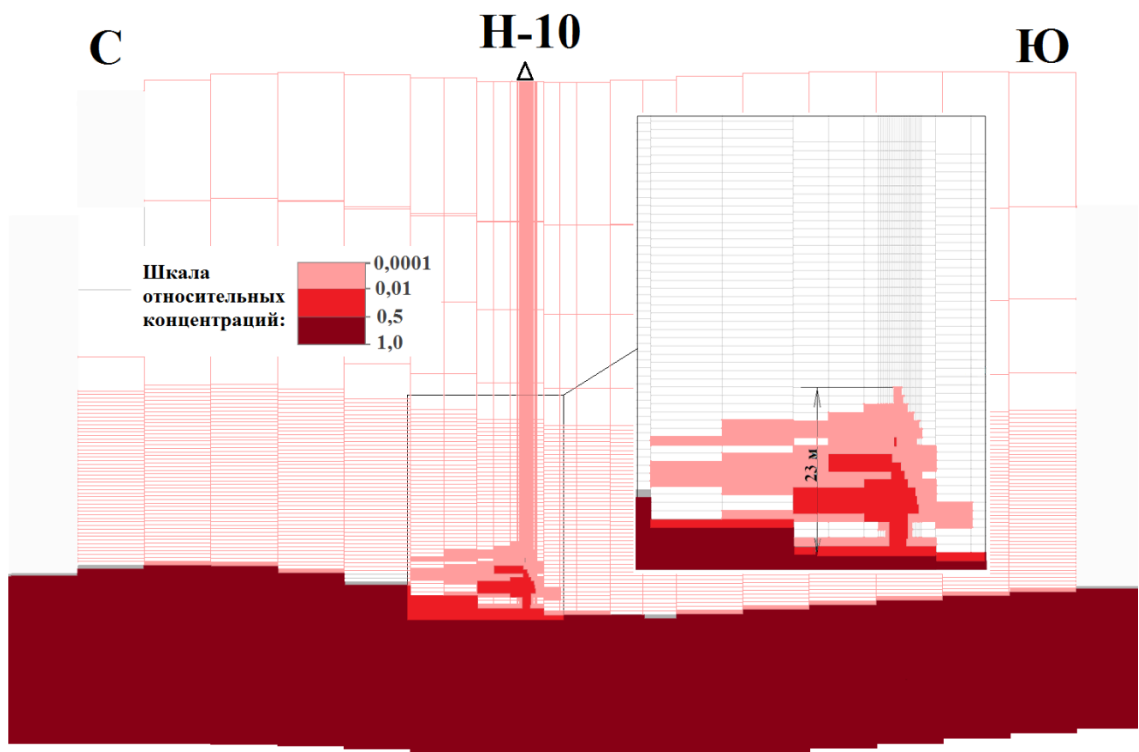


Таким образом, возникновение, развитие и прекращение процесса восходящего перетекания жидкостей имеет не случайный, а закономерный характер: пространственно-временные изменения основных показателей перетекания обусловлены, главным образом, переменными значениями расхода и давления нагнетания ЖРО, а также изменчивостью расчетных фильтрационных и миграционных параметров среды в канале перетекания. Полученный вывод указывает, во-первых, что заколонное перетекание для лучшего представления физической сущности процесса и решения практических задач можно описать линейным законом фильтрации (законом Дарси), а во-вторых, что существует возможность эффективного управления процессом перетекания путем корректировки режима эксплуатации скважины и изменения фильтрационных свойств среды за ее колонной.

Согласно результатам моделирования, расход перетекающих жидкостей перераспределяется в разрезе между слоями в соответствии с их проводимостью и в зависимости от размера градиента напора. Наибольший расход поступает в слои с максимальной проводимостью, т. е. с наименьшим фильтрационным сопротивлением, которые расположены в области наибольших значений градиента напора. В итоге наибольшая площадь и радиус области распространения компонентов РАО в плане наблюдаются в песчаных слоях, залегающих в пределах слабопроницаемой толщи над кровлей эксплуатационного горизонта (Рисунок 3.5).



а)



б)

Рисунок 3.5 – Область распространения компонентов РАО в разрезе однородного (а) и неоднородного слоистого (б) водоупора по состоянию на 2008 г. (через 10 лет после начала заколонного перетекания) по данным моделирования

С целью оценки влияния фильтрационной неоднородности слабопроницаемой толщи, перекрывающей эксплуатационный горизонт, на скорость заколонного движения компонентов РАО, процесс перетекания по стволу Н-10 был реализован на модели с однородным, не слоистым, анизотропным водоупором. Значение горизонтального коэффициента фильтрации ( $k_{xy}$ ) всей толщи составляло  $10^{-4}$  м/сут, в вертикальном направлении ( $k_z$ ) – в 10 раз меньше. Параметры и характеристики канала перетекания были такие же, как в первоначальном базовом варианте. Сравнение полученных двух вариантов перетекания показало, что скорость движения компонентов РАО вверх по каналу перетекания немного (в 1,3 раза) ниже при неоднородном (слоистом) строении водоупора, также меньше дальность их миграции и максимальные концентрации (Рисунок 3.5). Полученный результат означает, что фильтрационная неоднородность водоупора препятствует восходящему движению компонентов РАО к поверхности земли и способствует их локализации в системе захоронения РАО, и при детальном исследовании и оценках безопасности ПГЗ ЖРО необходимо ее учитывать.

Результаты анализа данных мониторинга и моделирования позволили оценить размеры области распространения компонентов РАО, которая образовалась в системе захоронения РАО в результате заколонного перетекания компонентов РАО по стволу скважины Н-10. Ореол рассеяния компонентов РАО расположен в непосредственной близости от скважины Н-10: в плане максимально вытянут на 50–60 м на север по направлению естественного потока подземных вод, в разрезе занимает 50–60-метровый интервал над кровлей эксплуатационного горизонта, т. е. на глубине более 90 м от поверхности земли. Скорость распространения компонентов РАО от скважины в плане в отдельных слоях перекрывающего водоупора за 20-летний период существования канала была близка к средней скорости движения вверх по каналу и составляла 3 м/год, что в шесть раз больше скорости естественного потока подземных вод в песчаных прослоях перекрывающего водоупора, равной 0,5 м/год.

В период после закрытия ПГЗ ЖРО по результатам прогнозного моделирования смещение ореола рассеяния компонентов РАО на север будет

продолжаться: через 300 лет после ликвидации скважины и канала перетекания наибольшая дальность миграции компонентов РАО от скважины в плане составит 200 м. Высота области распространения компонентов РАО в разрезе снизится и будет составлять 40 м над кровлей эксплуатационного горизонта. Содержание компонентов РАО в подземных водах также уменьшится и не превысит  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  от содержания в ЖРО. Непосредственно в канале перетекания концентрация компонентов РАО будет выше примерно на порядок.

Полученные оценки подтверждают, что последствия заколонных перетоков подземных вод и компонентов РАО будут проявляться в непосредственной близости от стволов скважин в пределах горного отвода недр в течение времени, пока радиоактивные компоненты РАО будут представлять экологическую опасность. При этом область их локализации в разрезе будет существенно меньше, чем в плане.

Возможными направлениями и способами предотвращения образования каналов и развития заколонных перетоков жидкостей по стволам скважин, главным образом нагнетательных, могут быть следующие:

- усиление конструкции новых сооружаемых скважин на локальных участках в надфильтровой части и в кровле эксплуатационного горизонта, например, путем применения более прочного и менее проницаемого тампонажного цемента, обладающего лучшими адгезионными свойствами;
- создание превентивных гидроизоляционных завес вокруг стволов скважин над кровлей эксплуатационного горизонта;
- совершенствование способов и методик цементирования скважин;
- разработка и применение «щадящих» способов техногенного воздействия на скважины при их освоении и выполнении ремонтно-восстановительных работ;
- корректировка режима нагнетания ЖРО: снижение давления нагнетания, смена циклического режима на непрерывный и т. п.;
- организация, ведение, периодическое совершенствование системы мониторинга технического состояния скважин, путем применения новых методов и методик исследований, сооружения дополнительных наблюдательных скважин на буферный и вышележащий горизонт в непосредственной близости от

нагнетательных скважин с учетом направления естественного потока подземных вод.

В ряде случаев необходимо рассматривать «нулевой» вариант – отказ от эксплуатации скважины как нагнетательной и использование ее только в качестве наблюдательной. Эффективность и быстрота предотвращения заколонных перетоков будет выше при одновременной реализации нескольких из перечисленных способов.

#### 3.4 Определение физико-механических характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин ПГЗ ЖРО

Для предотвращения возможных заколонных перетоков компонентов РАО из эксплуатационных горизонтов вверх по стволам скважин конструктивные и технологические решения по ликвидации скважин должны предусматривать применение эффективных тампонажных материалов, изолирующих эксплуатационные горизонты от доступной биосферы. Применение тампонажных материалов определяется с учетом их способности образовывать непроницаемые композиции внутри и снаружи скважин, сохраняющие свои изоляционные свойства в условиях вмещающей геологической среды в течение длительных периодов времени, пока ЖРО будут представлять опасность для людей и окружающей среды с учетом возможной миграции компонентов РАО по стволу и околоствольному пространству скважин, заполненным тампонажным материалом.

Тампонажные материалы должны быть технологичными, обладать достаточно хорошими реологическими свойствами, чтобы легко перекачиваться насосом по трубам, но при этом после закачивания в скважину они должны быстро загустевать, проникать в поры и трещины, твердеть, набирать прочность, и вместе с тем не растекаться, быть устойчивыми, обладать низким водоотделением.

В настоящее время в качестве материалов, способных обеспечить изолирование РАО, рассматривают цемент, бентонит и цементно-бентонитовые смеси [96, 97]. Из них наибольший интерес для тампонирования ликвидируемых скважин представляют некоторые марки цемента и его смеси с бентонитом.

В связи с этим проведено экспериментальное исследование по оценке влияния факторов, воздействующих на показатели защитных свойств таких

материалов, применительно к природно-техногенным особенностям ПГЗ ЖРО «Железногорский». При выполнении данного исследования автором:

- для проведения экспериментов обоснован состав воздействующих водных сред (ЖРО и воды эксплуатационных горизонтов), характерных для ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- разработан план проведения экспериментов, содержащий обоснованные перечни определяемых характеристик и варьируемых параметров (тип тампонажного материала; температура водных сред, содержащих тепловыделяющие РАО), диапазоны измерений, применяемые методы исследования.

Экспериментальные измерения выполнялись в соответствии с разработанным планом на оборудовании Московского государственного строительного университета [98]. По полученным данным автором самостоятельно выявлены искомые зависимости показателей защитных свойств тампонажных материалов и проведен анализ этих зависимостей.

В качестве исходного материала для проведения исследования использовали тампонажный портландцемент бездобавочный для низких и нормальных температур ПЦТ I-G-50, соответствующий ГОСТ 1581-96 [77].

Учитывая ряд полезных для решения данной задачи свойств бентонита (гидроизоляционных, ионообменных, пластифицирующих и др.) оценивали также его влияние на защитные свойства портландцемента ПЦТ I-G-50. Для этого использовали глинопорошок бентонитовый типа БМ-У [99] и изготавливали смеси с содержанием 90 % ПЦТ I-G-50 и 10 % БМ-У.

В качестве исследуемых водных сред использовали:

- подземную воду эксплуатационных горизонтов ПГЗ ЖРО «Железногорский»;
- модельный раствор ЖРО, захоронение которых осуществляется на ПГЗ ЖРО «Железногорский».

Подземная вода имела  $pH = 6$  и содержала следующие ионы в мг/л: Fe (общ) – 4,11;  $Na^+$  – 57,75;  $Ca^{2+}$  – 36,34;  $Mg^{2+}$  – 10,02;  $NO_3^-$  – 0,5;  $SO_4^{2-}$  – 3,12;  $Cl^-$  – 11,11;  $F^-$  – 0,12;  $HCO_3^-$  – 293,05.

Модельный раствор ЖРО содержал в г/л: NaOH – 0,018; NaNO<sub>3</sub> – 350; Al<sup>3+</sup> – 3,4; Cl<sup>-</sup> – 0,5, а также взвешенные вещества в количестве 30 мг/л.

Измерение массы и плотности приготовленных образцов тампонажных материалов осуществляли по ГОСТ 26798.1-96 [100]; предела прочности на изгиб и сжатие – по ГОСТ 310.4-81 [101]; изолирующей способности – по ГОСТ 12730.5-2018 [102].

Определение макро- и микродефектов в структуре цементного камня определяли методом рентгеновской микротомографии с использованием комплексной системы SkyScan с учетом методических рекомендаций, представленных в ASTM 1672-12 [103].

Пористость цементного камня определялась методом эталонной порометрии при помощи автоматизированного эталонного порометра Porotech 3.1.

Коэффициенты фильтрации цементного камня определяли с помощью установки УВБ-МГ4.01 в соответствии с методикой, приведенной в ВСН 132-92 [104].

Образцы цементного камня выдерживали при нагреве в климатической камере.

Проведенное исследование было направлено на выявление характера изменения физико-механических характеристик исследуемых тампонажных материалов на начальном этапе (до 30 суток) воздействия на них водных сред.

Определение изменения плотности исследуемых тампонажных материалов в зависимости от времени их выдержки в водных средах и температуры осуществляли с образцами, исходная плотность которых варьировалась в диапазонах 1,89 – 2,03 г/см<sup>3</sup> для портландцемента и 1,53 – 1,70 г/см<sup>3</sup> для его смеси с бентонитом.

Усредненная плотность образцов портландцемента составила 1,96 г/см<sup>3</sup>, образцов смеси портландцемента с бентонитом – 1,66 г/см<sup>3</sup>. Распределение количества применяемых образцов тампонажных материалов по плотности показаны на рисунке 3.6.

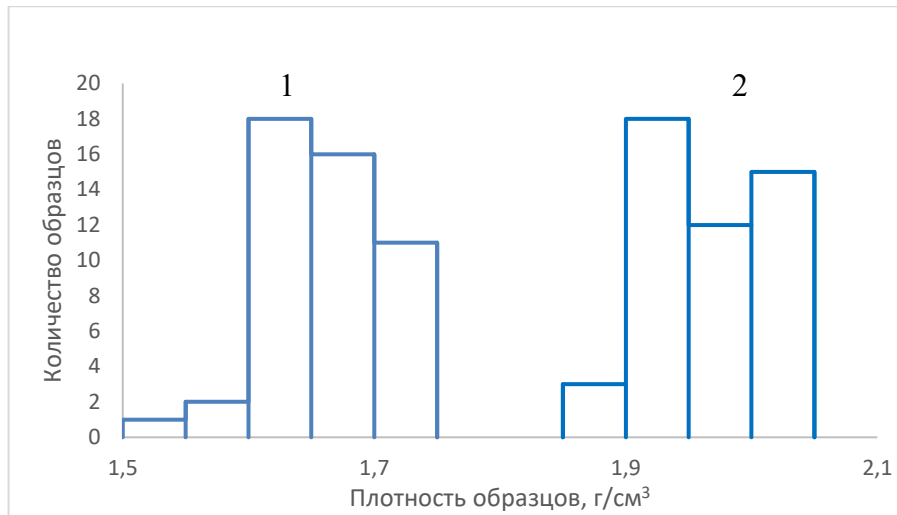
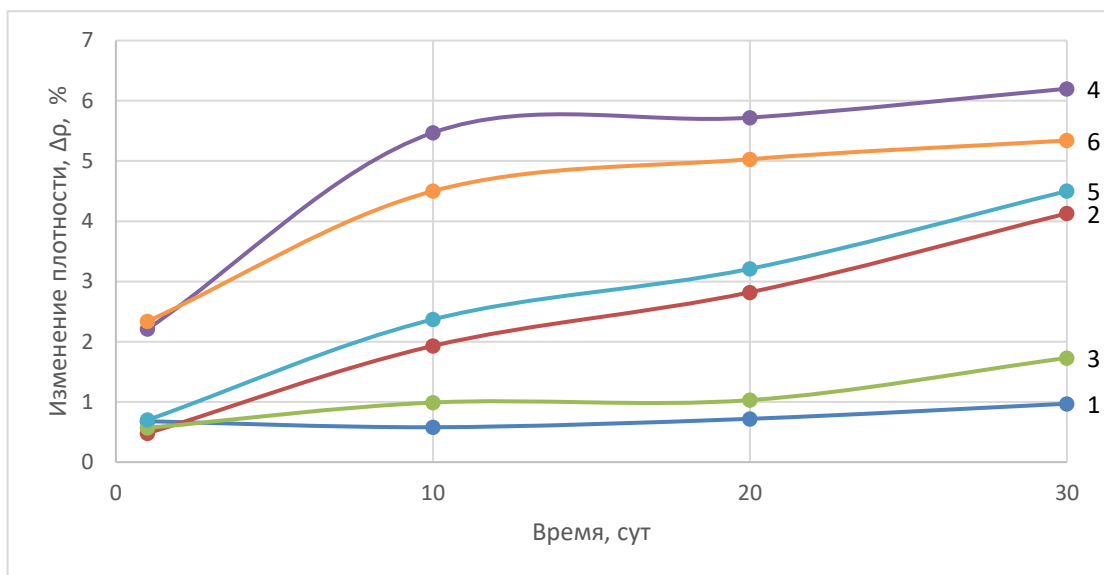


Рисунок 3.6 – Распределения образцов портландцемента (1) и его смеси с бентонитом (2) по значениям плотности

Проведенные измерения показали рост плотности образцов тампонажных материалов с увеличением времени их выдержки в водных средах, относительные значения которого показаны на рисунке 3.7.



- 1 – портландцемент тампонажный (температура выдержки 20 °С) в контакте с модельным раствором ЖРО;
- 2 – портландцемент тампонажный (температура выдержки 60 °С) в контакте с модельным раствором ЖРО;
- 3 – портландцемент тампонажный (температура выдержки 20 °С) в контакте с подземной водой;
- 4 – цементно-бенотнитовая смесь в соотношении 90 % : 10 % (температура выдержки 20 °С) в контакте с модельным раствором ЖРО;
- 5 – цементно-бенотнитовая смесь в соотношении 90 % : 10 % (температура выдержки 60 °С) в контакте с модельным раствором ЖРО;
- 6 – цементно-бенотнитовая смесь в соотношении 90 % : 10 % (температура выдержки 20 °С) в контакте с подземной водой.

Рисунок 3.7 – Изменение плотности тампонажных материалов от времени выдержки в водных средах



Как следует из рисунка 3.7:

- с увеличением времени выдержки исследуемых образцов тампонажных материалов в водных средах имело место увеличение их плотности (от 1 до 6 % к 30 суткам выдержки);
- полученные экспериментальные зависимости по изменению плотности тампонажных материалов от времени имели тенденцию к постоянному замедлению и стабилизации значений плотности по мере увеличения времени контактов образцов с водными средами;
- добавление бентонита к портландцементу приводило к росту плотности тампонажного материала;
- при использовании модельного раствора ЖРО: увеличение температуры с 20 до 60 °С способствовало увеличению плотности образцов портландцемента и снижению плотности образцов с добавками бентонита;
- для смеси портландцемента с бентонитом большая плотность образцов достигалась в случае их контакта с модельным раствором ЖРО по сравнению с контактом с подземной водой.

Наряду с эволюцией плотности тампонажных материалов при их контакте с водными средами также определяли эволюцию изменения пределов их прочности при контакте с водными средами в течение 30 суток.

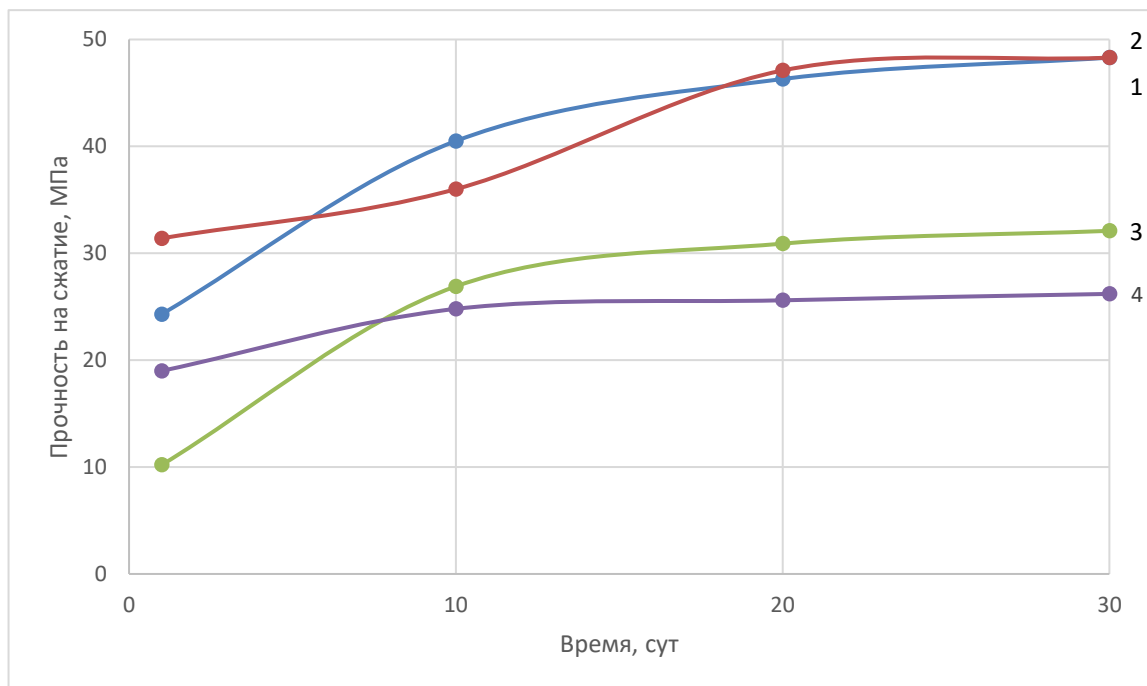
Согласно полученным данным по определению предела прочности тампонажных материалов на сжатие, представленным на рисунке 3.8:

- при одинаковых значениях времени выдержки в модельном растворе ЖРО предел прочности на сжатие был выше у образцов портландцемента по сравнению с образцами его смеси с бентонитом (на 30–40 % на 30-е сутки выдержки);
- с увеличением времени выдержки в модельном растворе ЖРО предел прочности тампонажных материалов на сжатие возрастал и после 20 суток выдержки далее практически не изменялся;
- скорость изменения значений анализируемого показателя была наибольшей в начале контактирования образцов тампонажных материалов

с модельным раствором ЖРО и постепенно снижалась с увеличением времени выдержки;

- увеличение температуры (с 20 до 60 °С) приводило к росту предела прочности на сжатие в начальный период контактирования образцов тампонажных материалов с модельным раствором ЖРО; с увеличением времени выдержки повышение температуры приводило к замедлению роста значения предела прочности на сжатие, что обусловило пересечение анализируемых зависимостей, представленных на рисунке 3.8, достигаемое ко времени до 10 суток выдержки;

- для образцов портландцемента повышение температуры до 60 °С практически не сказывалось на достижении наибольшего значения предела прочности на сжатие, достигаемого к 30 суткам выдержки (46–47 МПа), в то время как для его смеси с бентонитом при аналогичном повышении температуры наибольшее значение предела прочности на сжатие к 30 суткам (26 МПа) не достигала наибольшего значения, зафиксированного при 20 °С (32 МПа).

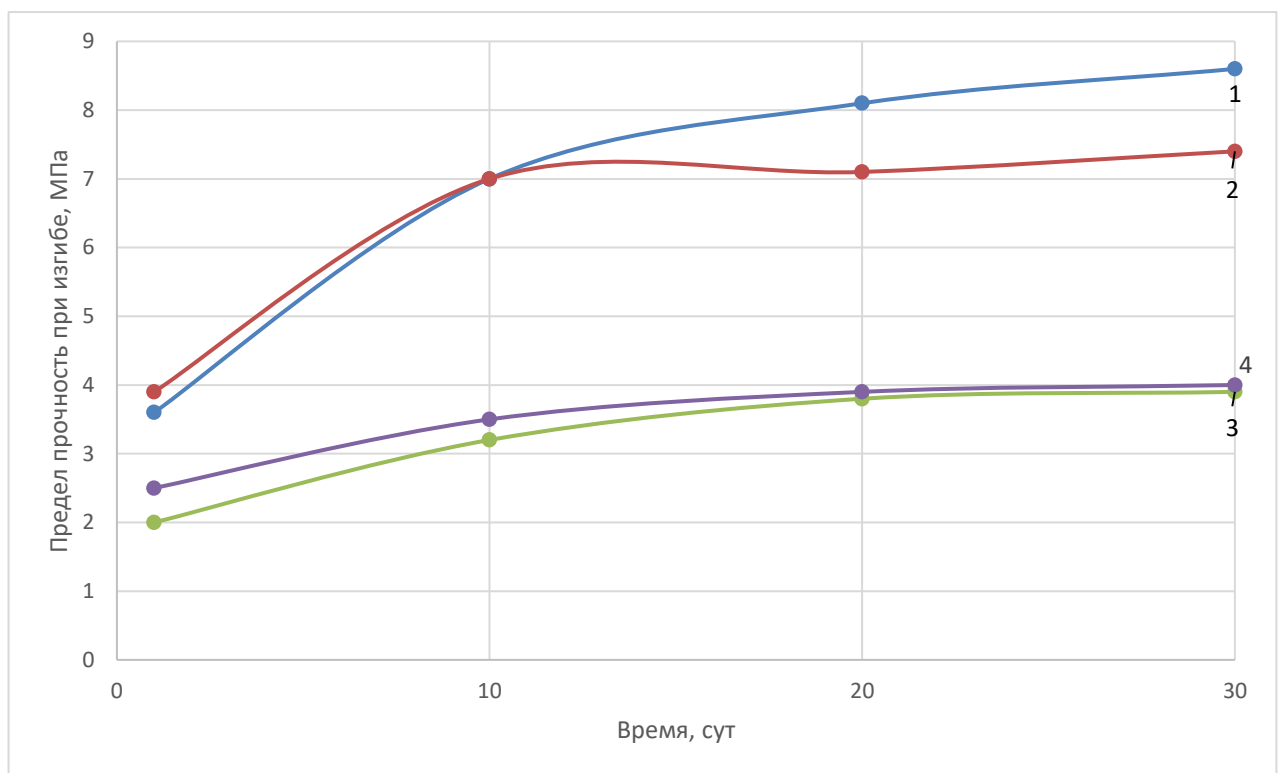


- 1 – портландцемент (температура выдержки 20 °С);
- 2 – портландцемент (температура выдержки 60 °С);
- 3 – цементно-бентонитовая смесь в соотношении 90 % : 10 % (температура выдержки 20 °С);
- 4 – цементно-бентонитовая смесь в соотношении 90 % : 10 % (температура выдержки 60 °С).

Рисунок 3.8 – Изменение предела прочности на сжатие от времени для тампонажных материалов, контактирующих с модельным раствором ЖРО

Результаты проведенных экспериментов показали, что на предел прочности на сжатие практически не влияла замена подземной воды на модельный раствор ЖРО.

Выполненные измерения показали, что, в целом, характер изменения предела прочности используемых тампонажных материалов на изгиб (Рисунок 3.9) аналогичен рассмотренному выше характеру изменения предела прочности на сжатие. Это относится как к содержанию бентонита в портландцементе, так и к температуре контактирования тампонажных материалов с модельным раствором ЖРО.



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

Рисунок 3.9 – Изменение предела прочности на изгиб от времени для тампонажных материалов, контактирующих с модельным раствором ЖРО

Отличие состояло в том, что для образцов портландцемента в смеси с бентонитом повышение температуры до 60 °C практически не сказывалось на достижении наибольшего значения предела прочности на изгиб, достигаемого к 30 суткам выдержки (4 МПа), в то время как для бездобавочного

портландцемента при аналогичном повышении температуры наибольшее значение предела прочности на изгиб к 30 суткам (7,4 МПа) не достигалось наибольшего значения, зафиксированного при 20 °С (8,6 МПа).

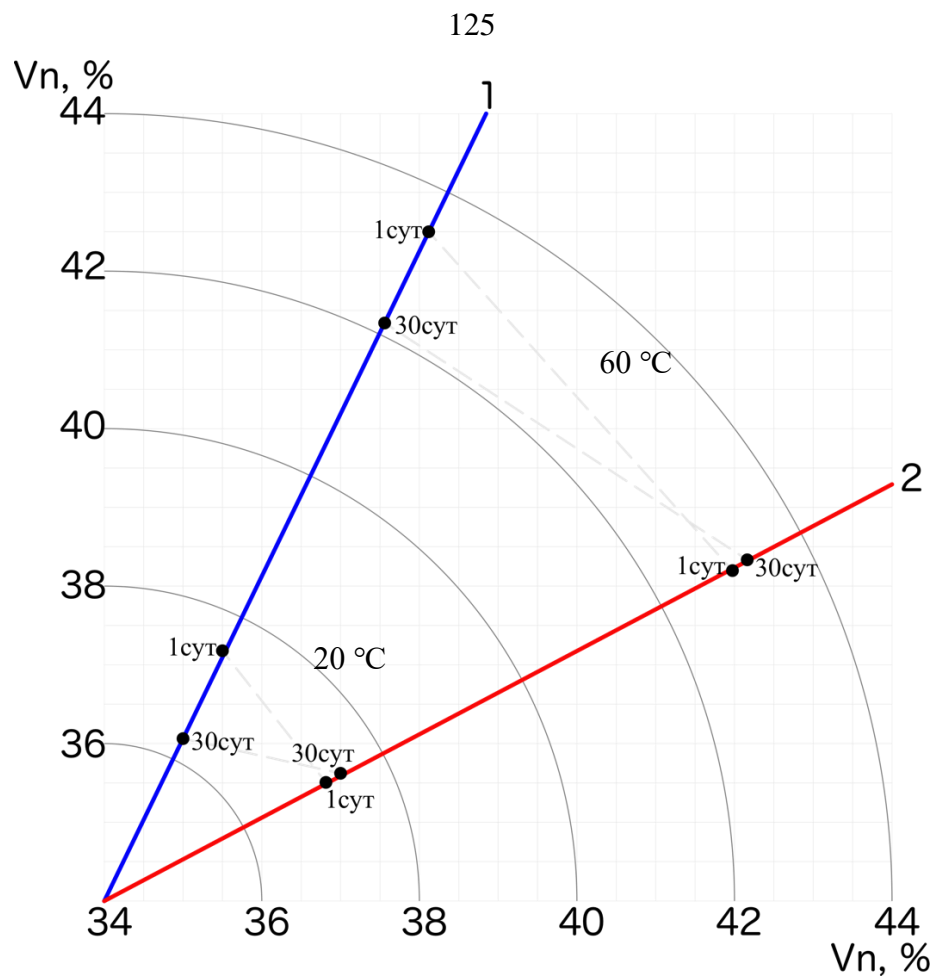
Аналогичным образом было определено, что изменение состава применяемых водных сред практически не влияло на предел прочности данных тампонажных материалов на изгиб.

Согласно полученным данным, увеличение пределов прочности тампонажных материалов практически прямо пропорционально увеличению их плотности в процессе контакта с водными средами.

Одним из основных показателей, определяющих способность радионуклидов к миграции из системы захоронения РАО в доступную биосферу, является пористость применяемого тампонажного материала.

При определении пористости образцов тампонажных материалов в качестве варьируемых параметров использовали: 2 типа тампонажных материалов (портландцемент и его смесь с 10 % бентонита), 2 типа водных сред (подземная вода и модельный раствор ЖРО), 2 значения температуры (20 и 60 °С), 2 значения времени выдержки образцов в водной среде (1 сутки и 30 суток).

В общем виде полученные экспериментальные данные о характере влияния этих факторов на пористость бентонит содержащего тампонажного материала представлены на рисунке 3.10. На приведенной на рисунке 3.10 диаграмме изображены в виде окружностей линии постоянных значений пористости тампонажных материалов; два луча, выходящих из начала координат, соответствуют типу водных сред (1 – подземной воде, 2 – модельному раствору ЖРО); линии между лучами соединяют экспериментально определенные значения пористости образцов, полученные при одинаковом времени контакта с водными средами (1 сутки и 30 суток); линии группируются в зависимости от температуры осуществления экспериментов (20 и 60 °С).



1 – подземная вода, 2 – модельный раствор ЖРО

Рисунок 3.10 – Взаимное влияние типа водной среды, температуры, времени выдержки в водной среде на объем пор ( $V_n$ ) в образцах портландцемента с 10 % бентонита

Из приведенной на рисунке 3.10 диаграммы можно заключить, что:

- с увеличением температуры системы тампонажный материал – водная среда от 20 °C до 60 °C пористость тампонажного материала возростала с 36–38 % до 42–44 % для всех исследуемых водных сред;
- с увеличением времени воздействия подземной воды на тампонажный материал от 1 до 30 суток – его пористость снижалась приблизительно на 1,5 %.

Установленные большие значения пористости данного тампонажного материала обусловлены очень малыми размерами пор. Методом эталонной порометрии было определено, что подавляющее большинство пор (от 90 до 99 % для разных образцов тампонажного материала) имели размер менее 0,004 мкм, а содержание пор размером свыше 1 мкм не превышало 1,5 % и снижалось с увеличением времени воздействия водных сред на тампонажный материал.

Полученные микрофотографии образцов тампонажного материала подтвердили уменьшение размера пор при увеличении времени контакта с водной средой с 1 до 30 суток, как это показано на рисунках 3.11 и 3.12 для образцов, выдержанных при температуре 20 °С.

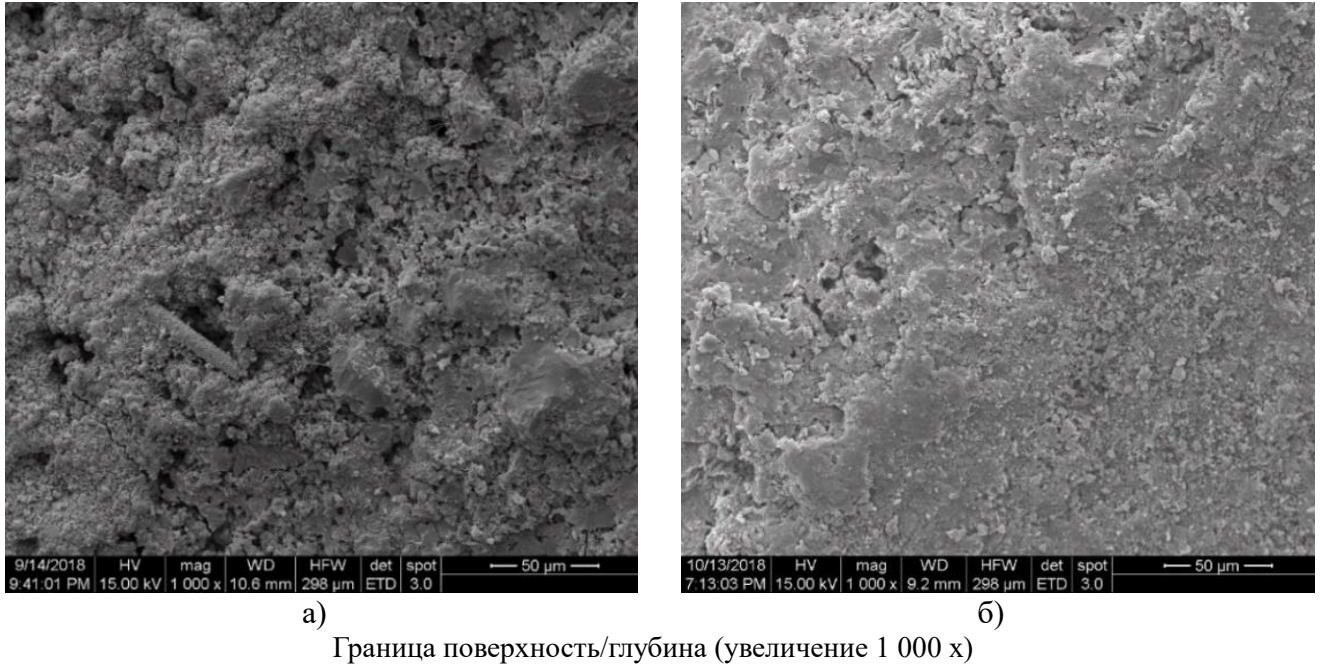


Рисунок 3.11 – Микрофотографии образца портландцемента на 1 (а) и 30 (б) сутки выдержки в модельном растворе ЖРО при температуре 20 °С

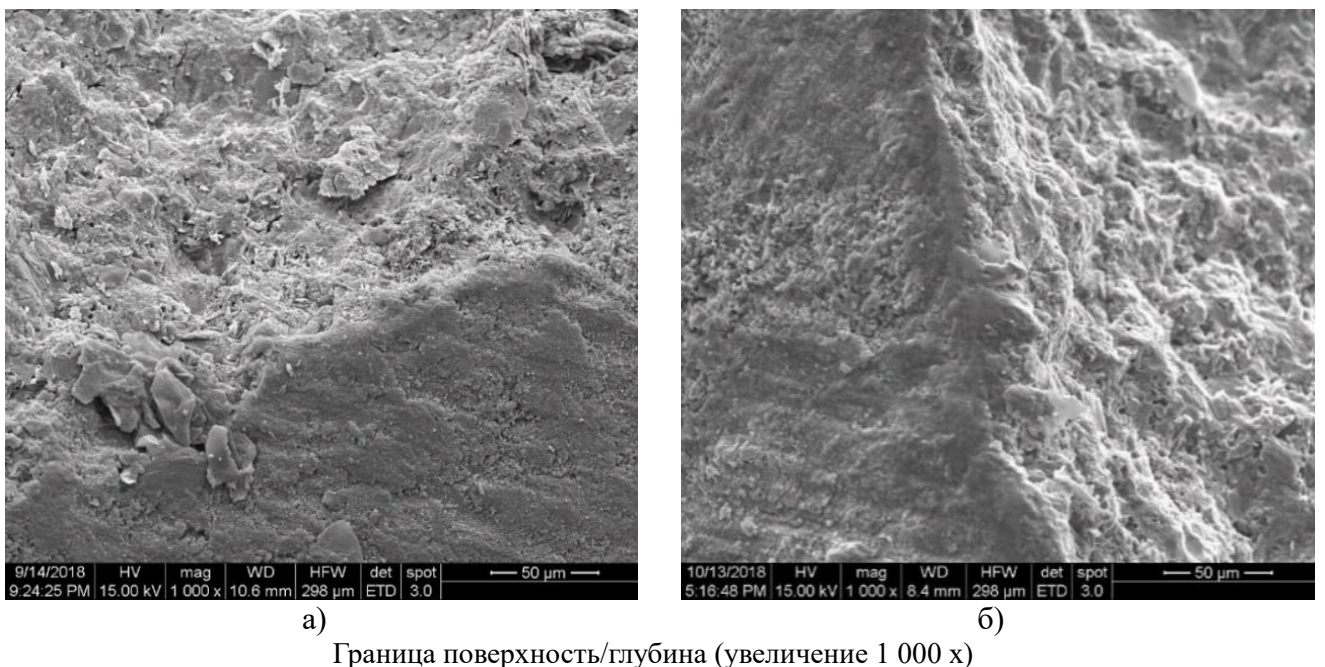


Рисунок 3.12 – Микрофотографии образца портландцемента на 1 (а) и 30 (б) сутки выдержки в подземной воде при температуре 20 °С

По результатам рентгеновской микрофотографии не было обнаружено большего количества видимых микро- и макро-дефектов у всех исследуемых образцов относительно контрольных образцов, что позволило прийти к заключению о неизменной внутренней структуре цементного камня в условиях проведения исследования.

Методом электронной растровой микроскопии не было выявлено признаков коррозионного разрушения, образования иных дефектов, а также изменения пористой структуры тампонажных материалов.

Анализ полученных экспериментальных данных позволил выявить зависимости между характеристиками тампонажных материалов.

На рисунке 3.13 представлены результаты изменения значений пределов прочности на сжатие и изгиб в зависимости от пористости бентонит содержащего тампонажного материала при его выдержке в модельном растворе ЖРО в течение 30 суток при температурах 20 и 60 °С.

Как следует из рисунка 3.13, в данных условиях предел прочности на сжатие снижался с увеличением пористости тампонажного материала, а предел прочности на изгиб не зависел от пористости тампонажного материала.

В соответствии с полученными данными была также определена тенденция к изменению предела прочности на сжатие и пористости бентонит содержащего тампонажного материала при совместном увеличении температуры и времени его выдержки в модельном растворе ЖРО по сравнению с исследованными диапазонами их изменения.

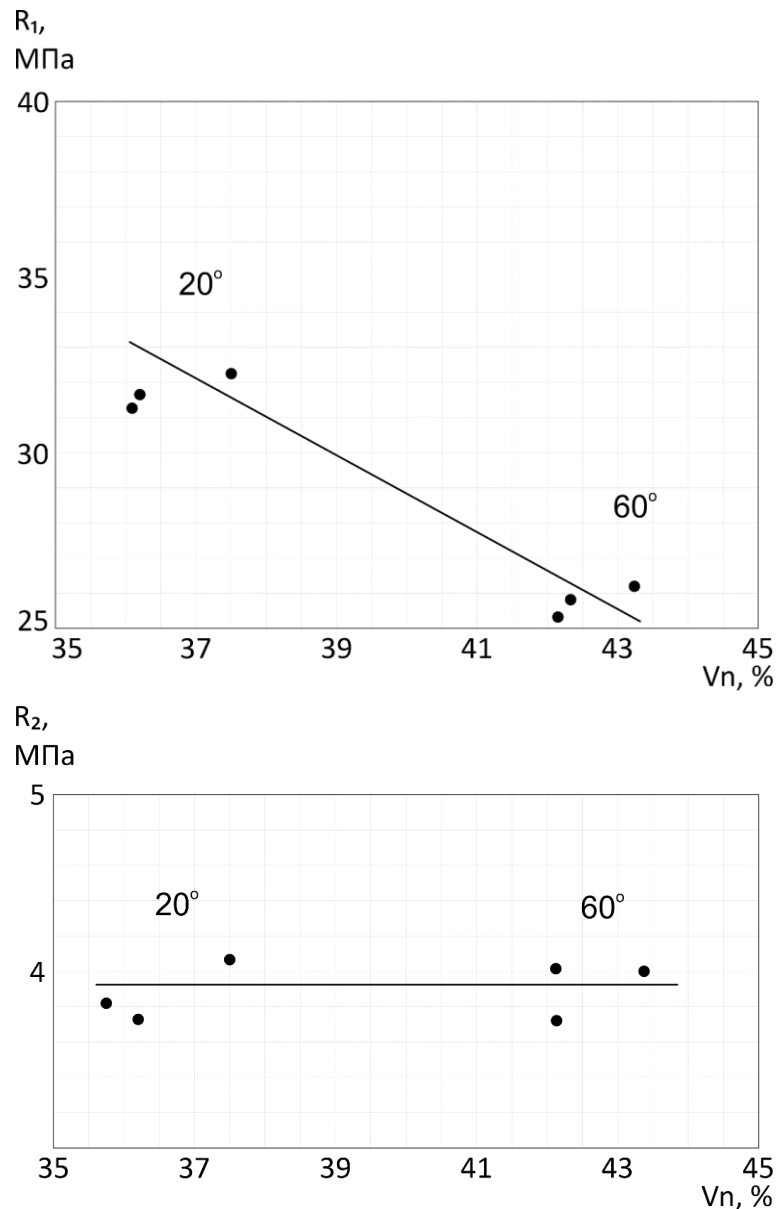


Рисунок 3.13 – Зависимости между пределами прочности на сжатие  $R_1$ , изгиб  $R_2$  и пористостью  $V_n$  бентонит содержащего тампонажного материала при различных температурах выдержки в модельном растворе ЖРО

Для этого экспериментальные данные были представлены в виде схемы, как это показано на рисунке 3.14, на которой стрелками указаны следующие направления:

- 1-2 – увеличение времени выдержки при 20 °С с одних до 30 суток;
- 3-4 – увеличение времени выдержки при 60 °С с одних до 30 суток;
- 1-3 – увеличение температуры при времени выдержки одни сутки с 20 до 60 °С;
- 2-4 – увеличение температуры при времени выдержки 30 суток с 20 до 60 °С.



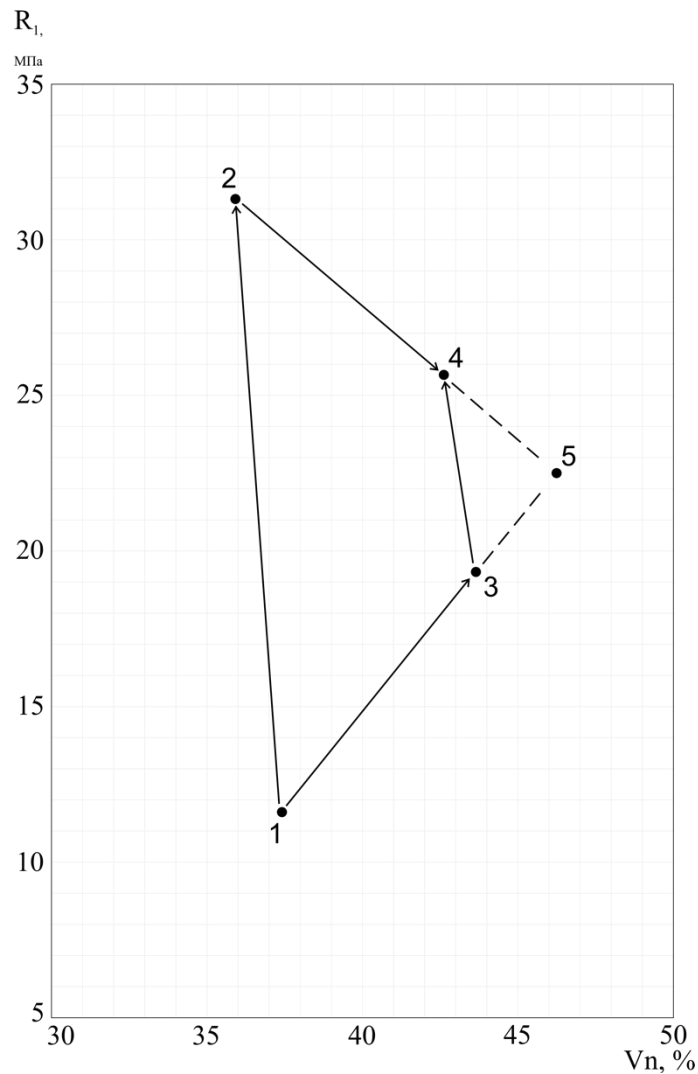


Рисунок 3.14 – Схема изменения предела прочности на сжатие  $R_1$  от пористости  $V_n$  бентонит содержащего тампонажного материала при различных температурах выдержки в модельном растворе ЖРО

Согласно приведенной схеме, увеличение предела прочности на сжатие при снижении пористости тампонажного материала при 20 °С происходило с увеличением времени его выдержки в модельном растворе ЖРО в существенно большем интервале значений по сравнению с 60 °С. При этом, при времени выдержки одни сутки увеличение температуры приводило к росту предела прочности на сжатие, а при времени выдержки 30 суток, соответственно, к снижению значения предела прочности на сжатие.

Экстраполяция в сторону больших температур приводит к пересечению линий 2-4 и 1-3 в точке 5, в которой достигаются постоянные значения предела прочности на сжатие и пористости бентонит содержащего тампонажного материала вне зависимости от времени его выдержки в модельном растворе ЖРО.

Полученные предельные значения при этом составили: 22 МПа для предела прочности на сжатие при 46 % пористости тампонажного материала.

Можно ожидать, что в условиях близких к исследованным значения пределов прочности на сжатие и изгиб для бентонит содержащего тампонажного материала с течением времени после ликвидации скважин стабилизируются на достаточно высоком уровне, а микропоры в тампонажном материале не будут увеличиваться в размере и обеспечат низкую водопроницаемость и, соответственно, приемлемо безопасную миграцию радионуклидов через тампонажный материал.

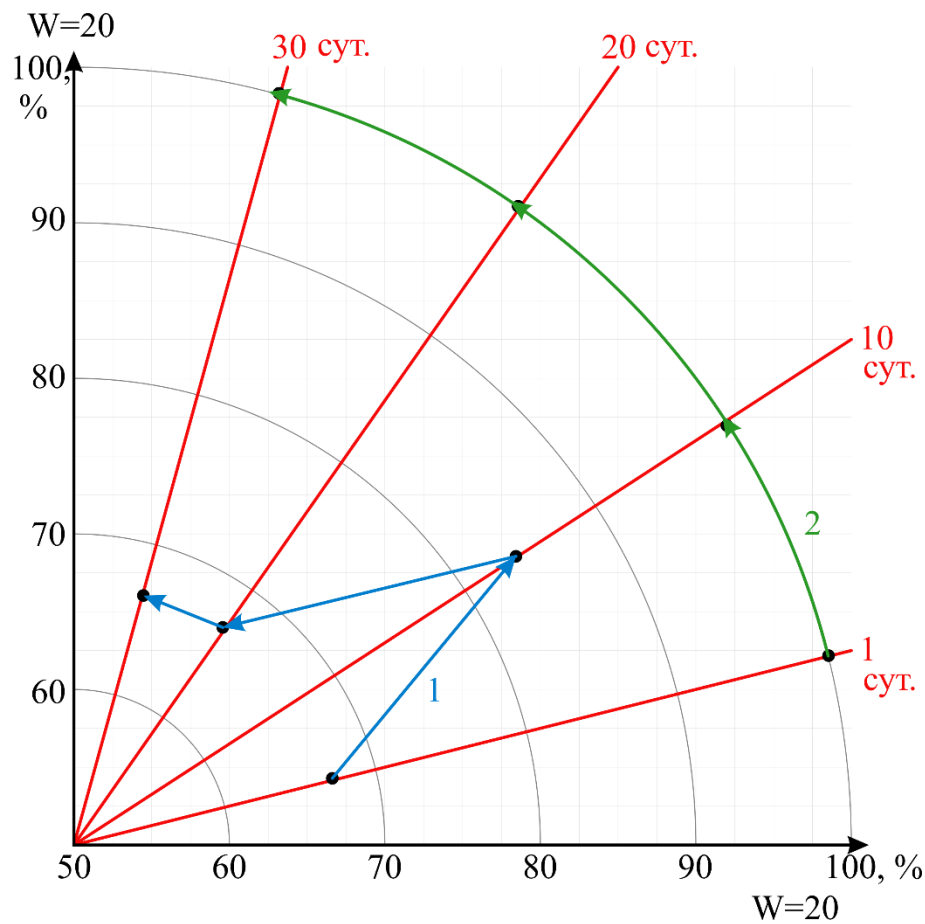
Для подтверждения этого, следующим этапом определения характеристик, исследуемых тампонажных материалов была оценка их водонепроницаемости [102]. Для этого на устройстве типа «Агама-2Р» определяли значения параметра воздухонепроницаемости ( $\text{см}^3/\text{с}$ ) и по ним устанавливали марку по водонепроницаемости ( $W$ ) цементного камня, которая может принимать значения от 2 до 20. Каждая величина водонепроницаемости была определена по результатам 6 параллельных опытов.

Результаты измерения изолирующей способности исследуемых тампонажных материалов показали, что для всех варьируемых условий марка по водонепроницаемости, за некоторым исключением (соответствующим отнесению к марке  $W = 18$ ), относится к наивысшей по показателю водонепроницаемости марке  $W = 20$ , что соответствует значениям параметра воздухонепроницаемости  $0,0112\text{--}0,0077 \text{ см}^3/\text{с}$  и сопротивлению проникновения воздуха  $88,6\text{--}130,2 \text{ с}/\text{см}^3$ .

При этом в каждой серии из шести параллельных опытов наблюдали разное соотношение между установленными марками водонепроницаемости  $W = 18$  и  $W = 20$ .

В связи с этим, далее было оценено влияние варьируемых параметров на водонепроницаемость тампонажных материалов по процентному достижению марки  $W = 20$ .

Пример такой оценки показан на рисунке 3.15 применительно к воздействию модельного раствора ЖРО на образцы портландцемента и его смеси с бентонитом при  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .



линии 1 (синий) – образцы бентонит содержащего тампонажного материала;  
линии 2 (зеленый) – образцы бездобавочного портландцемента.

Рисунок 3.15 – Взаимосвязь между отнесением образцов тампонажных материалов к марке  $W = 20$  по водонепроницаемости от времени их выдержки в модельном растворе ЖРО

На приведенной на рисунке 3.15 диаграмме изображены в виде окружностей линии постоянных значений процентного отнесения образцов тампонажных материалов к марке  $W = 20$  по водонепроницаемости; четыре луча, выходящих из начала координат соответствуют четырем значениям времени выдержки в модельном растворе ЖРО (1, 10, 20 и 30 суток); линии между лучами соединяют установленные процентные значения образцов, отнесенных по водонепроницаемости к марке  $W = 20$  (линия 1 относится к образцам бездобавочного портландцемента, линия 2 – к образцам его смеси с бентонитом).

Согласно проведенной оценке и в соответствии с рисунком 3.15:

– образцы смеси портландцемента с бентонитом в целом обладают большей водонепроницаемостью по сравнению с бездобавочным портландцементом;

– в общем случае водонепроницаемость может возрастать с увеличением времени контакта с водными средами с последующим некоторым снижением (в пределах отнесения к маркам  $W = 18$  и  $W = 20$ ).

На заключительном этапе исследования физико-механических свойств тампонажных материалов определяли коэффициенты фильтрации для исследуемых образцов с использованием установки УВБ-МГ по следующей формуле:

$$K_{\phi} = \frac{Q \cdot h \cdot \mu}{F \cdot P \cdot t} \cdot 10^{-2}, \quad (3.1)$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации, см/с;

$Q$  – количество фильтрата, см<sup>3</sup>;

$h$  – высота испытываемого образца, см;

$F$  – площадь поперечного сечения образца, см<sup>2</sup>;

$P$  – давление воды на образец, МПа;

$t$  – время фильтрации, с;

$\mu$  – вязкость воды (1,08 температура воды 17 °С).

Максимальное давление на рабочую площадь образца составляло 2 МПа. Точность поддержания давления в течение всего времени испытания (86 часов) составляла 6 %. Количество влаги, прошедшей через образец, измеряли по ее поглощению силикагелем.

Определенные значения коэффициента фильтрации оказались равными:

– при температуре 20 °С:  $5,7 \cdot 10^{-12}$  см/с ( $4,9 \cdot 10^{-9}$  м/сутки) для обеих водных сред, воздействующих на портландцемент, и  $5,1 \cdot 10^{-12}$  см/с ( $4,4 \cdot 10^{-9}$  м/сутки) – применительно к смеси портландцемента с бентонитом;

– при температуре 60 °С:  $5,5 \cdot 10^{-12}$  см/с ( $4,7 \cdot 10^{-9}$  м/сутки) для обоих тампонажных материалов, контактирующих с природной водой;  $5,1 \cdot 10^{-12}$  см/с ( $4,4 \cdot 10^{-9}$  м/сутки) – контактирующих с модельным раствором ЖРО.

Следует отметить, полученные значения коэффициента фильтрации ( $4,4 \cdot 10^{-9}$  м/сутки) для обоих тампонажных материалов, контактирующих с модельным раствором ЖРО, существенно ниже величин ( $5 \cdot 10^{-5}$  м/сутки), используемых в модели для оценки заколонных перетоков компонентов РАО (раздел 3.2).

Проведенная комплексная оценка изменения физико-механических свойств портландцемента и его смеси с 10 % бентонита в результате воздействия на них водных сред системы захоронения РАО рассматриваемого ПГЗ ЖРО «Железногорский» (модельных растворов ЖРО и воды эксплуатационных горизонтов), позволила:

– установить типы зависимостей пределов прочности этих материалов на сжатие и изгиб, их плотности от времени контакта с водными средами при варьировании значений температуры;

– определить для исследованных систем значения показателей, характеризующих защитные свойства тампонажных материалов: водонепроницаемости и коэффициента фильтрации.

Полученные данные об изменении защитных свойств тампонажных материалов относятся к начальному этапу воздействия водных сред на исследуемые материалы. Вместе с тем, отмечена стабилизация значений показателей их защитных свойств по достижении 30 суток выдержки в водных средах.

### 3.5 Краткие выводы к главе 3

1) Выполнен анализ опытных данных по заколонным перетокам компонентов РАО по стволам скважин ПГЗ ЖРО. Установлено, что причинами ухудшения герметичности скважин и образования каналов перетекания в их заколонном пространстве являются физические воздействия и физико-химические процессы, которые происходят в контакте «обсадная колонна – цементный камень – горные породы» и обусловлены главным образом техногенными факторами. При этом заколонные перетоки развиваются в основном в скважинах, которые используются как нагнетательные.

2) Для моделирования заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» была разработана математическая сеточная модель. В модели реализован нестационарный режим трехмерного по структуре потока подземных вод и воспроизведена основная особенность гидрогеологических условий – напор подземных вод в эксплуатационном горизонте

ниже, чем в вышележащем буферном. Учтены процессы инфильтрационного питания и испарения подземных вод. Граничные и начальные условия модельного геофильтрационного потока на участке максимально приближены к реальным, установленным по результатам анализа гидродинамической структуры потоков подземных вод различных водоносных горизонтов.

3) На основе данных моделирования с использованием аналитических формул была выполнена оценка показателей перетекания (расхода, скорости, объема перетока) в наихудших условиях. Результаты анализа данных мониторинга и моделирования позволили оценить размеры области распространения компонентов РАО, которая образовалась в системе захоронения РАО в результате заколонного перетекания компонентов РАО по стволу нагнетательной скважины Н-10 ПГЗ ЖРО «Железногорский».

4) Количество компонентов РАО, которое может поступить в горизонты, залегающие выше эксплуатационного, в результате заколонного перетекания по одной нагнетательной скважине для условий ПГЗ ЖРО «Железногорский» за многолетний период несоизмеримо меньше общего объема ЖРО, размещенных в системе захоронения РАО и оценивается порядком первых десятков и сотен кубических метров.

5) Естественные барьеры безопасности (геологическая среда) препятствуют восходящему движению компонентов РАО по стволам скважин, проявляя одновременно коллекторские и изолирующие свойства. Хорошо проницаемые слои по отношению к перетекающим компонентам РАО являются внутренними коллекторами, а слабопроницаемые слои – водоупорами. Кроме этого, при благоприятных гидрогеологических условиях возникающий в канале перетекания нисходящий поток подземных вод может выполнять роль гидродинамического барьера.

6) В постэксплуатационный 300-летний период (после ликвидации скважины Н-10 и закрытия ПГЗ ЖРО «Железногорский») наибольшая дальность миграции компонентов РАО в плане в горизонтах, залегающих выше эксплуатационного, в разных условиях варьирует от десятков до первых сотен

метров. В области распространения отходов содержание компонентов РАО в подземных водах может составлять  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  от содержания в ЖРО. При этом непосредственно в канале перетекания концентрация компонентов РАО будет на порядок выше.

7) Специально организованный мониторинг состояния недр и технического состояния скважин позволяет обнаружить восходящую миграцию компонентов РАО по стволам скважин раньше, чем они достигнут буферного горизонта.

8) Способы предотвращения образования каналов и развития в них заколонных перетоков РАО должны быть направлены на совершенствование тампонажных материалов и методов цементирования (ликвидации) скважин, усиление конструкции скважин над их фильтром, создание локальных превентивных гидроизоляционных завес, минимизацию техногенного воздействия на скважину на всех этапах ее «жизненного цикла».

9) Выполнена оценка изменения физико-механических свойств портландцемента и его смеси с 10 % бентонита в результате воздействия на них водных сред системы захоронения РАО рассматриваемого ПГЗ ЖРО (модельных растворов ЖРО и вод эксплуатационных горизонтов).

10) Установлены типы зависимостей пределов прочности образцов тампонажных материалов на сжатие и изгиб, их плотности от времени контакта с водными средами при варьировании значений температуры.

11) Для исследованных образцов определены значения показателей, характеризующих защитные свойства тампонажных материалов: водонепроницаемости и коэффициента фильтрации.

12) Полученные данные о воздействии водных сред на изменение защитных свойств тампонажных материалов относятся к этапу начала твердения и набора прочности, при этом отмечена стабилизация значений физико-механических характеристик и защитных свойств по достижении 30 суток выдержки в водных средах.

#### **Глава 4. Разработка и применение концептуальных положений по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО**

Обоснование и обеспечение долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО непосредственным образом связано с обоснованием безопасности его закрытия [105].

Закрытие ПГЗ ЖРО является комплексом технических решений и организационных мероприятий, направленных на достижение конечного состояния ПГЗ ЖРО после его закрытия, обеспечивающих безопасность человека и окружающей среды в течение потенциальной опасности захороненных РАО.

Согласно требованиям нормативных правовых актов [15, 16, 56] «деятельность по закрытию ПГЗ ЖРО должна осуществляться в соответствии с программой (планом) закрытия и проектной документации закрытия ПГЗ ЖРО, разработанными для выбранного варианта закрытия». Выбор варианта закрытия ПГЗ ЖРО, в том числе ПГЗ ЖРО «Железногорский», должен осуществляться в соответствии с требованиями нормативных документов с учетом:

- организационных мероприятий и «технических решений, принятых и обоснованных в проектной документации» [56] и отчете по обоснованию безопасности ПГЗ ЖРО;
- «условий размещения ПГЗ ЖРО: устойчивости системы захоронения РАО к внешним воздействиям природного и техногенного происхождения; характеристик района и площадки размещения ПГЗ ЖРО, а также окружающей среды, которые могут оказывать влияние на перенос (миграцию) и накопление компонентов РАО при закрытии и после закрытия ПГЗ ЖРО» [56];
- «количества и характеристик ЖРО, размещенных в системе захоронения РАО закрываемого ПГЗ ЖРО, таких как радионуклидный состав, удельная (объемная) и суммарная активность, период потенциальной опасности» [56];
- «фактического состояния ПГЗ ЖРО и барьеров безопасности системы захоронения РАО» [56];
- «радиационных последствий аварий, произошедших при эксплуатации ПГЗ ЖРО» [56];



- эксплуатационной документации ПГЗ ЖРО;
- «наличия методов, средств и технологий дезактивации и демонтажа оборудования, трубопроводов», емкостей, зданий, сооружений ПГЗ ЖРО, а также методов, средств и технологий» [56] ликвидации эксплуатационных скважин;
- «возможности использования существующих систем, элементов, сооружений (например, грузоподъемных кранов, транспортно-технологического оборудования, системы вентиляции, системы радиационного контроля, систем связи и сигнализации, систем обращения с РАО и др.) при закрытии ПГЗ ЖРО» [56];
- «возможного радиационного воздействия работ по закрытию ПГЗ ЖРО на персонал, население и окружающую среду» [56];
- «результатов оценки безопасности ПГЗ ЖРО, включающей прогнозный расчет долговременной безопасности системы захоронения РАО, результаты оценки доз (рисков) для персонала, населения и воздействия на окружающую среду» [56] при закрытии ПГЗ ЖРО и после его закрытия;
- «результатов радиационного контроля» [56] и мониторинга системы захоронения РАО в период эксплуатации ПГЗ ЖРО, в том числе результатов наблюдений за распространением компонентов РАО;
- «возможности обеспечения физической защиты закрытого ПГЗ ЖРО» [56].

Вне зависимости от выбранного варианта необходимо осуществить подготовительные мероприятия к закрытию ПГЗ ЖРО уже на этапе эксплуатации. При этом необходимо учесть, что в период закрытия ПГЗ ЖРО, а также после его закрытия для подтверждения конечного состояния должен проводиться радиационный контроль и мониторинг системы захоронения РАО. Однако состав и периодичность наблюдений могут быть обоснованно сокращены по сравнению с этапом эксплуатации ПГЗ ЖРО.

#### 4.1 Основные концептуальные положения о системе организационно-технических мер, необходимых для безопасного закрытия ПГЗ ЖРО

Анализ технологических решений по ликвидации скважин (раздел 2.3), обязательных требований ФНП позволил сформулировать и систематизировать основные концептуальные положения закрытия ПГЗ ЖРО.

Согласно [56] ПГЗ ЖРО удовлетворяет требованиям безопасности в период после его закрытия, если:

- при нормальном (эволюционном) протекании естественных процессов на площадке размещения ПГЗ ЖРО (при наиболее вероятных сценариях эволюции системы захоронения РАО) его радиационное воздействие на население не приведет к превышению допустимого уровня, установленного в соответствии с санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности;

- при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера на площадке размещения ПГЗ ЖРО (при маловероятных сценариях распространения радионуклидов из системы захоронения РАО) для критической группы населения не будет превышено граничное значение обобщенного риска, установленного санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности.

Анализ обязательных требований безопасности, установленных в ФНП [56, 57, 106, 107, 108, 109, 110] позволил сформировать систему поэтапного безопасного закрытия ПГЗ ЖРО и представить ее в виде схемы, как показано на рисунке 4.1 [74].

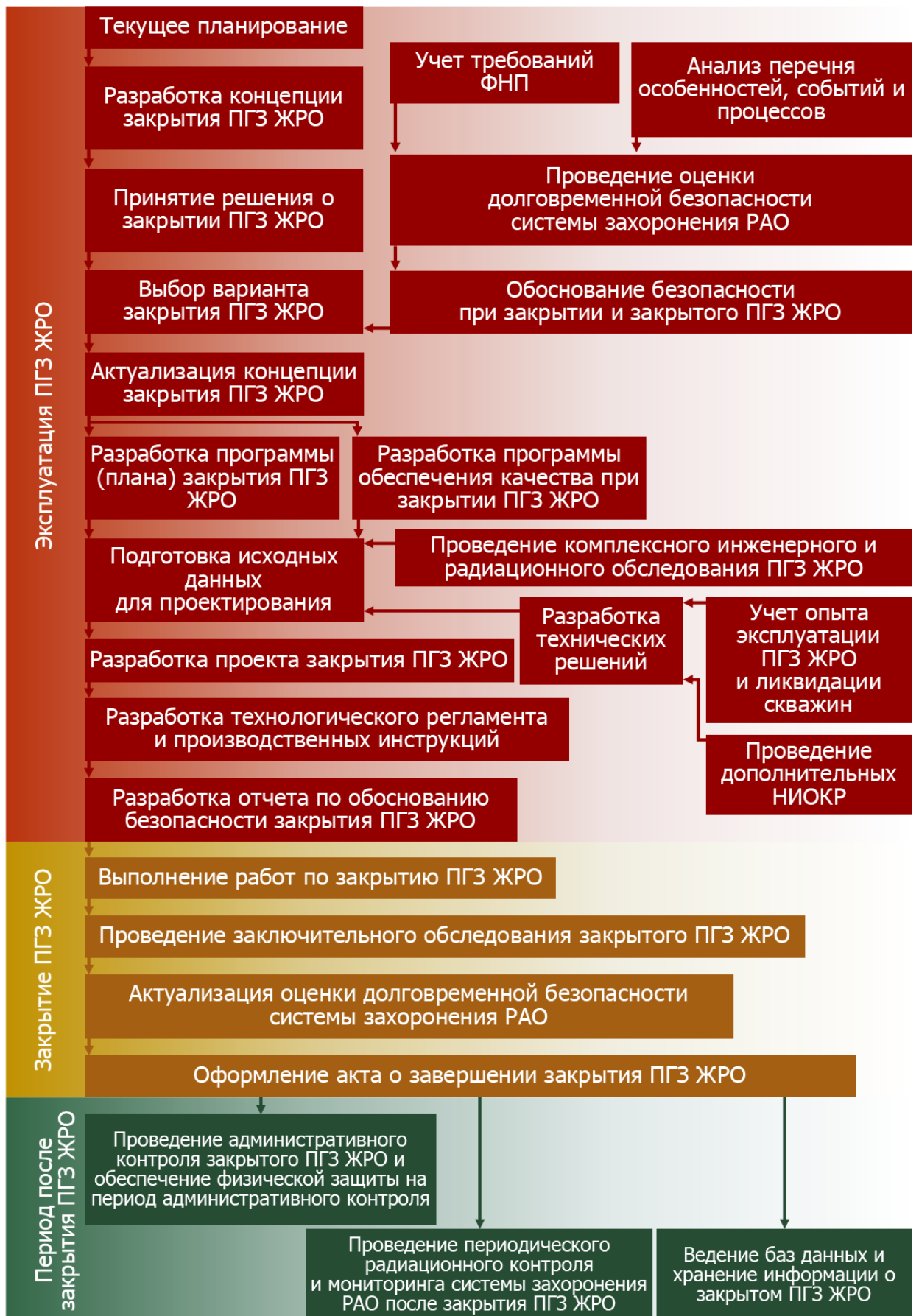


Рисунок 4.1 – Общая схема этапов закрытия ПГЗ ЖРО

В соответствии с данной схемой работы, связанные с закрытием ПГЗ ЖРО, начинаются еще на этапе эксплуатации при текущем планировании работ по закрытию с разработки концепции закрытия и принятия (обоснования) решения о его закрытии. Закрытие ПГЗ ЖРО завершается после достижения (обоснования) установленного в проекте его закрытия конечного состояния с оформлением эксплуатирующей организации соответствующего документа (акта), подтверждающего завершение работ по закрытию ПГЗ ЖРО.

В документе должно быть показано соответствие фактического состояния ПГЗ ЖРО и площадки его размещения на момент завершения работ по закрытию конечному состоянию, определенному в проекте закрытия ПГЗ ЖРО.

Разработанная система организационно-технических мер по обеспечению безопасности закрытия ПГЗ ЖРО включает следующие положения.

1) Определение направлений деятельности по закрытию ПГЗ ЖРО по выбранному варианту с целью достижения конечного состояния ПГЗ ЖРО после закрытия, обеспечивающего безопасность человека и окружающей среды на период потенциальной опасности захороненных РАО.

2) Достижение конечного состояния осуществляется посредством:

– ликвидации поверхностной части ПГЗ ЖРО – вывод из эксплуатации (деактивации, демонтажа, ликвидации либо репрофилирования) поверхностных объектов (зданий, сооружений, емкостей, трубопроводов, оборудования и др.);

– поэтапной ликвидации подземных сооружений (эксплуатационных скважин);

– проведения дополнительных изоляционных мероприятий в недрах (при необходимости);

3) Естественные барьеры безопасности выполняют функции по локализации компонентов РАО и изоляции их от человека и окружающей среды. Геологическое строение района и площадки размещения ПГЗ ЖРО и свойства поглощающих (эксплуатационных) и вышележащих (водоупорных и буферного) горизонтов препятствуют негативному воздействию компонентов РАО на человека

и окружающую среду в период эксплуатации, закрытия и после закрытия ПГЗ ЖРО.

4) Эксплуатационные скважины различного назначения являются элементами, влияющими на безопасность в период после закрытия ПГЗ ЖРО. При сооружении скважин изменяются природные свойства геологической среды в месте их бурения и создаются потенциальные каналы связи эксплуатационных горизонтов, предназначенных для захоронения ЖРО, с земной поверхностью и неглубокозалегающими горизонтами подземных вод. Конструктивные и технологические решения по ликвидации скважин должны предусматривать применение эффективных тампонажных материалов, изолирующих эксплуатационные горизонты от вышележающих горизонтов и земной поверхности. Применение таких материалов определяется с учетом их способности после твердения образовывать непроницаемые композиции, сохраняющие свои изолирующие свойства в условиях геологической среды в течение длительных периодов времени.

5) После прекращения использования поверхностные объекты ПГЗ ЖРО должны быть дезактивированы и демонтированы или перепрофилированы для использования по другому назначению.

6) Безопасное закрытие ПГЗ ЖРО обеспечивается выполнением следующих решений:

- применением технических решений по безопасной ликвидации (тампонированию) эксплуатационных скважин, разработанных с учетом текущего технического состояния самой скважины, эволюционного состояния эксплуатационного горизонта, содержащего компоненты захороненных РАО, и вышележащих (водоупорных и буферного) горизонтов на участках размещения скважин;

- предусмотрением возможности дальнейшего безопасного использования наблюдательных скважин для целей мониторинга за состоянием системы захоронения РАО;

- ликвидацией скважин после установления стабильного температурного режима водных сред эксплуатационном горизонте, содержащих тепловыделяющие РАО;
- дезактивацией демонтируемых (и 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 систем и элементов наземной инфраструктуры, за исключением объектов, необходимых для мониторинга системы захоронения РАО и системы физической защиты;
- рекультивацией площадки размещения ПГЗ ЖРО до уровней радиоактивного загрязнения, характерных для участков территорий, примыкающих к площадке 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 территории ПГЗ ЖРО после закрытия, а также дозиметрического контроля персонала и контроля уровней радиоактивного загрязнения оборудования, используемого при проведении мониторинга;
- выполнением НИОКР на этапах закрытия ПГЗ ЖРО, включающих:
  - анализ изменения топографических, гидрометеорологических, климатических, демографических, гидрологических, гидрогеологических, инженерно-технологических, геолого-тектонических, геодинамических, геологических, сеймотектонических 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 всех возможных путей и особенностей миграции радионуклидов в окружающую среду и уточнения периода потенциальной опасности захороненных РАО;
- определение значений прогнозируемых доз облучения критической группы населения на различных этапах закрытия ПГЗ ЖРО;
- уточнение и пересмотр критериев, характеризующих конечное состояние закрытого ПГЗ ЖРО;
- отработку технологии ликвидации скважин и подбор тампонажных материалов для их ликвидации;
- проведением всех работ по закрытию ПГЗ ЖРО в соответствии с программой обоснования 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.

#### 4.2 Основные концептуальные положения по долговременному мониторингу системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО

Целью радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО (долговременный мониторинг) является подтверждение безопасности системы захоронения РАО, в том числе целостности барьеров безопасности, а также выбранных проектом закрытия ПГЗ ЖРО технических решений и организационных мероприятий по обеспечению безопасности системы захоронения РАО на значительный период времени.

Долговременный мониторинг выполняется периодическими наблюдениями за состоянием системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО. По результатам наблюдений оценивается радиационное воздействие,

обусловленное захоронением РАО, на окружающую среду и человека, а также эффективность организационных решений и технических мероприятий, выполненных при закрытии ПГЗ ЖРО. Долговременный мониторинг системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО включает в себя не только контроль за изменением и оценкой факторов воздействия, но и прогнозное моделирование, выполняемое с целью разработки рекомендаций по управлению мониторингом и подтверждения безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО [111].

Подтверждение безопасности системы захоронения РАО при проведении долговременного мониторинга сводится к оценке состояния эксплуатационного горизонта и находящихся в нем компонентов РАО, состояния вышележащих водоносных горизонтов на участке захоронения ЖРО, которые используются или перспективны для использования в качестве источников водоснабжения, состояния естественных барьеров безопасности – буферного горизонта, залегающего выше эксплуатационного, состояния инженерных барьеров безопасности – ликвидированных скважин.

Мониторинг состояния системы захоронения РАО включает:

- мониторинг состояния недр, заключающийся в своевременном получении информации о положении компонентов РАО в геологической среде;
- мониторинг барьеров безопасности – системные наблюдения и контроль за состоянием инженерных и естественных барьеров безопасности.

Работы по ведению мониторинга системы захоронения РАО выполняются в соответствии с программой долговременного мониторинга, разработанной с учетом результатов эксплуатации и закрытия ПГЗ ЖРО и корректируемой по результатам выполняемых наблюдений.

В состав мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО входят: определение химического и радионуклидного состава проб подземных вод, отбираемых из наблюдательных скважин, проб из поверхностных водных объектов, в том числе их донных отложений в местах возможной разгрузки загрязненных подземных вод в поверхностную гидросеть, замеры уровней



подземных вод и геофизические измерения в наблюдательных скважинах (пунктах наблюдений). Периодичность наблюдений и измерений определяется проектом закрытия ПГЗ ЖРО, разрабатываемого также с учетом научно-исследовательских работ, выполняющихся при подготовке ПГЗ ЖРО к закрытию (раздел 4.1).

К основным методам наблюдения за состоянием системы захоронения РАО следует отнести:

- гидрохимический, включающий отбор проб подземных вод из наблюдательных скважин с последующим химическим и радиохимическим анализом на радиоактивные и на нерадиоактивные компоненты РАО, а также на показатели состава подземных вод, свидетельствующие об их изменениях, обусловленных захоронением ЖРО;

- гидродинамический, включающий определение положения уровней (глубины, относительные отметки) подземных вод в наблюдательных скважинах или давлений на их устьях (в случае установлений уровней выше поверхности земли и устья скважины);

- геофизический, включающий измерения в скважинах геофизических полей, изменяющихся вследствие захоронения ЖРО: характеристик мощности дозы гамма-излучателя, температуры, электропроводности жидкости.

В состав определяемых показателей в пробах подземных вод входят: активность трития, активности альфа- и бета-излучающих радионуклидов, радионуклидный состав, концентрация нитратных соединений, общее солесодержание. Определяемый радионуклидный состав уточняется с учетом местоположения наблюдательной скважины, времени ее опробования после закрытия ПГЗ ЖРО, миграционной способности радионуклидов в геохимической обстановке системы захоронения РАО.

Организация наблюдений, периодичность, применяемые методы и приборы принимаются в зависимости от вида наблюдаемого объекта (эксплуатационный или вышезалегающий горизонт), от местоположения пункта наблюдения (расстояния от наблюдательной скважины до нагнетательных скважин), присутствия компонентов РАО в месте расположения скважины по данным

предшествующих наблюдений, положения ореола распространения компонентов РАО в контролируемом горизонте.

В состав геофизических измерений входят методы, способные определить целостность естественных и инженерных барьеров безопасности – гамма-каротаж, термометрия, резистивиметрия, акустическая цементометрия, электромагнитная дефектоскопия и толщинометрия.

Обработка и анализ данных, полученных при контроле и наблюдениях, заключается в заполнении информационно-аналитической электронной базы данных о состоянии системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

В базу данных должны быть включены все накопленные данные о ПГЗ ЖРО, включая документацию о геологоразведочных работах, проектировании, сооружении, эксплуатации (включая опытно-промышленную), реконструкциях, продлении срока эксплуатации и закрытии ПГЗ ЖРО, результаты радиационного контроля, а также мониторинга системы захоронения РАО (геофизические, гидрогеологические и гидрогеохимические материалы), которые необходимы для уточнения характеристик процессов, протекающих в системе захоронения РАО, и повышения надежности прогнозов изменения состояния системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

С учетом актуальных данных о результатах мониторинга системы захоронения РАО периодически должна выполняться качественная и количественная реинтерпретация имеющихся прогнозных расчетов, с проведением уточняющихся прогнозных расчетов состояния системы захоронения РАО. Для этого на завершающей стадии эксплуатации ПГЗ ЖРО и после его закрытия необходима регулярная калибровка геофильтрационных и геомиграционных моделей, учитывающая результаты мониторинга системы захоронения РАО и повышение общего уровня развития науки и техники.

По результатам анализа полученных наблюдений и проведения уточняющих прогнозных расчетов выполняется оценка состояния системы захоронения РАО и при необходимости оптимизация последующего мониторинга с разработкой соответствующих технических решений и организационных мероприятий.

Решение о безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО и о допустимом ожидаемом воздействии на окружающую среду и человека принимается, если будут выполняться следующие условия:

- загрязнение территории размещения закрытого ПГЗ ЖРО компонентами РАО не превышает уровни, установленные нормативными документами для неограниченного использования или уровни, обусловленные воздействием других источников, не связанных с эксплуатацией ПГЗ ЖРО;

- радиоактивные компоненты захороненных РАО с удельной активностью выше установленной нормативными документами для отнесения к РАО (пластовых вод – к ЖРО, горных пород в целом – к ТРО), и нерадиоактивные компоненты РАО в концентрациях, превышающих пределы, определенные санитарно-эпидемиологическими нормативами, будут находиться в эксплуатационных и буферном горизонтах в границах горного отвода;

- загрязнение неглубокозалегающих горизонтов подземных вод на площадке и в районе размещения закрытого ПГЗ ЖРО, обусловленное захоронением ЖРО, не приведет к загрязнению водотоков и водозаборов поверхностных и подземных вод в течение всего периода потенциальной опасности РАО;

- максимальная прогнозируемая доза облучения критической группы населения вследствие разгрузки вод эксплуатационных горизонтов, содержащих компоненты РАО, в поверхностные водотоки будет достигнута не ранее чем через установленный в проекте закрытия ПГЗ ЖРО период времени;

- при вероятных сценариях эволюции системы захоронения РАО радиационное воздействие на человека не приведет к превышению допустимого уровня, установленного в соответствии с санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности;

- при маловероятных (катастрофических) внешних воздействиях природного и техногенного характера на систему захоронения РАО для критической группы населения не будет превышено граничное значение

обобщенного риска, установленного санитарными правилами и нормативами радиационной безопасности.

По результатам долговременного мониторинга в случае необходимости могут выполняться дополнительные работы, связанные с увеличением или сокращением объемов наблюдений, ликвидацией наблюдательных скважин, уже выполнивших свое назначение, или бурением новых скважин.

Продолжительность проведения долговременного мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО устанавливается и обосновывается в проекте закрытия ПГЗ ЖРО, разрабатываемом с учетом научно-исследовательских работ, выполняющихся при подготовке к закрытию ПГЗ ЖРО. Срок окончания проведения радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО зависит от периода потенциальной опасности захороненных ЖРО и их радионуклидного состава.

При разработке проекта закрытия ПГЗ ЖРО в рамках оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО с использованием прогнозных расчетов на постоянно действующих геофильтрационных и геомиграционных моделях устанавливается срок, в течение которого эксплуатирующая организация осуществляет мониторинг системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО. Этот срок зависит от множества факторов, таких как: геологические условия площадки и района размещения ПГЗ ЖРО, состав захороненных ЖРО, срок использования эксплуатационного горизонта, а также мероприятий, выполненных при закрытии ПГЗ ЖРО (технологии ликвидации скважин, применяемые материалы и т. п.). В связи с этим целесообразно проводить уточняющие прогнозные расчеты для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО после завершения мероприятий по закрытию ПГЗ ЖРО предусмотренных соответствующим проектом.

Согласно требованиям [56], мониторинг системы захоронения РАО прекращается, когда его результаты подтверждают безопасность системы захоронения РАО. Таким образом, необходимо периодически проводить оценку долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия

ПГЗ ЖРО и прогнозные расчеты на геофильтрационных и геомиграционных моделях, учитывающих результаты проведения долговременного мониторинга.

4.3 Практическое применение разработанных концептуальных положений по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО

На основании приведенных в разделе 4.1 концептуальных положений были систематизированы и сформулированы требования к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, которые были учтены при разработке ФНП «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) [112].

Применительно к теме диссертационной работы автором были сформулированы и обоснованы следующие разделы и пункты [112], вошедшие в качестве обязательных требований в составе Приложения № 3 к данному ФНП:

– раздел 1.12 «Концепция закрытия ПЗРО» с требованиями о необходимости ее предоставления в отчете по обоснованию безопасности (далее – ООБ) и необходимости обоснования возможности безопасного закрытия ПЗРО;

– раздел 2.3 с требованиями о необходимости приведения в ООБ характеристик геолого-тектонических, геодинамических, гидрогеологических, гидрологических, сеймотектонических, сейсмических, инженерно-геологических условий района и площадки размещения ПЗРО (пп. 51–65);

– раздел 6.4 с требованиями к оценке долговременной безопасности системы захоронения РАО (пп. 228–253), включая требования к обоснованию сценариев, концептуальных и математических моделей (пп. 238–250);

– раздел 6.7 с требованиями о необходимости предоставления в ООБ плана проведения радиационного контроля и мониторинга системы захоронения РАО после закрытия ПЗРО (пп. 265–271, 284–285);

– глава 14 «Концептуальные положения по закрытию ПЗРО» с требованиями о необходимости предоставления в ООБ информации, подтверждаемой способностью эксплуатирующей организации обеспечить условия безопасного закрытия ПЗРО и приведения ПЗРО в состояние, которое

будет оставаться безопасным в период потенциальной опасности размещенных в нем РАО (п. 425) и требования, предъявляемые к такой информации (пп. 426–433).

В связи с отсутствием подобных требований, установленных в [112] для ПГЗ ЖРО, результаты полученные в ходе выполнения настоящей диссертационной работы были применены автором при разработке соответствующих рекомендаций, которые были утверждены и введены в действие в составе РБ «Состав и содержание отчета по обоснованию пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» (РБ-139-17) [113]. В руководстве по безопасности [113] приведены соответствующие рекомендации в части представления и обоснования в ООБ ПГЗ ЖРО технических решений и организационных мероприятий по обеспечению безопасности при захоронении РАО.

Также разработанные в настоящей диссертационной работе положения были учтены при подготовке РБ «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21) [114].

#### 4.4 Краткие выводы к главе 4

1) В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ на основании разработанной системы ОСП ПГЗ ЖРО «Железногорский» и результатов расчетно-экспериментального моделирования ПГЗ ЖРО «Железногорский» как референтного ПГЗ ЖРО разработаны концептуальные положения по обоснованию долговременной безопасности системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО:

- основные концептуальные положения системы организационно-технических мер, необходимых для безопасного закрытия ПГЗ ЖРО;
- основные концептуальные положения по долговременному мониторингу системы захоронения РАО после закрытия ПГЗ ЖРО.

2) Разработанные система организационно-технических мер по обеспечению безопасности закрытия ПГЗ ЖРО и положения по проведению долговременного мониторинга позволили систематизировать и сформулировать

условия долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО после его закрытия.

3) Сформулированные требования к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО были учтены при разработке ФНП «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) [112].

4) Разработаны РБ «Состав и содержание отчета по обоснованию пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов» (РБ-139-17) [113], в котором приведены соответствующие рекомендации в части представления и обоснования в ООБ ПГЗ ЖРО технических решений и организационных мероприятий по обеспечению безопасности при захоронении РАО, а также РБ «Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов» (РБ-003-21) [114].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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-техногенной 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 применен для ПГЗ ЖРО «Северский» и «Димитровградский»;

– анализ особенностей, событий и процессов, а также технологических решений по ликвидации отдельных эксплуатационных скважин 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;

– анализ опытных данных по заколонным перетокам компонентов РАО по стволам скважин ПГЗ ЖРО установил причины ухудшения герметичности скважин и образования каналов перетекания в их заколонном пространстве вследствие физических воздействий и физико-химических процессов происходящих в контакте «обсадная колонна – цементный камень – горные породы», и обусловленных главным образом техногенными факторами;



– для оценки последствий заколонных перетоков компонентов РАО по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» и обоснованию долговременной экологической приемлемости исследуемого объекта разработана математическая сеточная модель канала перетекания;

– с использованием разработанной математической модели определены границы и скорости возможного распространения компонентов РАО при заколонных перетоках по стволам скважин ПГЗ ЖРО «Железногорский» после его закрытия. Количество компонентов РАО, которое может поступить в горизонты, залегающие выше эксплуатационного в результате заколонного перетекания по одной нагнетательной скважине для условий данного объекта за многолетний период несоизмеримо меньше общего объема ЖРО, размещенных в системе захоронения РАО, и оценивается порядком первых десятков и сотен кубических метров;

– 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;

– на основании разработанных концептуальных положений по поэтапному безопасному закрытию ПГЗ ЖРО были систематизированы и сформулированы требования к обоснованию долговременной экологической приемлемости ПГЗ ЖРО, которые были учтены при разработке федеральных норм и правилах в области использования атомной энергии «Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов» (НП-100-17) и руководств 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).

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЯЭ	– Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития
ВАО	– высокоактивные радиоактивные отходы
ВНИПИпромтехнологии	– Акционерное общество «Ведущий проектно-изыскательский и научно- исследовательский институт промышленной технологии»
Гидроспецгеология	– Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидроспецгеология»
ГОСТ	– Государственный стандарт
ГХК	– Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат»
ЕГС РАО	– Единая государственная система обращения с радиоактивными отходами
ЖРО	– жидкие радиоактивные отходы
ИББ	– инженерный барьер безопасности
ИБРАЭ РАН	– Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской Академии наук
ИГЕМ РАН	– Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии» Российской академии наук
ИФХЭ РАН	– Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской Академии наук
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
НАО	– низкоактивные радиоактивные отходы
НИИАР	– Акционерное общество «Государственный научный центр – Научно- исследовательский институт атомных реакторов»

НИОКР	– научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
ОИАЭ	– объект использования атомной энергии
ООБ	– отчет по обоснованию безопасности
ОСП	– особенности, события и процессы
ПГЗ ЖРО	– пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов
ПГЗРО	– пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
ПЗРО	– пункт захоронения радиоактивных отходов
ПЦТ	– портландцемент тампонажный
РАО	– радиоактивные отходы
РБ	– руководство по безопасности при использовании атомной энергии
Ростехнадзор	– Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору
САО	– среднеактивные радиоактивные отходы
СХК	– Акционерное общество «Сибирский химический комбинат»
ТПУ	– Томский политехнический университет
ФГУП «НО РАО»	– Федеральное государственное унитарное предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами»
ФНП	– федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии
ЭВМ	– электронно-вычислительная машина

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deep injection disposal and industrial waste. Scientific and Engineering Aspects. First International Symposium / Edited by C-F Tsang and J. A. Apps. - Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California. Academic Press. 1996. - 775 p.
2. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов / А. И. Рыбальченко, М. К. Пименов, П. П. Костин [и др.]. - Москва: ИздАТ, 1994. - 256 с.
3. Верещагин, П. М. Идеология, практические и научные результаты 50-летнего опыта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов и нерадиоактивных промстоков предприятия атомной промышленности / П. М. Верещагин, **А. В. Позизов**, А. И. Рыбальченко [и др.] - Текст : непосредственный // Вестник РАЕН. - 2017. - Т. 1, № 2. - С. 12 - 23.
4. Юдин, Ф. П. Опыт захоронения жидких радиоактивных отходов в глубокие геологические формации / Ф. П. Юдин, М. К. Пименов, А. И. Назаров [и др.] - Текст : непосредственный // Атомная энергия. - 1968. - Т. 25, вып. 2. - С. 128 - 133.
5. Спицын, В. И. Основные предпосылки и практика использования глубоких водоносных горизонтов для захоронения жидких радиоактивных отходов / В. И. Спицын, М. К. Пименов [и др.] - Текст : непосредственный // Атомная энергия. - 1978. Т. 44, вып. 2. - С. 161 - 168.
6. Кедровский, О. Л. Принципы оценки надёжности подземного захоронения радиоактивных жидких отходов в глубокие геологические формации и пути ее повышения / О. Л. Кедровский, А. И. Рыбальченко, М. К. Пименов // Underground disposal of Radioactive Waste. International Atomic Energy. Vienna. 1980. - 153 -167 p.

7. Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты / В. А. Боровская, И. Т. Гаврилов, В. М. Гольдберг [и др.] - Текст : метод. указания / под ред. К. И. Антоненко и Е. Г. Чаповского; М-во геологии СССР, Второе гидрогеол. упр. - Москва: Недра, 1976. - 311 с.

8. Кедровский, О. Н. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов в пористые геологические формации / О. Н. Кедровский, А. И. Рыбальченко, М. К. Пименов [и др.] - Текст : непосредственный // Атомная энергия. - 1991. Том 79, вып. 5. - С. 298 - 393.

9. Рыбальченко, А. И. Практические и научные результаты, природоохранные и этические аспекты 50-летнего опыта захоронения жидких радиоактивных отходов в глубоких геологических горизонтах / А. И. Рыбальченко, В. М. Курочкин, П. М. Верещагин - Текст : непосредственный // Горный журнал. - 2015. № 10. - С. 16 - 19.

10. Preliminary Analysis of Groundwater Hydrology at the MCC Deep-Well Injection Site (Progress Report, February 1998), IGEM (Institute of Geology or Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry), Moscow, Russia (internal project report available from IIASA RAD Project).

11. Preliminary Analysis of Groundwater Hydrology at the MCC Deep-Well Injection Site (Progress Report, May 1998), IGEM (Institute of Geology or Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry), Moscow, Russia (internal project report available from IIASA RAD Project).

12. Материалы самооценки для предоставления международным экспертам в рамках Миссии МАГАТЭ по оценке безопасности российской технологии подземного захоронения жидких радиоактивных отходов. В 4-х книгах - М.: ИБРАЭ РАН, 2017 г. - 245 с.

13. Дорофеев, А.Н. Эволюция обоснования долговременной безопасности ПГЗ ЖРО / А. Н. Дорофеев, Е. А. Савельева, **А. В. Понизов** [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2017. № 1 - С. 54 - 63.

14. International Peer Review of the Deep Well Injection Practice for Liquid Radioactive Waste in the Russian Federation / Final Report of the IAEA International Review Team July 2013. IAEA, VIENNA. 2020. - 66 p.

15. Российская Федерация. Законы. Об использовании атомной энергии : Федеральный закон № 170-ФЗ : [принят Государственной думой 20 октября 1995 года : одобрен Советом Федерации 15 ноября 1995 года]. - Москва, 1995. - Текст : непосредственный.

16. Российская Федерация. Законы. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон № 190-ФЗ : [принят Государственной думой 29 июня 2011 года : одобрен Советом Федерации 6 июля 2011 года]. - Москва, 2011. - Текст : непосредственный.

17. **Понизов 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 сентябрь 2018. - 2018. - С. 440.

18. Лицензия КРР 15638 ЗГ от 24.11.2013 на право пользования недрами ФГУП «НО РАО» целевым назначением подземное захоронения жидких радиоактивных отходов. URL: <https://rfgf.ru/ReestrLicPage/162920> (дата обращения: 20.08.2021).

19. Государственная геологическая карта Российской Федерации: серия Ангаро-Енисейская. Карта дочетвертичных образований. Лист О-46 (Красноярск). - ФГУП «ВСЕГЕИ», ФГУП «Красноярскгеолсъёмка». - 1:1 000 000 (третье поколение). - Санкт-Петербург, 2005.

20. Гидрогеология СССР [Текст] / М-во геологии СССР. Всесоюз. науч.-исслед. ин-т гидрогеологии и инж. геологии «ВСЕГИНГЕО». ; Глав. ред. А. В. Сидоренко. - Москва : Недра, 1966. - Т. 18: Красноярский край и Тувинская АССР / Авт. М. Г. Купустина, Н. И. Дюк, О. М. Гирфанова и др. ; Ред. И. К. Зайцев. - 1972. - 179 с. : ил., карт.

21. Материалы обоснования лицензии на эксплуатацию действующего пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов полигона «Северный» филиала «Железногорский» ФГУП «НО РАО» (г. Железногорск, Красноярский край), включая материалы оценки воздействия на окружающую среду. - Том 1, 2. - ФГУП «НО РАО». - Москва, 2018. - URL: <https://www.norao.ru/ecology/mol/> (дата обращения: 12.12.2020) Текст : электронный.

22. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Сибирского федерального округа в 2018 году. Выпуск 15. - Москва : ФГБУ «Гидроспецгеология». - 2019. - 314 с.

23. Анализ структурно-тектонического строения территории ближней зоны промплощадки ГХК / Р. М. Лобацкая, Иркутск: ИрГТУ, 2007.

24. **Понизов 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, 2017 - С. 905 - 906.

25. Государственная геологическая карта Российской Федерации: издание второе Серия Енисейская. Геологическая карта и карта полезных ископаемых. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). - ФГУП «ВСЕГЕИ», ФГУП «Красноярскгеолсъёмка». - 1:200 000. - Санкт-Петербург, 2002.

26. Геологическое доизучение на Атамановской площади. Листы 0-46-XXXIV, 0-46-XXVIII [Текст]: в 2-х кн.; окончательный отчет / Л.П. Никулов, А.Н. Бабкин, В.М. Колямкин и др. - Красноярск: ФГУП «Красноярскгеолсъёмка». - 1:200 000. 2002. - 305 с.

27. Санитарные правила и технические условия эксплуатации и консервации глубоких хранилищ жидких радиоактивных и химических отходов предприятий ядерного топливного цикла : (СПиТУ ЭКГХ-93) : введены в действие с 01.01.1995, утверждены указанием Минатома России 17.04.1994.



28. Методические указания по эксплуатации и консервации глубоких хранилищ жидких радиоактивных и химических отходов предприятий атомной промышленности : (МУ ЭКГХ-2003) : утверждены Минатомом России, 2003.

29. Методика оценки безопасности текущей эксплуатации и в постэксплуатационном периоде пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов предприятий Госкорпорации «Росатом». Приказ ФГУП «НО РАО» от 25.12.2015 № 319-11р/606-П.

30. Правила и технические требования эксплуатации пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов предприятий Госкорпорации «Росатом». Приказ ФГУП «НО РАО» от 25.12.2015 № 319-11р/606-П.

31. Косарева И. М., Лазарева Н. М., Выгловская О. Е. и др. Основные направления технологии подземного захоронения жидких радиоактивных отходов // Российская конференция «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях» : г. Москва, 15 - 16 октября 2013. - Москва : Граница, 2013. - 158 с., с ил. - С. 66 - 68.

32. Сафонов, А. В. Экологические аспекты локализации жидких радиоактивных отходов в глубинном хранилище «Северный» / А. В Сафонов, И. М. Косарева, Б. Г. Ершов, Ю. А. Ревенко, **А. В. Понизов** [и др.] - Текст : непосредственный // Атомная энергия. - 2011. - Т. 111. № 2 - С. 100 - 104.

33. Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste at Krasnoyarsk-26. Volume I. / Compton K.L., Novikov V. and Parker F.L., - International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, Vol. I, RR-00-1, 2000, 113 p.

34. Deep Well Injection of Liquid Radioactive Waste at Krasnoyarsk-26: Analysis of Hypothetical Scenarios. Volume II / Compton K.L., Novikov V. and Parker F.L., - International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, Vol. I, RR-01-01, 2001, 74 p.

35. Численные методы моделирования геомиграции радионуклидов / М. Б. Букаты. - Учеб. пособие. - Томск. Изд. ТПУ, 2008. - 89 с.

36. Рыбальченко, А. И. Обоснование продления проектных сроков эксплуатации глубокого хранилища «Полигон Северный» ФГУП «Горно-химический комбинат» / ОАО «ВНИПИПромтехнологии». рук. А. И. Рыбальченко; исполн.: В. М. Курочкин, Ю. В. Культин, Г. А. Окуньков [и др.] - Текст : непосредственный. - М., 2009. - 157 с. - Инв. № А-13757 дсп.

37. Линге, И. И. Верификационный отчет «Программная реализация геофильтрационной геомиграционной модели полигона «Северный» (ГЕОПОЛИС)» / ИБРАЭ РАН; рук. Линге И. И.; исполн.: Капырин И. В. [и др.] - Текст : непосредственный. - М., 2014. - 154 с. - Инв. № 4071- 25-11/404-6/3.

38. Савельева, Е.А. Моделирование литологической неоднородности осадочного пласта в районе пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / Е.А Савельева, В. В. Сускин, **А. В. Позизов** [и др.] – Текст : непосредственный // Горный журнал. - 2015. - № 10 - С. 21 - 26.

39. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, SSR-5, МАГАТЭ, Вена, 2011.

40. Абрамов, А. А. Современное состояние и перспективы развития системы обращения с РАО в Российской Федерации / А. А. Абрамов, А. Н. Дорофеев. - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2017. - № 1. - С. 10 - 21.

41. Абрамов, А. А. Развитие ЕГС РАО в рамках работ по федеральной целевой программе обеспечения ядерной и радиационной безопасности / А. А. Абрамов, А. Н. Дорофеев, С. А. Дерябин. – Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2019. - № 1(6). - С. 8 - 24.

42. Дорофеев, А. Н. К вопросу финансово-экономического обоснования повышения эффективности нормативной базы ЕГС РАО / А. Н. Дорофеев, И. И. Линге, А. А. Самойлов [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2017. - № 1. - С. 22 - 31.

43. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, INFCIRC/546, МАГАТЭ, Вена, 1997.

44. Хаперская, А. В. О некоторых аспектах идентификации «положительных практик» в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами / А. В. Хаперская, А. Н. Дорофеев, А. А. Самойлов, С. С. Уткин, **А. В. Понизов** [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2018. - № 4 (5). - С. 83 - 89.

45. Российская Федерация. Законы. О ратификации Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами : Федеральный закон № 139-ФЗ : [принят Государственной думой 21 октября 2005 года : одобрен Советом Федерации 26 октября 2005 года]. - Москва, 2005. - Текст : непосредственный.

46. Руководящие принципы в отношении формы и структуры национальных докладов, INFCIRC/604/Rev.3, МАГАТЭ, Вена, 2014.

47. Руководящие принципы, касающиеся процесса рассмотрения, INFCIRC/603/Rev.7, МАГАТЭ, Вена, 2017.

48. gosnadzor.gov.ru: сайт. - 2021. - URL: <http://www.gosnadzor.gov.ru/activity/international/national%20reports/> (дата обращения: 19.11.2021). Текст : электронный.

49. rosatom.ru: сайт. - 2021. - URL: <https://rosatom.ru/upload/iblock/f28/f288b0bef11f34803223e48fba474d28.pdf> (дата обращения: 19.11.2021). Текст : электронный.

50. Крюков, О. В. Выполнение обязательств России в рамках Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами / О. В. Крюков, А. Н. Дорофеев, Р. Б. Шарафутдинов, С. С. Уткин, **А. В. Понизов** [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы.- 2019. - № 1 (6). - С. 25 - 36.

51. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. / под общей редакцией Л. А. Большова, Н. П. Лаверова, И. И. Линге. - Москва: 2015. - 316 с. - Т.3.

52. Линге, И. И. Опыт применения международных требований по обоснованию долговременной безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: проблемы и уроки / И. И. Линге, С. С. Уткин, А. А. Хамаза, Р. Б. Шарафутдинов. - Текст : непосредственный // Атомная энергия. - 2016. - вып. 120. - С. 201 - 208.

53. The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide. International Atomic Energy Agency. SSG-23. Vienna, 2012.

54. Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2000.

55. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Version 3.0. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. August 2019.

56. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности : (НП-055-14) : официальное издание: утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.08.2014 : введены в действие 13.02.2015. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

57. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии : (НП-064-17) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.11.2017 : введены в действие 07.01.2018. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

58. Оценка долговременной безопасности пунктов приповерхностного захоронения радиоактивных отходов : (РБ-117-16) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.12.2016. - (Руководство по безопасности при использовании атомной энергии).

59. NEA International FEP Database: Version 2.1 User Guide, Nuclear Energy Agency, 2014.

60. Updating the NEA International FEP List. An Integration Group for the Safety Case (IGSC) Technical Note. Technical Note 2: Proposed Revisions to the NEA International FEP List. Organisation for Economic Co-operation and Development, № NEA/RWM/R (2013) 26 September 2012.

61. Шарафутдинов, Р. Б. Методические аспекты учета особенностей, событий и процессов природного и техногенного происхождения при обосновании долговременной безопасности системы захоронения РАО / Р. Б. Шарафутдинов, **А. В. Понизов**, Д. В. Мурлис [и др.] - Текст : непосредственный // Ядерная и радиационная безопасность. - 2018. - № 4 (90) - С. 20 - 33.

62. Отчет об особенностях, событиях и процессах (окончательная редакция) [Текст] : Отчет о НИР «Выполнение комплексов расчетно-экспериментальных исследований в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ по совершенствованию обоснования безопасности эксплуатации и закрытия пунктов глубинного захоронения ЖРО» (заключительный) / ФБУ «НТЦ ЯРБ»; рук. **А. В. Понизов**, исполн. Д. В. Мурлис, П. М. Верещагин, А. Л. Василишин [и др.]. - Москва, 2019 - 316 с. - Библиогр.: с. 214 - 219 - Инв. № 15-08-22/2019.

63. Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development. June 2015.

64. **Понизов А. В.**, Лебедкин 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.

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

66. 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.

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

68. Отчет о закрытии (первая редакция) [Текст] : Отчет о НИР «Выполнение комплексов расчетно-экспериментальных исследований в целях реализации рекомендаций миссии МАГАТЭ по совершенствованию обоснования безопасности эксплуатации и закрытия пунктов глубинного захоронения ЖРО» (промежуточный) / ФБУ «НТЦ ЯРБ»; рук. **А. В. Понизов**, исполн. П. М. Верещагин, О. Н. Ушанова, М. А. Фелицын [и др.]. - Москва, 2017. - 63 с. - Библиогр.: с. 60 - 63 - Инв. № 15-08-20/2017.

69. Ершов Б. Г., Гордеев А. В., Косарева И. М. и др. Современные проблемы безопасного захоронения жидких радиоактивных отходов в геологические формации: физико-химическое преобразование и газовыделение // Российская конференция «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях» : г. Москва, 15 - 16 октября 2013. - Москва : Граница, 2013. - 158 с., с ил. - С. 41 - 44.

70. Гордеев А. В., Ершов Б. Г. Моделирование газообразования в растворах, имитирующих ЖРО // Российская конференция «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях» : г. Москва, 15 - 16 октября 2013. - Москва : Граница, 2013. - 158 с., с ил. - С. 37 - 38.

71. Материалы обоснования лицензии (включая материалы оценки воздействия на окружающую среду) на осуществление деятельности в области использования атомной энергии - «Вывод из эксплуатации открытого бассейна-хранилища радиоактивных отходов № 365 ФГУП «ГХК». - Том 1. - ФГУП «ГХК». – Железногорск, 2021. - 142 с. - Инв. № 212-11-07-02/1395. URL: <https://sibghk.ru/images/services/docpack/2021/04/001.pdf> (дата обращения: 25.05.2021). Текст : электронный.

72. Сафонов, А. В. Российский опыт микробиологических исследований подземных вод в зоне глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов / А. В. Сафонов, Е. В. Захарова, **А. В. Понизов** [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2018. - № 3 (4) - С. 39 - 49.

73. 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.

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

75. Рыбальченко А. И., Верещагин П. М., **Понизов А. В.** Вывод из эксплуатации и закрытие глубоких хранилищ жидких радиоактивных отходов предприятий атомной промышленности России – требования и технологии // Тезисы доклада научно-практической конференции «Вывод из эксплуатации объектов использования атомной энергии» - Москва, 2009. - С. 42 - 43.

76. Верещагин П. М., Рыбальченко А. И., Архипов А. Г. Основные положения технологии вывода из эксплуатации и закрытия пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов // Российская конференция «Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях» : г. Москва, 15 - 16 октября 2013. - Москва : Граница, 2013. - 158 с., с ил. - С. 37 - 38.

77. ГОСТ 1581-96. Портландцементы тампонажные. Технические условия : Well portland cements. Specifications : национальный стандарт Российской Федерации : введен в действие Постановлением Госстроя РФ от 10 апреля 1998 г. № 18-31.

78. Правила и технические требования закрытия пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Госкорпорации «Росатом». Приказ ФГУП «НО РАО» от 25.12.2015 № 319-11р/606-П.

79. zakupki.gov.ru: сайт. - 2018 - URL: <https://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/documents.html?regNumber=0573100027018000126> Извещения о проведении электронного аукциона от 13.09.2018 №ИИ1 «Выполнение работ по «Ликвидации скважины нагнетательной Н-10 ПГЗ ЖРО полигон «Северный»» (дата обращения: 02.02.2019). Текст : электронный

80. Термические исследования скважин / В. Н. Дахнов, Д. И. Дьяконов - Москва, Ленинград: Гостоптехиздат, 1952. - 251 с.

81. Агадулин, И. И. Экологические аспекты негерметичности заколонного пространства в скважинах различного назначения / И. И. Агадулин, В. Н. Игнатьев, Р. Ю. Сухоруков. - Текст : электронный // Нефтегазовое дело: электронный журнал. - 2011. - № 4. С. 82 - 90. <http://www.ogbus.ru>. (дата обращения: 21.04.2020).

82. Куранов, П. Н. Определение источников загрязнения подземных и поверхностных вод в районе расположения полигонов сброса попутных и сточных вод / П. Н. Куранов. - Текст : непосредственный // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2013. - № 5. - С. 118 - 130.



83. Ишбаев, Г. Г. Технология РИР – отсечение межпластовых перетоков по стволу скважин / Г. Г. Ишбаев, Р. А. Бикиняев. - Текст : непосредственный // Бурение и нефть. - 2010. - № 12. - С. 22 - 25.

84. Верещагин, П. М. Разработка коррозионностойких тампонажных материалов для надежного обеспечения экологической безопасности при сооружении и ликвидации скважин полигонов захоронения жидких радиоактивных отходов: автореферат диссерт. канд. техн. наук. - Москва, 2010. - 24 с. Текст : непосредственный.

85. Крепление, испытание и освоение нефтяных и газовых скважин : электр. учебное пособие / Л. Н. Долгих. - Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2007. - 189 с.

86. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие / В. В. Нескоромных. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. - 396 с.

87. Пискунов А. И., Леушева Е. Л. Анализ причин появления заколонных перетоков // Проблемы научно-технического прогресса в бурении скважин: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции с Международным участием, посвященной 60-летию кафедры бурения скважин. - Томск: Томский политехнический университет, 2014. - С. 288 - 296.

88. Бозырев, Ю. С. Методы предотвращения смятия обсадных колонн глубоких скважин в сложных горно-геологических условиях: диссерт. докт. техн. наук: 25.00.15. - Москва, 2006. - 323 с. Текст : непосредственный.

89. Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами : (РД 07-291-99) : утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 02.06.99 № 33.

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

91. Геомиграционные модели в гидрогеологии / В. Г. Румынин. - СПб.: Наука, 2011. - 1158 с.
92. Chiang W. H. and Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First Edition. Springer Berlin Heidelberg New York. 2001, ISBN 3-540 67744-5, 346 pp.
93. simcore.com: сайт. - 2018 - URL: <https://www.simcore.com/wp/products/>. (дата обращения: 26.08.2018). - Текст : электронный.
94. Глинский, М. Л. Моделирование последствий эксплуатации полигона глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов Сибирского химического комбината на среднесрочный и сверхдолгосрочный периоды / М. Л. Глинский, С. П. Поздняков, Л. Г. Черткова [и др.] - Текст : непосредственный // Радиохимия. - 2014. - Т. 56, № 6. - С. 554 - 560.
95. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород / Е. Е. Керкис. - Ленинград: Недра, 1975. - 231 с.
96. Варлаков, А. П. Оценка радиационных и температурных нагрузок на цементный компаунд, содержащий имитаторы радиоактивных отходов / А. П. Варлаков, А. А. Жеребцов, В. Г. Петров [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2020. - № 1. - С. 66 - 72.
97. Крупская, В. В. Изоляционные свойства бентонитовых барьерных систем для захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве / В. В. Крупская, С. В. Закусин, В. А. Лехов [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. - 2020. - №1. - С. 35 - 55.
98. **Понизов, А. В.** Исследование характеристик тампонажных материалов для ликвидации скважин пункта глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов «Железногорский» / А. В. Понизов, А. П. Пустовгар, А. Н. Дорофеев [и др.] - Текст : непосредственный // Радиоактивные отходы. – 2021. - № 2 (15) - С. 63 -72.
99. ТУ 5751-001-18882549-14. Глинопорошок бентонитовый БМ-У.
100. ГОСТ 26798.1-96. Цементы тампонажные. Методы испытаний : Oil-well cement. Test methods : национальный стандарт Российской Федерации : введен в действие Постановлением Госстроя РФ от 10 апреля 1998 г. № 18-32.

101. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии : Cements. Methods of tests of bending and compression strengths : национальный стандарт Российской Федерации : введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 21 августа 1981 года № 151.

102. ГОСТ 12730.5-2018. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости : Concretes. Methods for determination of water tight ness : Межгосударственный стандарт : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 апреля 2019 года № 138-ст.

103. ASTM 1672-12. Standard Guide for Computed Tomography (CT) System Selection.

104. ВСН 132-92. Ведомственные строительные нормы. Правила производства и приемки работ по нагнетанию растворов за тоннельную обделку : введены в действие Государственной корпорацией «Трансстрой» от 21 августа 1992 года № МО-197.

105. **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.

106. Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения : (НП-091-14) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.05.2014 : введены в действие 16.12.2014. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

107. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения : (НП-058-14) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.11.2014 : введены в действие 17.02.2015. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

108. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла : (НП-016-05) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 02.12.2005 : введены в действие 01.05.2007. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

109. Правила охраны недр : (ПБ 07-601-03) : утверждены Федеральным горным и промышленным надзором России от 06.06.2003.

110. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020 : введены в действие 01.01.2021. - (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности).

111. 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.

112. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов : (НП-100-17) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.06.2017 : введены в действие 01.08.2017. - (Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии).

113. Состав и содержание отчета по обоснованию пунктов глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов : (РБ-139-17) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 18.01.2018. - (Руководство по безопасности при использовании атомной энергии).

114. Оценка долговременной безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов : (РБ-003-21) : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.03.2021 : введены в действие 19.03.2021. - (Руководство по безопасности при использовании атомной энергии).