



ЗАХОРОНЕНИЕ РАО НА УЧАСТКЕ ЕНИСЕЙСКИЙ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ

История выбора площадки и современное состояние исследований

Ответственные редакторы

доктор геолого-минералогических наук
Б. Т. КОЧКИН

доктор технических наук
И. И. ЛИНГЕ



МОСКВА НАУКА 2024

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент
РАН (ИГЕМ РАН) *С. В. Юдинцев*,
доктор технических наук (ФГУП «ПО «Маяк») *Ю. Г. Мокров*

**Захоронение РАО на участке Енисейский в Красноярском крае:
история выбора площадки и современное состояние исследований.** —
М.: Наука, 2024. — 368 с. — ISBN 978-5-02-041106-7

Настоящая работа освещает историю выбора площадки для глубинного захоронения РАО в контексте хронологии проведения предшествующих изысканий. Процесс выбора участка недр для глубинного захоронения РАО в России, начатый в 80-х гг. прошлого века, представлен в сравнении с опытом зарубежных стран. В монографии системно изложена последовательность выбора участка Енисейский и дан детальный обзор геологической информации в разных масштабах от регионального до локального на выбранном участке. Показано, что выбор участка Енисейский обусловлен не только широкой совокупностью свойств геологической среды, определяющей его приемлемость для размещения ПГЗРО, но также социальными и экономическими факторами. В завершение очерчены остающиеся неопределенности и пути их устранения в ходе дальнейших исследований в контексте оценки долговременной безопасности захоронения РАО в соответствии с действующими законами и нормативными документами.

Для широкого круга заинтересованных специалистов, руководителей предприятий атомной отрасли и общественности.

ISBN 978-5-02-041106-7

© Госкорпорация «Росатом», 2024

© ИБРАЭ РАН, 2024

© ФГБУ Издательство «Наука»,
редакционно-издательское
оформление, 2024

Оглавление

Введение	5
Литература.....	10
Глава 1. ПГЗРО как объект Единой государственной системы обращения с РАО	11
1.1. Экологичность технологии и общественного сознания	12
1.2. Выработка требований к объекту.....	15
Литература.....	19
Глава 2. Основные подходы к выбору района и участка размещения объектов глубинного захоронения РАО и ОЯТ	21
2.1. Международный и отечественный опыт принятия решений по процедуре выбора места	23
2.1.1. Методология выбора места	24
2.1.2. Примеры национальных программ выбора места	26
2.2. Критерии выбора потенциально пригодной геологической среды для размещения объекта окончательной изоляции РАО.....	36
2.2.1. Принципы выбора геологической среды для пунктов захоронения РАО.....	37
2.2.2. Критерии пригодности геологической среды.....	38
2.2.3. Сравнение потенциально пригодных пород	39
2.3. Краткая геологическая характеристика зарубежных участков проектируемых хранилищ РАО в древних кристаллических горных породах.....	41
2.3.1. Форсмарк, Швеция.....	41
2.3.2. Олкилуото, Финляндия.....	50
2.3.3. Синьчан, Китай.....	57
Заключение	61
Литература.....	63
Глава 3. Ранняя история геологических исследований в России с целью выбора района размещения хранилищ РАО.....	68
3.1. Архипелаг Новая Земля.....	71
3.1.1. Криолитозона Южного острова архипелага Новая Земля	72
3.1.2. Район губы Башмачная.....	73
3.1.3. Район залива Рейнеке	76
3.2. Кольский полуостров	77
3.2.1. Особенности геологических условий потенциальных участков захоронения РАО на Кольском полуострове	78
3.2.2. Международное сотрудничество в изучении альтернативных участков	80
3.3. Южный Урал (ПО «Маяк»).....	81
3.3.1. Общие сведения о геологическом строении территории ПО «Маяк» и ее обрамления	82
3.3.2. Геолого-геофизические исследования.....	87
3.4. Красноярский край (обзорные работы 1992–1993 гг.)	93
3.4.1. Геологическая характеристика Нижнеканского массива и его обрамления	95
3.4.2. Новейшая и современная тектоническая активность региона.....	119
3.4.3. Оценка сейсмической опасности	130
Заключение	137
Литература.....	138
Глава 4. Геологические исследования в пределах Нижнеканского массива и его обрамления с целью выбора участка (выбор окончательного места 1993–2008 гг.)	145
4.1. История исследований.....	145
4.1.1. Этап изучения Южно-Енисейского кряжа	146
4.1.2. Этап изучения участков Итатский и Каменный	148
4.1.3. Этап изучения участка Енисейский	148
4.1.4. Этап сравнительной оценки альтернатив и окончательного выбора места.....	153
4.2. Участок Верхнеитатский (участки Итатский и Каменный)	154
4.2.1. Виды, методы и эффективность выполненных работ	154
4.2.2. Основные черты геологического строения.....	157
4.2.3. Гидрологические и гидрогеологические условия.....	160
4.2.4. Особенности участков Итатский и Каменный	162

4.3. Участок Енисейский. Исследования 2002–2005 гг.	165
4.3.1. Задачи и методы выполненных работ	165
4.3.2. Результаты геолого-структурных исследований.....	172
4.3.3. Гидрогеологические условия	184
4.4. Результаты исследований в подземном комплексе ГХК	188
4.4.1. Общая характеристика геологических условий	188
4.4.2. Направления и задачи исследований	189
4.4.3. Обзор результатов исследований	190
Заклучение	204
Литература.....	205
Архивные документы и материалы.....	207
Глава 5. Детальная характеристика участка Енисейский. 2009–2015 гг.	209
5.1. Геологическое строение и вмещающие породы	221
5.1.1. Петрографические особенности пород скального массива	221
5.1.2. Структурно-тектонические особенности участка	234
5.1.3. Геолого-структурная 3D-модель блока, изученного глубокими скважинами	244
5.2. Гидрогеологические условия	261
5.2.1. Общая характеристика	261
5.2.2. Результаты опытно-фильтрационных работ	265
5.2.3. Гидрогеохимические условия участка	268
5.3. Гидрогеологические модели	273
5.3.1. Модель ИБРАЭ РАН	273
5.3.2. Модель СПБО ИГЭ РАН.....	288
5.4. Результаты инструментальных наблюдений за современными движениями земной коры	308
Заклучение	318
Литература.....	320
Архивные документы и материалы.....	324
Глава 6. Основные аспекты оценки безопасности	327
6.1. Геологические особенности, события и процессы, важные для обеспечения безопасного размещения ПГЗРО на участке Енисейский	327
6.1.1. Внешние геологические факторы	327
6.1.2. Факторы из группы «Геосфера»	330
6.2. Разработка геологической модели площадки проектируемого ПГЗРО	338
6.3. Разработка геофильтрационных и геомиграционных моделей.....	340
6.3.1. Концептуальная модель.....	340
6.3.2. Геофильтрационная схематизация	340
6.4. Предварительные оценки безопасности	342
Заклучение	343
Литература.....	344
Архивные документы и материалы.....	345
Глава 7. Приоритетные направления получения уточненной геологической информации для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО	346
Заклучение	350
Литература.....	350
Архивные документы и материалы.....	350
Заклучение	351
Литература.....	362
Архивные документы и материалы.....	364
Принятые сокращения	365
Авторский коллектив	367

Введение

Главный вопрос монографии в контексте более общей проблемы захоронения радиоактивных отходов (далее РАО) в геологических формациях [1] объединяет в себе, как представляется авторам, процессы и события, которые вызывают весьма осязаемые на историческом масштабе дискуссии и влекут за собой длинную цепочку следствий, хотя по своему научному содержанию спорными не являются.

Для детализации этого тезиса и одновременно первого пояснения относительно структуры монографии сравним выбор места размещения объекта для геологического захоронения РАО с выбором места для поселений человека (действий, по-видимому, наиболее соответствующих друг другу в историческом масштабе), а затем и с размещением объектов промышленности. Последняя задача решалась, по крайней мере, миллионы раз. В тысячах из них выбор был очень успешным, следствием чего становилось появление крупных городов, в том числе мегаполисов с развитой промышленностью, и их длительное существование. Выбор места был либо чьим-то единоличным решением, либо подведением черты под коллективным, но стихийным процессом расселения вблизи удобных ресурсов. При этом вполне естественно, что в процессе оптимизации выбора по очевидному, но обширному набору критериев в большинстве случаев возникала необходимость соглашаться с очевидными же недостатками, в том числе — размещением городов рядом с крупными промышленными комплексами. Со временем в отношении некоторых объектов промышленности, в том числе атомной энергетики, стала превалировать настороженность, следствием которой явилось удаление таких объектов от крупных населенных пунктов.

В случае выбора площадок для захоронения РАО критерии выбора в основе своей исходят из отрицания: площадка не должна быть заселена и находиться в зоне сейсмичности, недра не должны содержать полезные ископаемые и т. д. Общий принцип может быть представлен так: никому не нужный, но очень стабильный участок территории и недр, не обремененный при этом проблемами транспортной доступности. История активного поиска таких площадок в мире не насчитывает и пяти десятков лет, но за этот период выработались четкие требования к такому поиску. Несмотря на то что основное из них — широкая география поиска — всегда выполняется, часты случаи общенациональных дискуссий, потребовавших формулирования личных позиций руководителей стран и включавших несколько специфических обстоятельств. Среди них, например, то, что основной объем доводов по безопасности относился к будущему и не давал возможности инструментальной проверки практикой, а лидерами дискуссий становились политические или научные авторитеты, причем последние не всегда принадлежали к авторитетам в отраслях наук, непосредственно применяемых при выборе и обосновании места размещения. Следствием этого стали решения о фактической заморозке проекта (с возможностью дополнительных исследований и проработок в неопределенном будущем), как в США, или решения о возврате в стартовую точку поиска (Германия).

Во всех национальных историях [2, 3] тема выбора площадки имеет несколько базовых сценариев. Наиболее благоприятный и линейный вариант реализовался, например, в Финляндии. В результате предварительных исследований выбирается наиболее перспективная площадка, где сооружается сначала подземная исследовательская лаборатория (ПИЛ), а уже после проведения исследований в ней и подтверждения параметров участка недр на базе ПИЛ начинаются работы по сооружению пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО). Были тем не менее и случаи отказа от предварительно выбранной площадки, причем как в результате ее доизучения (Швеция), так и по социально-политическим причинам (США). Существует и другой сценарий, в котором сооружается ПИЛ общего назначения, и одновременно идет процесс выбора подходящей площадки (например, Швейцария). Но во всех случаях выбор площадки сопровождался выходом детальных и публичных отчетов — обоснований выбора площадки. Отдельно следует упомянуть вариант развития событий, в котором в качестве критерия первичного отбора потенциальных площадок выступают не их геологические характеристики, а общественное согласие в соответствующих регионах (Великобритания, Германия). В этом случае предварительные отчеты по обоснованию безопасности оказываются еще более подробными, так как должны предусматривать описание концепций захоронения и соответствующих аргументов безопасности для каждого из потенциальных вариантов [4].

В российской истории выбор места размещения ПГЗРО имел признаки линейного варианта, в том числе широкую географию исследований, постепенное сосредоточение на более компактных районах, обширный состав работ и публикации по этапным итогам исследований [5, 6]. Некоторую особенность он приобрел в первом десятилетии XXI века. Для информирования об окончательном выборе перспективного участка головные исполнители работ обошлись двумя скромными публикациями [7, 8], в то время как в крупных монографиях [1, 9], вышедших примерно в тот же период, выбранный на сегодня для ПГЗРО участок Енисейский не определялся приоритетным. Фундаментальная работа специалистов ИГЕМ РАН [10] также полностью не устранила этот пробел. Уже длительное время это обстоятельство рассматривалось как требующее исправления. Но были и более востребованные задачи, как, например, определение заказчика сооружения, а затем и эксплуатирующей организации для ПИЛ и ПГЗРО, фиксирование общей стратегии реализации проекта, разработка детальной программы исследований и так далее. Сегодня эти задачи в основном решены (рис. 1).

Эти обстоятельства позволили обратиться к вопросу осмысления истории выбора площадки для глубинного захоронения в контексте всей совокупности данных по участку Енисейский, восстановления истории и особенностей проведения предшествующих работ (когда реальной была уже опасность утраты некоторых материалов и свидетельств) и демонстрации состояния реализующихся в настоящее время исследований. В монографии системно изложена соответствующая последовательность событий, дан детальный обзор геологической информации, которая в настоящее время регулярно пополняется, систематизируется и анализируется современными методами обработки данных. С 2019 г. динамика развития исследований регулярно отражается в виде публикаций, консолидирующихся в рецензируемом научно-техническом журнале «Радиоактивные отходы».

Исследования

Решения



Рис. 1. История проекта создания ПГЗРО

В тексте монографии в изобилии присутствует обращение к фундаментальным работам и документам МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР, посвященным становлению и развитию методологии обоснования долговременной безопасности глубинного захоронения РАО. Отметим, однако, что за рамками узкого круга глубоко погруженных в данную методологию специалистов и общественности ряда прагматично настроенных стран победоносного шествия и полного принятия методологии не наблюдается. Более того, определенные сомнения в самой возможности получения достоверных результатов в рамках обоснования долговременной безопасности характерны даже для специалистов в области атомной энергетики. Работа [11] и ряд иных публикаций [12, 13] относятся именно к дискуссии о захоронении долгоживущих РАО, а вернее, к дискуссии о том, необходимы ли более глубокая переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и более экологичные реакторные технологии с выжиганием миноров и других долгоживущих радионуклидов. Общий подход, характерный и для нашей страны, — ориентация на геологическое захоронение наиболее опасных из уже накопленных отходов и минимизация образования новых путем разработки новых ядерных энерготехнологий и технологий ЯТЦ для энергетики будущего, которая в РФ через несколько десятилетий планируется двухкомпонентной [12, 14].

За прошедшие десятилетия поиска площадки для геологического захоронения РАО отношение к атомной энергетике заметно изменилось, пройдя путь от оптимистично-романтического к рационально- (а порой и иррационально-) скептическому [15]. Нынешний взгляд на решение проблем обращения с РАО можно охарактеризовать как прагматичный: он основан на накопленном мировым сообществом опыте, как позитивном, так и негативном.

На середину 2023 г. ситуация на площадке характеризуется необходимым динамизмом (практически завершены все подготовительные работы, стартовала проходка шахтных стволов для ПИЛ) (рис. 2) и развернутым научным сопровождением.

Завершая краткое введение, отметим, что решающее участие в организации и реализации первого этапа работ по ПГЗРО, вплоть до обоснования выбора участка Енисейский и его лицензирования, приняли специалисты следующих организаций: Минатом России, Федеральное агентство по атомной энергии и Госкорпорация «Росатом», Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, ВНИПИпромтехнологии, ИГЕМ РАН, СПБО ИГЭ РАН, Геофизический центр РАН, ФГУП «НО РАО», АО «Красноярская горно-геологическая компания». Специалисты этих организаций, в разные годы участвовавшие в работах, и составили основу коллектива авторов. Важно, что многие из них до сих пор активно вовлечены в проводимые исследования и имеют все возможности довести их до логического завершения.

Авторы считают необходимым отметить специалистов, которые внесли вклад в геологические исследования российских территорий с целью выбора участков для захоронения РАО. Среди них особенно значительна роль доктора геолого-минералогических наук Е. Б. Андерсона и доктора технических наук А. С. Алая (Радиевый институт им. В. Г. Хлопина). В разное время в работах принимали участие специалисты АО «ВНИПИпромтехнологии»: кандидат технических наук Н. Ф. Лобанов, кандидат технических наук П. В. Лопатин, В. И. Сыцько, В. П. Парфенов. Практические работы на площадке организовывали руководители ФГУП «ГХК» доктор технических наук П. М. Гаврилов и кандидат технических наук Д. Н. Колупаев.



Рис. 2. Площадка строительства подземной исследовательской лаборатории на участке Енисейский

Литература

1. Камнев Е. Н. Выбор площадок для захоронения радиоактивных отходов в геологических формациях / Е. Н. Камнев, В. Н. Морозов, И. Ю. Шишиц. — М.: Горная книга, 2011. — 207 с.
2. Цебаковская Н. С. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-03 / Н. С. Цебаковская, И. И. Линге, С. С. Уткин, И. А. Пронь. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 35 с.
3. Цебаковская Н. С. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-04 / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, В. Ю. Коновалов. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 41 с.
4. Bailey L. Development of a generic safety narrative for a UK geological disposal facility / L. Bailey // *Mineralogical magazine*. — 2015. — Vol. 79. — № 6. — P. 1633–1640. — DOI: 10.1180/minmag.2015.079.6.39
5. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Е. Б. Андерсон, В. М. Даценко, В. И. Кирко и др. // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железнодорожск, 16–20 марта 1998) / под ред. Е. Ф. Любцевой. — СПб: Горно-химический комбинат, НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. — С. 14–23.
6. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский краж) / Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, Е. Ф. Любцева и др. // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. — 2006. — Т. XI. — С. 8–64.
7. Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические шаги к созданию / Е. Г. Кудрявцев, И. В. Гусаков-Станюкович, Е. Н. Камнев и др. // *Безопасность окружающей среды*. — 2008. — № 4. — С. 106–112.
8. Construction of a deep geological disposal facility for final isolation of high-level waste in the Nizhnekansky rock massif (Krasnoyarsk region) / E. G. Kudryavtsev, I. V. Gusakov-Stanyukovich, E. N. Kamnev et al. // *IAEA CEG Workshop on Disposal of Radioactive Waste (RW) and Spent Nuclear Fuel (SNF) — Experience and Plans (24–26 February 2009)*. — Bommersvik, Sweden, 2009.
9. Подземная изоляция радиоактивных отходов: Атомная энергетика / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев и др.; под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. — 592 с.
10. Кочкин Б. Т. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект) / Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский, С. В. Юдинцев. — М.: ИГЕМ РАН, 2017. — 384 с.
11. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2019-03 / И. Л. Абалкина, Л. А. Большов, И. В. Капырин и др. — Москва, ИБРАЭ РАН, 2019. — 40 с.
12. Большов Л. А. Стратегия развития ядерной энергетики России и вопросы экологии / Л. А. Большов, И. И. Линге // *Атомная энергия*. — 2019. — Т. 127. — № 6. — С. 303–309.
13. Большов Л. А. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО / Л. А. Большов, И. И. Линге // *Радиоактивные отходы*. — 2019. — № 3 (8). — С. 14–27. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-14-27
14. Проект «ПРОРЫВ» — технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики / Е. О. Адамов, Р. М. Алексахин, Л. А. Большов и др. // *Известия российской академии наук. Энергетика*. — 2015. — № 1. — С. 5–13.
15. Линге И. И. Радиационные и экологические аспекты атомной энергетики будущего / И. И. Линге, С. С. Уткин // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. — 2021. — Т. 66. — № 5. — DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121

Глава 1

ПГЗРО как объект Единой государственной системы обращения с РАО

Долгие годы ядерный оружейный комплекс и атомная энергетическая промышленность страны развивались в режиме незавершенных циклов по радиоактивным отходам, отработавшему топливу и выводу объектов использования атомной энергии из эксплуатации. Масштаб накопленных в этой области проблем и мер, направленных на их решение, хорошо известен [1]. Ключевую роль в глубоких преобразованиях практически на всех предприятиях атомной энергетики и промышленности должна сыграть Единая государственная система обращения с радиоактивными отходами (далее — ЕГС РАО). Создание ЕГС РАО, как и геологического объекта захоронения РАО, прямо предусмотрено Федеральным законом № 190-ФЗ от 7 июля 2011 г. «Об обращении с радиоактивными отходами...» [2]. Данные обстоятельства нельзя рассматривать линейно, поскольку, хотя закон формально и послужил причиной изменений, основным инициатором принятия закона и начала преобразований в атомной отрасли была сама отрасль, и геологический объект изоляции РАО сыграл в этом значимую роль. В рамках данной главы рассмотрим предпосылки этого факта.

1.1. Экологичность технологии и общественного сознания

Зачастую в литературе встречаются оценки первых десятилетий работы атомной промышленности России (1950—60-е гг.) как периода полного пренебрежения вопросами обращения с РАО и охраны окружающей среды. Погруженному в тему специалисту понятно, что они в значительной мере надуманы. Но справедливо также и то, что обращение с РАО, в том числе их захоронение, на протяжении по крайней мере первого десятилетия отрасли не относилось к выраженным ориентирам ее развития. В отношении второго десятилетия это утверждение уже не совсем верно. Наиболее сильный довод в пользу этого — пример организации работ по захоронению жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в глубоких геологических формациях.

Вопрос о глубинном захоронении ЖРО стал рассматриваться в России в середине 50-х гг. прошлого века [3]. Научно-технические предложения о перепосылках и организации работ по их захоронению были рассмотрены и одобрены на Научно-техническом Совете Министерства среднего машиностроения СССР под председательством академика И. В. Курчатова. Изначально было ясно, что далеко не все геологические формации пригодны для захоронения ЖРО с гарантированной изоляцией отходов в недрах. К проведению работ по созданию систем глубинного захоронения были привлечены ведущие организации страны, создана специализированная научно-исследовательская лаборатория № 5 (НИЛ-5) в институте ВНИПИпромтехнологии, на которую были возложены задачи проведения исследований и внедрения данного способа обращения с РАО на предприятиях отрасли [3].

В результате длительной и кропотливой работы научных, проектных и производственных организаций в шестидесятые годы были созданы и начали эксплуатироваться полигоны захоронения ЖРО Сибирского химического комбината (1963, г. Северск Томской области), Научно-исследовательского института атомных реакторов (1966, г. Димитровград Ульяновской области) и Горно-химического комбината (1967, г. Железногорск Красноярского края). Важно отметить, что при обосновании безопасности такого способа захоронения использовались все основные наработанные к тому времени в СССР и в мире методы обоснования безопасности закачки и локализации жидких отходов в поглощающие пласты-коллекторы.

Обоснование приемлемости и безопасности закачки отходов эволюционно развивалось. Изначально преобладали соображения подобия и равновесия. При добыче нефти закачка вод в пласт в определенной мере компенсирует изъятые объемы нефти (на нефтяных месторождениях это делается для поддержания пластового давления). По тем же причинам на полигонах закачки стоков устраивались разгрузочные скважины — из пласта-коллектора происходила откачка воды, а жидкие отходы туда нагнетались.

Несмотря на многие технологические изменения, реализованные за время эксплуатации полигонов, захоронение РАО уже много десятилетий воспринималось в отрасли как очень серьезная проблема. Вводились более жесткие ограничения на объемы, интенсивности и активность закачиваемых РАО, а также принципиальные ограничения на масштабирование этой практики, обусловленные законом об обращении с РАО.

При этом уже более трех десятилетий назад были сформированы идеи о необходимости рассмотрения геологического захоронения твердых радиоактивных отходов (ТРО) в системе производства полного цикла. Эти идеи в значительной мере отражены в авторитетной монографии на тему геологического захоронения РАО [4], где целая глава посвящена описанию отходов по ряду причин так и не созданного производства по переработке ОЯТ (РТ-2).

Также важно упомянуть результаты оценочной миссии МАГАТЭ по технологиям закачки ЖРО [5], проведенной в 2013–2014 гг. на предмет возможности их отнесения к лучшим международным практикам. Сопоставление организации работ по поиску подходящих площадок, сужение круга возможных кандидатов на размещение объектов и иные детали показали, что они практически ничем не отличались от современных требований МАГАТЭ, изложенных в базовом документе [6], и не вызвали замечаний зарубежных экспертов. Критика касалась только отсутствия удерживающей матрицы РАО, упаковок и в явном виде инженерных барьеров — небольших нюансов с практической точки зрения, но критически важных элементов с точки зрения современного восприятия технологий захоронения РАО, следствием чего стали замечания в части полноты обоснования долговременной безопасности.

При этом в защиту «упрощенного подхода» в отношении обоснования долговременной безопасности следует подчеркнуть, что на уровне государства и специалистов тема РАО не относилась к незначительным, но существовала абсолютная убежденность в возможности ее решения в условиях плановой экономики СССР. В тот момент, порядка 30 лет назад, этот подход формулировался следующим образом: «Технические проблемы обычно решаются тогда, когда возникает в этом реальная необходимость. Именно поэтому, а не в силу каких-либо непреодолимых трудностей не решены сегодня еще полностью проблемы переработки и регенерации ядерного топлива, захоронения радиоактивных отходов и снятия с эксплуатации отработавших ресурс ядерных энергоблоков. Эти задачи станут действительно актуальными, по-видимому, к концу первого десятилетия следующего столетия, и к тому времени они должны быть решены» [7]. Относительно наиболее актуальных проблем конца первой декады XXI века этот прогноз абсолютно оправдался, однако оптимизм по поводу возможностей и скорости их решения был явно преувеличенным. В особой мере это относится к геологическому захоронению РАО, которое во многих странах рассматривается не как реальная задача ближайших лет, а как перспективная технология, отражающая понимание значимости потенциальных экологических проблем и приоритетного отношения к вопросам долговременной безопасности.

Итак, несмотря на значительные успехи технологии закачки, факты ограничений, обусловленных принятием в 2011 г. закона об обращении с РАО [2], а также непризнание со стороны МАГАТЭ практики закачки как безопасной только подтвердили неизбежность произошедшей в 2005 г. активизации работ по геологическому захоронению РАО, когда были приняты первые решения по новому старту атомной отрасли. Кратко напомним хронологию этих событий.

Осенью 2005 г. в Федеральном агентстве по атомной энергии стали формироваться новые подходы к развитию отрасли. В конце 2005 г. [8] Российская Федерация ратифицировала «Объединенную конвенцию по безопасному обращению с отработавшим топливом и безопасному обращению с радиоактивными отходами» [9, 10]. В 2007 г. стартовала обновленная программа развития атомно-энергетического комплекса. В течение 2006—2007 гг. была разработана и утверждена федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» [1], в ходе подготовки которой впервые были оценены масштаб накопленных проблем и отсутствие готовых решений по конкретным объектам. Старт работ по ядерному наследию актуализировал задачу формирования новых правовых механизмов, создающих достаточную регулируемую основу для организации и выполнения необходимых работ и исключающих генерацию новых проблем в данной области. В 2007 г. были инициированы дискуссии по вопросу «с чего начинать». Ведь требовалось создать основу для решения сразу трех задач ядерного наследия: обращение с РАО, ОЯТ и вывод из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов. Как результат — решение, отраженное в Плане мероприятий по выполнению второго этапа реализации «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности России на период до 2010 года и дальнейшую перспективу» [11]. В соответствии с ним первоочередной задачей была определена разработка отдельного законопроекта «Об обращении с радиоактивными отходами». Работа над ним осложнялась тем, что процесс создания современной отечественной законодательной базы в области использования атомной энергии стартовал еще в середине 1990-х гг. и развивался одновременно в нескольких направлениях. Были разработаны федеральные законы «Об использовании атомной энергии» [12], «О радиационной безопасности населения» [13], «Об охране окружающей среды» [14], «О недрах» [15], а также большое количество подзаконных актов, среди которых ключевыми являются федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии (подзаконные акты 170-ФЗ) и документы, регламентирующие санитарно-гигиенические аспекты радиационной безопасности (подзаконные акты 3-ФЗ).

Сегодня можно констатировать, что решения по развитию систем были своевременными. Уже несколько лет спустя они могли бы и не состояться вследствие мирового экономического кризиса и иных перипетий. Также важно констатировать и правильность ориентации на интеграцию в мировую экономику и международные соглашения в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Например, сегодня Россия — один из мировых лидеров по количеству энергоблоков, сооружаемых за рубежом [16]. Также Российская Федерация является экспортером услуг по обогащению урана, фабрикации ядерного топлива и др. Создание современной системы обращения с РАО и объекта геологического захоронения РАО — это неотъемлемая часть облика Госкорпорации «Росатом» как одного из лидеров глобального рынка ядерных технологий.

1.2. Выработка требований к объекту

На протяжении длительного периода — примерно с середины 1990-х гг. — вопросы создания пункта захоронения глубинного типа были сосредоточены на интересах одной организации — поставщика отходов, а именно — Горно-химического комбината. Организаций, вовлеченных в научное сопровождение работ по созданию геологического пункта захоронения, было несколько, в том числе Радиевый институт им. В. Г. Хлопина и ВНИПИпромтехнологии. По аналогии с закачкой ЖРО предполагалось, что захораниваться будут только РАО от производств ГХК. Более того, на момент начала формирования требований к исполнению мероприятий ФЦП ЯРБ осенью 2007 г. в структуре Госкорпорации «Росатом» отсутствовала четко выделенная организационная единица, отвечающая за обращение с РАО. В условиях одновременного старта более полутора сотен мероприятий ФЦП ЯРБ, акционирования организаций отрасли и создания Государственной корпорации по атомной энергии не могли не реализоваться определенные риски. Часть из них состоялась, в том числе в виде режимного ограничения доступа к работам по объекту захоронения на участке Енисейский, инициированного исполнителем проектных работ, ВНИПИпромтехнологии, и отсутствия (по объективным причинам) детальных характеристик подлежащих захоронению РАО.

В период 2008—2010 гг. одновременно с обсуждением содержания будущего закона по обращению с РАО в Госкорпорации «Росатом» был сформирован специальный проектный офис, получивший наименование «Создание Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами» (ПО ЕГС РАО). Его первым руководителем стал А. А. Абрамов. Начиная с 2014 г. руководство проектным офисом осуществляется А. Н. Дорофеевым.

Принятие федерального закона «Об обращении с РАО...» [2] обеспечило правовую основу для формирования ЕГС РАО. В качестве наиболее значимых норм закона можно выделить несколько:

- обязательное захоронение РАО;
- создание механизмов финансового обеспечения по обращению с РАО, включая затраты на захоронение;
- создание механизмов ограничения дальнейшего накопления РАО для их производителей;
- определение организационно-правовых форм организаций, осуществляющих деятельность по захоронению.

В соответствии с законом координация и практическая реализация работ по функционированию ЕГС РАО возлагается на Госкорпорацию «Росатом» и Национального оператора по обращению с РАО (решением Правительства это ФГУП «НО РАО» [17]). В полномочия первой входит администрирование специального резервного фонда на захоронение РАО, определение лимитов промежуточного хранения РАО для организаций, эксплуатирующих особо радиационно и ядерно опасные производства и объекты, по согласованию с другими органами управления, а также подготовка предложений по тарифам на услуги Национального оператора и контроль за его деятельностью.

Национальный оператор стал единственной организацией, осуществляющей такие виды деятельности, как обеспечение безопасного обращения с принятыми на захоронение РАО, эксплуатацию и закрытие пунктов захоронения РАО; выполнение функции заказчика проектирования и сооружения пунктов захоронения РАО; подготовка прогнозов объема захоронения РАО и развития инфраструктуры по обращению с РАО; техническое и информационное обеспечение государственного учета и контроля радиоактивных веществ и РАО. С учетом периода потенциальной опасности отходов предлагаемые меры направлены на гарантии обеспечения безопасности пунктов захоронения РАО на длительном отрезке времени. Услуги по кондиционированию, транспортированию и хранению РАО оказывают специализированные организации.

Произошедшие организационно-правовые изменения существенно повлияли на организацию работ по сооружению ПГЗРО на участке Енисейский. В 2013 г. по инициативе ФГУП «НО РАО» как заказчика проектирования состоялось первое публичное рассмотрение хода работ на заседании НТС № 10 «Ядерная, радиационная и экологическая безопасность» Госкорпорации «Росатом». Уже в следующем году при НТС № 10 была создана специальная секция, на заседаниях которой вопросы исследований в обоснование долговременной безопасности ПГЗРО стали рассматриваться регулярно. Ключевые вопросы деятельности по созданию геологического объекта захоронения РАО рассматривались на совместных заседаниях НТС № 5 и № 10 под совместным председательством академиков РАН Л. А. Большова и Б. Ф. Мясоедова.

В 2017–2018 гг. по инициативе и при активном участии Директора по государственной политике в области обращения с ОЯТ, РАО и ВЭ О. В. Крюкова, ПО ЕГС РАО, ФГУП «НО РАО» и ИБРАЭ РАН была осуществлена разработка «Стратегии создания ПГЗРО» [18]. Утвержденная Стратегия вместе со стратегическим планом исследований в обоснование долговременной безопасности объекта [19, 20] стали основными программными документами ведения работ по объекту. Разработка этих документов, осуществлявшаяся с привлечением лучших компетенций страны, позволила определить позиции, нуждающиеся в дополнительном исследовании и анализе. Соответствующие меры, в том числе по корректировке проекта, предусмотрены указанными документами. С другой стороны, стратегия выявила новые задачи, которые должны быть решены эксплуатирующими организациями. Среди них: определение характеристик ранее накопленных отходов и внесение изменений в системы контроля действующих технологий с целью своевременного определения недостающих параметров, смысловая идентификация образующихся РАО класса 2, поскольку в утвержденных (проектных) характеристиках объекта указывалось на возможность размещения 150 тыс. м³ РАО класса 2, характеристики и источники образования которых не были установлены.

В Стратегии запланированы мероприятия, позволяющие организовать работы для уточнения этих вопросов. По этим причинам совокупность двух документов [18, 20] в полной мере можно отнести к документам, формирующим взаимодействие организаций разных блоков отрасли. В целом, за неполные 10 лет с момента формулирования основного замысла ЕГС РАО, произошли существенные и позитивные изменения [21], в том числе в работах по ПГЗРО.

Одновременно стала очевидной необходимость совершенствования критериев приемлемости РАО для захоронения, которые играют центральную роль в обосновании долговременной безопасности. Таким же очевидным становится и необходимость более общего согласования этапов развития ядерных технологий в целом и формирования системы захоронения [22]. А согласование отдельных ключевых дат начала или завершения функционирования отдельных технологий стало более чем актуально. Причем источником этих требований в большинстве случаев становятся технологии обращения с РАО и захоронения, а если обращаться к иницирующим условиям, то это экологические стандарты, т.е. нормативы безопасности для человека и объектов живой природы. Промышленность также будет формулировать требования двух видов: 1) много частных — в отношении захоронения конкретных типов РАО 1-го и 2-го классов; 2) одно системное — по эффективности системы захоронения, включая сопутствующую инфраструктуру, стоимость и своевременность захоронения.

Поясним суть основной проблемной ситуации, связанной с критериями приемлемости. Сформированные ранее на основе текущих (эксплуатационных) представлений о безопасности, они адресовались в основном к активности, а не периоду полураспада. При этом фактически произвольным образом формировался набор нерадиационных требований к характеристикам РАО. Естественно, что существующие РАО, в том числе накопленное алюмофосфатное стекло, им не соответствуют. Ситуация по РАО класса 2 также в полном объеме лежит в этой сфере несогласованности. Большие объемы металлических РАО относятся эксплуатирующими организациями к классу 2 исключительно в силу высоких уровней активности. Конечно, указанные обстоятельства временны. Хорошим признаком близкого разрешения этих проблем явился утвержденный Правительством план реализации «Основ государственной политики в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [23], которым в 2020 г. было предусмотрено, а в 2022 г. реализовано внесение изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 по критериям классификации РАО для захоронения [24].

В этой существенно более комплексной по содержанию и охвату эксплуатирующих организаций работе, инициированной ПО ЕГС РАО, предстоит решить задачи:

- инвентаризации характеристик накопленных и вновь образующихся РАО, подлежащих захоронению в ПГЗРО, и одновременно организации получения предварительных оценок допустимых значений критериальных характеристик уже в привязке к выбранной площадке размещения ПГЗРО [25];
- планирования экспериментальных работ в ПИЛ в обеспечение всего спектра предполагаемых к захоронению РАО [26];
- синхронизации деятельности по безопасному содержанию накопленных РАО классов 1 и 2 и развитию инфраструктуры транспортирования к будущему ПГЗРО;
- обеспечения корректировки технологий с целью снижения издержек на захоронение или выдержку РАО для снижения тепловыделения [27].

В целом, в рамках ЕГС РАО в настоящее время сформированы все основные механизмы организации работ по ПГЗРО, главным образом — синхронизации проектных, строительных и исследовательских работ.

В рамках подготовительных работ по проекту создания ПИЛ на участке Енисейский на территории строительства в период 2016—2023 гг. сделано следующее.

- Произведена зачистка строительной площадки от растительного слоя и выполнены планировочные решения для размещения основных объектов наземного комплекса.
- Построена высоковольтная линия электропередач, созданы объекты энергоснабжения и первоочередные сооружения, включая объекты, обеспечивающие безопасность проведения работ в объеме, достаточном для начала горнопроходческих работ.
- Развернута сеть долговременных наблюдений (метеорологических, гидрологических, гидрогеологических, сейсмологических, экологических, за современными движениями земной коры). Отдельно с целью фиксации начальных параметров массива до техногенного вмешательства имеющаяся сеть разведочных скважин, пройденных на ранних стадиях геологического изучения, реконструирована и переведена в статус наблюдательных, также начата проходка дополнительных исследовательских скважин.
- Получен комплект разрешительной документации на пользование недрами и осуществление горнопроходческих работ.
- Подготовлен и согласован надзорными организациями комплект документов, обеспечивающих выполнение приоритетных исследовательских работ на текущем этапе реализации проекта создания ПИЛ (проект разведочной стадии геологоразведочных работ, программа мониторинга состояния недр и компонентов окружающей среды на стадии разведки).
- Начата проходка вертикальных стволов ПИЛ.

Литература

1. Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Т. 1 / под ред. А. М. Агапова, Е. В. Евстратова, Н. П. Лаверова и др. — М.: ОАО «Энергопроманалитика», 2012. — 356 с.
2. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: №190-ФЗ: [Федеральный закон от 11.07.2011]: [в редакции от 02.07.2013 № 188-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, от 21.12.2021 № 421-ФЗ]. — Официальный интернет-портал правовой информации, 2021.
3. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов / А. И. Рыбальченко, М. К. Пименов, П. П. Костин и др. — М.: ИздАТ, 1994. — 256 с.
4. Подземная изоляция радиоактивных отходов: Атомная энергетика / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев и др.; под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. — 592 с.
5. 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. — Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2020. — 55 p.
6. Захоронение радиоактивных отходов: Серия норм безопасности МАГАТЭ: Конкретные требования безопасности No. SSR-5. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2011. — 76 с.
7. Ядерная энергетика. Проблемы и перспективы. Экспертные оценки / под ред. А. П. Александрова. — М.: Издательство ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1989. — 489 с.
8. О ратификации Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами: № 139-ФЗ: [Федеральный закон от 4.11.2005]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2005.
9. Joint convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management: Information circular: INFCIRC/546. — Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 1997. — 36 p.
10. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами: Информационный циркуляр: INFCIRC/546. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2001. — 38 с.
11. План мероприятий, связанных с выполнением первого этапа реализации Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2010 года и дальнейшую перспективу: [утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 117-р от 3.02.2005]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2005.
12. Об использовании атомной энергии: №170-ФЗ: [Федеральный закон от 21.11.1995]: [в ред. федерального закона № 219-ФЗ от 28.06.2022]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2022.
13. О радиационной безопасности населения: № 3-ФЗ: [Федеральный закон от 09.01.1996]: [в редакции от 22.08.2004 № 122-ФЗ, от 23.07.2008 № 160-ФЗ, от 18.07.2011 № 242-ФЗ, от 19.07.2011 № 248-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, от 11.06.2021 № 170-ФЗ, от 18.03.2023 № 67-ФЗ]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2023.
14. Об охране окружающей среды: № 7-ФЗ: [Федеральный закон от 10.01.2002]: [в редакции федерального закона от 14.07.2022 № 343-ФЗ]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2022.
15. О недрах: № 2395-1: [Новая редакция, изложенная в Федеральном законе от 03.03.1995 № 27-ФЗ]: [в редакции федерального закона от 29.12.2022 № 598-ФЗ]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2022.
16. World Nuclear Performance Report 2022. — L., United Kingdom: World Nuclear Association, 2022. — 64 p.
17. Об определении национального оператора по обращению с радиоактивными отходами: №170-ФЗ: [Распоряжение Правительства Российской Федерации № 384-р от 20.03.2012]. — М.: Научно-технический центр правовой информации «Система» Федеральной службы охраны Российской Федерации, 2012.
18. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 114—120.

19. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов / А. Н. Дорофеев, Л. А. Большов, И. И. Линге и др. // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1 (1). — С. 34–43.
20. Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров: Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край): [утв. директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО ГК «Росатом» О. В. Крюковым 09.01.2019]. — М.: ФГУП «НО РАО», 2019.
21. 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 // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1 (6). — С. 8–24.
22. Большов Л. А. О согласовании этапов развития атомного энергопромышленного комплекса и системы обращения с РАО / Л. А. Большов, И. И. Линге // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 3 (8). — С. 14–27. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-3-14-27
23. Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности российской федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: [утв. Указом Президента Российской Федерации № 585 от 13.10.2018]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2018.
24. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. №1069 [Постановление Правительства Российской Федерации № 1929 от 29.10.2022]. — М.: Научно-технический центр правовой информации «Система» Федеральной службы охраны Российской Федерации, 2022.
25. Анализ данных по радионуклидному составу РАО в контексте оценки долговременной безопасности их захоронения / Т. А. Александрова, П. А. Блохин, А. А. Самойлов, А. В. Курындин // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2 (3). — С. 44–51.
26. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика / А. А. Абрамов, Л. А. Большов, А. Н. Дорофеев и др. // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 1 (10). — С. 9–21. — DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21
27. О возможностях управления характеристиками боросиликатного стекла при переработке ОЯТ ВВЭР-1000 на ОДЦ «ГХК» / П. А. Блохин, А. Н. Дорофеев, И. И. Линге и др. // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 2 (7). — С. 49–58. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-49-57

Глава 2

Основные подходы к выбору района и участка размещения объектов глубинного захоронения РАО и ОЯТ

Выбор места для захоронения РАО, содержащих долгоживущие радионуклиды, рассматривается в мировой практике как первый этап среди мероприятий по обеспечению их долговременно радиационной безопасности. Именно на этом этапе закладывается основа будущей безопасности таких объектов в целом [1]. В имеющихся отечественных обзорах, касающихся геологической изоляции долгоживущих и высокоактивных РАО в мировой практике, вопрос выбора места для размещения глубинных хранилищ рассматривался неоднократно, с разной степенью полноты охвата стран и методологических подходов [2–10].

Исследования с целью оценить возможность использовать геологические формации для безопасной изоляции РАО начали проводиться с середины 1950-х гг. специалистами Национальной академии наук США [11, 12]. В тот период в качестве наиболее перспективных горных пород рассматривались соляные купола, а в качестве места размещения ПГЗРО — отработанные соляные шахты [13]. Интересно отметить, что в описываемое время тот факт, что безопасное захоронение РАО будет когда-либо сочтено проблематичным, стал бы большим сюрпризом для родоначальников геологического захоронения [11, 14].

В ходе предварительных исследований были выявлены многочисленные и разнообразные требования к геологической среде захоронения, которая была бы способна обеспечить надежную изоляцию высокоактивных отходов (ВАО) от окружающей среды. На этом этапе никаких специальных процедур выбора мест захоронения РАО не применяли, учитывали преимущественно инженерно-геологические и/или экономические факторы (пригодность пород для строительства, место производства и низкие затраты на транспортировку отходов, собственность на землю и иное). Геологические вопросы решались исходя из возможностей конкретной страны: где-то приемлемой средой считались соляные породы, где-то — глины, в третьих странах — кристаллические породы. Быстро выяснилось, что непосредственно в районах производства и хранения РАО геологические условия оказались пригодными для захоронения лишь в единичных случаях.

В 1970-х гг. ситуация начала изменяться. Органами власти отдельных государств и такими международными организациями, как МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР [15–17] были разработаны определенные методологические подходы и процедуры выбора мест захоронения. Одновременно появились новые вызовы. Программы по захоронению РАО сталкивались с активным противодействием местных властей и «зеленых»* движений типа «not in my backyard». Это неоднократно ставило проекты захоронения РАО в США, Франции, Великобритании и других странах на грань срыва или откладывало их реализацию на многие годы [18–22]. Германия и вовсе приняла политическое решение о прекращении использования ядерной энергетики. Это решение не избавило страну от проблемы утилизации уже накопленных РАО, и в мае 2017 г. стартовала новая программа выбора места, окончание которой намечено на 2031 г. [23]. Следствием «зеленых» движений стал особый «инициативный» стиль в подготовке решений центральных властей о размещении пунктов захоронения РАО. Этот стиль предполагает согласие местного населения и органов самоуправления на размещение пункта захоронения на своей территории и основывается на открытом и широком обсуждении проблемы и подготовки ее решения [24–26].

Однако везде и всегда, до окончательного согласия местного населения или после предварительного, территории размещения будущего объекта захоронения тщательно исследуются. В Российской Федерации сегодняшнему дню предшествовали более чем 25-летние исследования геологической среды региона, проводившиеся ведущими научно-исследовательскими и проектными институтами.

* Здесь следует уточнить, что, хотя современные «зеленые» движения все чаще относят атомную энергетику к экологичным источникам энергии в силу того, что она позволяет существенно сократить глобальные выбросы CO_2 и при безопасном обращении почти не оказывает воздействия на экосистемы, исторически эоактивисты были настроены радикально против атомной промышленности в целом.

2.1. Международный и отечественный опыт принятия решений по процедуре выбора места

Процедуры подготовки и принятия решений о выборе места размещения хранилища отходов, которые были разработаны еще в 1970-е гг. [15], продолжают совершенствоваться, вовлекая в рассмотрение новые факторы и прибегая к оригинальным методикам [1, 16, 17, 27, 28]. В России требования к выбору места для будущего хранилища впервые были официально закреплены в 2004 г. [29] и актуализированы в 2014 г. [30]. Анализ мировой практики принятия решений показывает, что геологическая среда размещения играет важную, но не всегда определяющую роль. Множество организационных, социальных и экономических факторов, которые рекомендуется принимать во внимание, а также ограничения, накладываемые со стороны геологической среды, говорят о том, что выбор идеального места вряд ли возможен, а в сегодняшней реальности, когда в большинстве стран место для первого хранилища уже определено, такой выбор – это упущенная возможность, хотя разработаны довольно нетривиальные методологии выбора [31].

Все имеющиеся на сегодня процедуры выбора места тесно связывают между собой социально-экономические факторы и условия геологической среды. Эффективность процедуры достигается при удовлетворении геологических, экономических, правовых, социально-политических и других факторов. Множество целей, которые преследуются при выборе места, исключают единственно верное решение или выбор «самого лучшего» места. Рекомендуемое место – всегда компромисс, и геологическая среда в нем может не быть наилучшей из возможных в природе [2, 25]. Осознание этого факта привело к тому, что выбор места для захоронения РАО стал рассматриваться не только как геологическая, но и как управленческая проблема. Это связано с необходимостью сделать обоснованный выбор из множества альтернативных вариантов перспективных мест и геологических сред в условиях многокритериальности оценки этих альтернатив [2, 25, 32].

Проблема обоснованности выбора заключается в отсутствии единой основы для объективного сравнения различных факторов: как геологических между собой, так и геологического в целом с другими важными факторами. Каждый из них (наличие подходящей геологической среды, финансовые затраты, плотность населения, права собственности на землю, активность «зеленых» движений и т. д.) выражается в присущих ему показателях, причем далеко не все из них количественные. Разнообразны и сложны для количественного выражения геологические факторы, т. е. как раз те, на основании которых проводится оценка безопасности объекта захоронения РАО, в том или ином потенциально перспективном в социально-экономическом отношении месте.

Такая объективная причина, как множественность аргументов, не сводимых друг к другу (типичная для задач многокритериальной оптимизации), привела к распространению методов экспертной оценки в практике обоснования мест для размещения объектов захоронения РАО, включая оценку пригодности геологических условий.

2.1.1. Методология выбора места

Методологии принятия решения, которые используются в процессе выбора места для размещения опасных производств, в том числе атомных объектов, сильно отличаются по степени формализации процедур экспертной оценки [33]. Некоторые из них перечислены ниже в порядке повышения уровня формализации на примерах выбора места для захоронения РАО.

1. **Выбор по предпочтительности.** Место и/или геологическая среда рассматриваются как приемлемые на основании их собственных достоинств без сравнения с другими местами или средами. Экспертные оценки проводятся в скрытой форме. Иллюстрацией служат предложения размещать объекты захоронения на производственной площадке с дальнейшей оценкой пригодности местных геологических условий. Для России такой площадкой была, например, территория ПО «Маяк» (см. раздел 3.3), для США — резервация Хэнфорд [12]. Другие предложения такого рода основаны на выделении в пределах страны районов, совокупность геологических условий в которых оценивается экспертами как перспективная или потенциально пригодная для использования в целях окончательной изоляции РАО. В качестве таких потенциально пригодных геологических образований рассматривались территории развития выходов скальных пород, эвапоритов (например, каменная соль), безводных туфов, многолетнемерзлых пород или других пород с последующим отбором площадок в их пределах по негеологическим критериям. Для России такая площадка была выбрана среди многолетнемерзлых пород на территории Северного ядерного полигона на архипелаге Новая Земля (см. раздел 3.1), для США — площадка Юкка Маунтин среди безводных туфов на границе ядерного полигона в штате Невада [12].
2. **Выбор с качественным сравнением.** Используются факторы сравнения, выраженные в терминах качественного описания возможного влияния на решение. Экспертные оценки проводятся в скрытой форме. В одних случаях проводится районирование территории с выделением районов, вся совокупность геологических условий в которых признается потенциально пригодной. Примером могут служить методики районирования юго-запада США (см. подраздел 2.1.2) или Великобритании, а также в районе Нижнеканского массива в Красноярском крае России (см. раздел 3.4). В других случаях проводится районирование территории путем последовательного применения критериев для оценки отдельных условий и постепенного сокращения площади исходной территории до локального участка. В результате участки, выделенные как перспективные, обладают всей совокупностью пригодных геологических условий. Примером могут служить программы выбора места в Швеции, Финляндии, США, Франции и других странах (см. подраздел 2.1.2). В случае выявления альтернатив для сравнения намеченных районов обычно принимаются критерии «ad hoc», т. е. специально приспособленные для оценки специфических черт геологического строения территории или социальноэкономических условий с целью постепенного сокращения территории, в пределах которой осуществляется выбор.

3. **Выбор с определением рейтинга.** Экспертные оценки используются в явной форме для количественного ранжирования альтернатив, но основания для ранжирования в явной форме обычно не предлагаются [34, 35]. Групповая комплексная оценка (рейтинг) района или участка, выражаемая количественно (в баллах), снижает возможность волевых решений. Такая методика кроме геологических факторов может включать оценку некоторых социально-политических факторов (например, плотность населения и др.).
4. **Выбор на основе многофакторного анализа.** Этот подход опирается на набор аксиом для подготовки рационального решения сложных проблем. Теория принятия решений предоставляет теоретически обоснованные процедуры для формализации и интеграции суждений и предпочтений экспертов и заинтересованных сторон в оценке различных направлений действия. Анализируемые факторы оцениваются количественно и формально включаются в подготовку решения. Выделение районов захоронения проводится на основе формализованного опроса экспертов, суждения которых позволяют дать комплексную количественную оценку (рейтинг) разным совокупностям условий, пространственным на исходной территории. Отличия от предыдущей методики ранжирования состоят в способах получения частных оценок, в подходах к отбраковке непригодных районов и, что самое важное, в агрегированном признаке, определяющем пригодность районов для захоронения. Например, в предложениях [2, 36] признаком пригодности служит геоэкологический риск, оцениваемый как возможный уровень потенциального загрязнения окружающей среды радионуклидами в результате утечек, вызываемых геологическими условиями района. В методологии, использованной в китайском проекте [37], для количественного ранжирования перспективных участков использовался специальный «индекс пригодности» места для захоронения ВАО (Q_{HLW}^R) [38]. Индекс учитывает не только инженерно-геологическую пригодность пород для сооружения хранилища, но и другие факторы, важные для долговременной безопасности захоронения. Значения индекса рассчитываются по специальному уравнению, которое включает различные эффекты: влияние зон трещиноватости, химизма подземных вод, тепловых воздействий, гидравлической проводимости, конструктивной пригодности пород, отношения прочность/напряжение [37]. Специальные показатели пригодности направлены на преодоление недостатков первых трех методологий (таких как использование неявных или скрытых предположений) и упрощение процедуры получения экспертных оценочных суждений.

2.1.2. Примеры национальных программ выбора места

Предложение перспективной в геологическом отношении среды — простейший методологический подход к процессу выбора участков для захоронений [2]. Наверное, первой из этих сред в 1957 г. в США была названа среда в каменной соли [11, 39]. Уже в 1959 г. в ФРГ каменная соль рекомендуется как вмещающая порода для геологического хранилища, и в 1963 г. Федеральный институт наук о Земле и природных ресурсов (BGR) предложил исследование каменной соли для окончательного захоронения РАО [13]. После оценки территории Западной Германии был выбран соляной шток (диапир) Горлебен. Этот массив каменной соли расположен на левом берегу р. Эльбы примерно в 100 км юго-восточнее г. Гамбурга. Диапир имеет в плане форму сильно вытянутого эллипса размером 12 × 4 км северо-восточной ориентировки и объемом не менее 80 км³. Разведка началась с середины 1970-х гг. [40, 41].

Идея производить захоронение РАО в туфах, приуроченных к мощной зоне аэрации, т. е. практически в безводной среде, была высказана И. Дж. Уиноградом в начале 1970-х гг. [42]. Уже в 1977 г. была выбрана площадка в горах Юкка на краю Невадского ядерного полигона и началось ее изучение. Состав пород для этой среды имеет подчиненное значение, а главную роль играют климатические и гидрогеологические условия. Они-то, наряду с удачным расположением относительно объектов ядерного оружейного комплекса США, и стали самым значимым фактором при выборе площадки [43].

Районирование территорий предлагалось или применялось в ряде стран, в том числе в России [44, 45], в Великобритании при выборе места для захоронения α -излучающих РАО [46], в программе оценки территории юго-запада США с целью выбора наилучшего места для пункта захоронения ОЯТ в безводных туфах [47, 48]. Методика, принятая в последней работе, позволила дать положительную оценку пригодности для захоронения ОЯТ сразу многим районам юго-запада США, в том числе району в горах Юкка, уже намеченного к тому времени (1977 г.) для размещения могильника. Отсутствие в этой методике (и других подобных методиках районирования) рациональной процедуры сравнения потенциально благоприятных районов между собой не позволило распределить эти районы по перспективности, в частности — показать в этом ряду участок в горах Юкка. Причина этого — невозможность сравнить между собой различные совокупности геологических условий без установления относительной значимости каждого из этих условий в общей пригодности среды для захоронения.

Последовательный отбор — наверное, наиболее распространенная методология процесса выбора места. Хорошим примером может являться Шведская программа по захоронению ОЯТ. Общее однообразие геологических условий территории этой страны диктовало размещение пункта захоронения в кристаллических породах. В качестве главных геологических опасностей рассматривались возможные подвижки по зонам тектонических нарушений и агрессивный по отношению к металлическим упаковкам состав подземных вод. Это и определило последовательность действий в шведской программе выбора места:

- 1) выделение относительно ненарушенных блоков кристаллических пород вне зон крупных разломов;
- 2) определение гидрогеологической и петрографической пригодности этих блоков [49].

В Швеции процесс размещения места окончательной изоляции продолжался более 30 лет (рис. 2.1). В течение периода 1977–1985 гг. национальный оператор (SKB) проводил комплексные исследования нескольких потенциальных площадок, расположенных в разных частях Швеции с гранитным и гнейсовым фундаментом. Принципиальное заключение по результатам исследования этих участков состояло в том, что все они были потенциально пригодны, отличаясь некоторыми местными особенностями геологической среды кристаллического фундамента. Еще один урок состоял в том, что работа по размещению должна была основываться на доверии местного населения. Эти выводы сформировали основу для новой программы размещения хранилища, принятой в начале 1990-х гг., и с тех пор она продолжает развиваться.

В период 1993–2000 гг. SKB проводил технико-экономическое обоснование в восьми муниципалитетах с учетом мнения жителей. Хотя геологические исследования составляли основной компонент, на этом этапе бурение не проводилось. Однако в трех муниципалитетах скважины уже имелись. В 2000 г. приоритетными для проведения исследований на местах были определены две области:

- участок Форсмарк в муниципалитете Эстхаммар;
- район Симпеварпа и Лаксемара в муниципалитете Оскарсхамн.

В последнем районе еще в 1986 г. была заложена и в 1995 г. начала действовать ПИЛ Аспё (рис. 2.2).

В 2002 г. SKB с согласия муниципалитетов инициировал исследования двух выделенных мест для окончательного выбора места хранилища. Инженерно-геологические исследования включали измерение характеристик геологической среды с воздуха, на поверхности и в нескольких 1000-метровых скважинах для водоснабжения. Размеры исследуемой площади на каждом участке были приблизительно 10 км², и исследования включали бурение около 20 новых скважин с отбором керна до глубины хранилища 500 м и глубже.

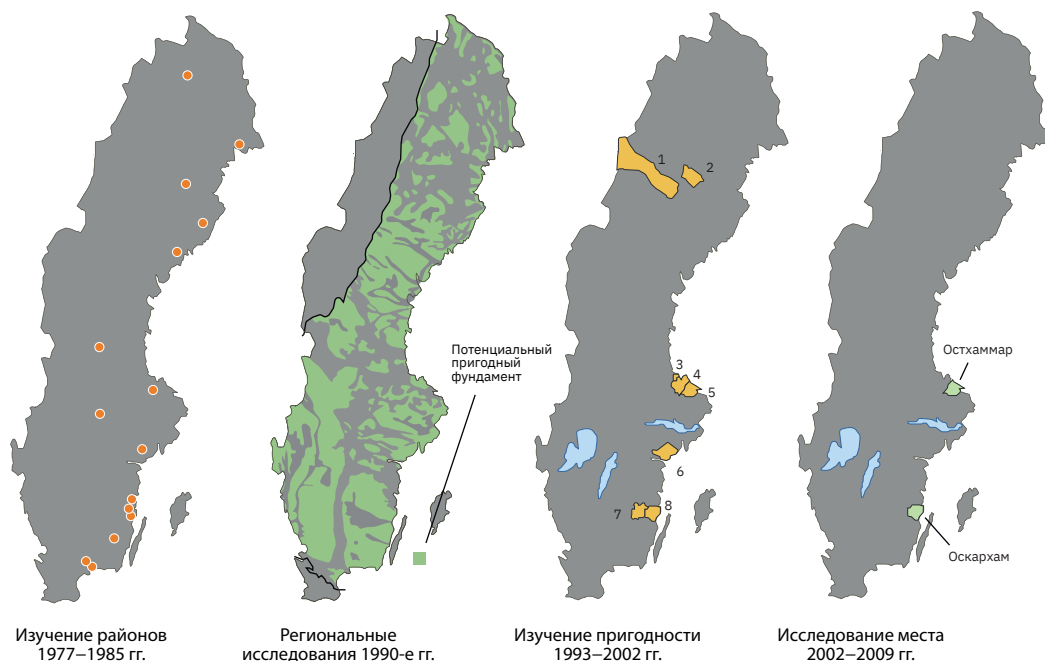


Рис. 2.1. Швеция. Выбор места 1977–2009 гг. [50]

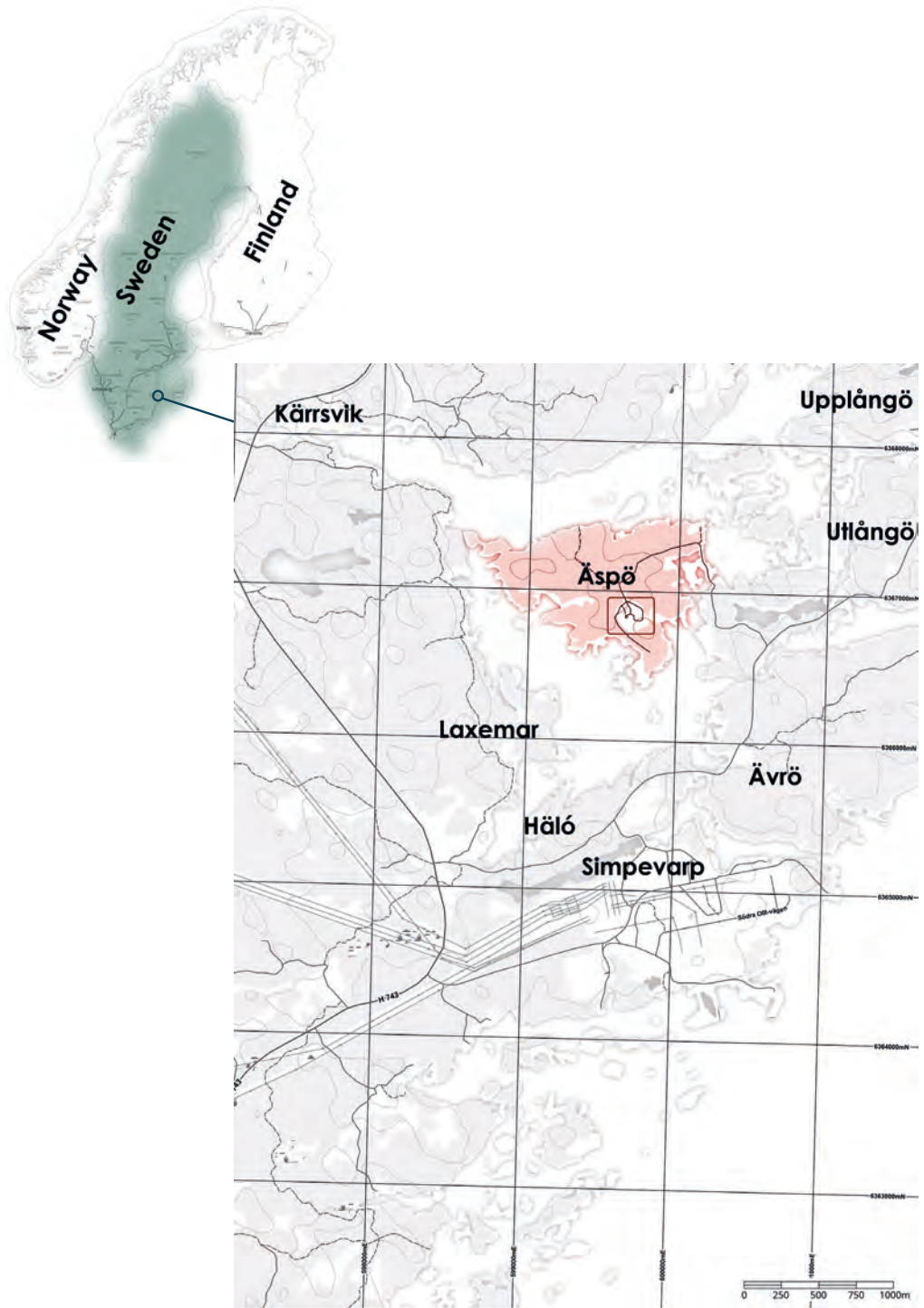


Рис. 2.2. Расположение ПИЛ Аспё [50, 52]

Данные изучения каждого из двух участков были представлены в описательных моделях, Site Descriptive Model (SDM) [51]. Эти модели описывали геометрию участка, свойства коренных пород и подземных вод, а также процессы, которые важны для понимания геологической эволюции территории до сегодняшнего дня и прогноза будущей миграции радионуклидов. В 2005 г. была представлена предварительная модель Форсмарка, а в 2006 г. — модель Лаксемара. Систематическое изучение двух потенциальных площадей привело к тому, что эксперты SKB пришли к выводу, что Форсмарк был бы более подходящим местом. Кроме того, был сделан вывод о том, что ни один из других объектов исследования не имеет каких-либо существенных геологических преимуществ по сравнению с ним. В 2008 г. была представлена окончательная модель Форсмарка [51]. 3 июня 2009 г. Совет директоров SKB решил, что Форсмарк является тем местом, для которого SKB должен подать заявку на получение лицензии на создание пункта окончательной изоляции ОЯТ [49]. Такая заявка была подана в марте 2011 г. Из-за сложной системы лицензирования ядерных установок, которая принята в Швеции, процесс затянулся на многие годы. В планах SKB — приступить к строительству пункта захоронения незамедлительно после получения соответствующего разрешения (лицензии) [52].

В Финляндии, территория которой располагается в аналогичной шведской геологической ситуации, исследования по выбору места для хранилища ОЯТ продвигались, как указано на официальном сайте национального оператора Posiva Oy, следующим образом [53].

- **1983—1985 гг.** Был осуществлен обзор территории всей Финляндии.
- **1986—1992 гг.** Были проведены предварительные исследования.
- **1993—2000 гг.** Детальная характеристика участков и процедура оценки воздействия на окружающую среду были проведены в четырех муниципалитетах: Ромуваара в Кухмо, Киветти в Энекоски, Олкилуото в Эурайоки и Хестхольмен в Ловийсе. В 1999 г. Posiva Oy подал заявление в правительство с просьбой принять политическое решение, рекомендующее выбрать Олкилуото в муниципалитете Эурайоки в качестве места для окончательного захоронения ОЯТ. В том же году муниципальный совет Эурайоки одобрил размещение объекта окончательной изоляции в Олкилуото 20 голосами против 7. В декабре 2000 г. правительство приняло политическое решение в пользу этого проекта. Рассмотрение этого вопроса продолжилось в парламенте, который в мае 2001 г. ратифицировал политическое решение правительства 159 голосами против 3.

В рамках характеристики места была построена ПИЛ Онкало, которая действовала в период 2004—2012 гг. В ней были выполнены многочисленные эксперименты по обоснованию безопасности будущего пункта захоронения [8].

В декабре 2012 г. Posiva Oy подал заявку на получение лицензии на строительство хранилища ОЯТ. В феврале 2015 г. финский ядерный регулятор выдал первую в мире лицензию на сооружение такого объекта, правда, с замечаниями. В конце 2016 г. регулятор подтвердил готовность Posiva Oy к началу строительных работ на выбранной площадке. К настоящему времени проведены работы по проходке вертикальных шахт и первых центральных тоннелей. В конце 2021 г. Posiva подала заявку на получение лицензии на эксплуатацию и в 2024 г. собирается приступить к работам по захоронению ОЯТ [54].

Наличие или отсутствие ПИЛ в процессе выбора площадки – отличие финской и шведской программ захоронения ОЯТ. То, что в российской программе предусмотрено сооружение специальной (т.е. на месте будущего ПГЗРО) подземной исследовательской лаборатории, сближает ее с финской. Китайская программа, рассматриваемая ниже, также предусматривает сооружение специальной ПИЛ.

Концепция ПИЛ, ориентированной на конкретную область в Китае, впервые была предложена в 2014 г. [55]. Ее строительство завершается в 2024 г. Эскизный проект ПИЛ предлагает максимальную глубину 560 м. Ранее в районе Бэйшань (Beishan) провинции Ганьсу Северо-Западного Китая был построен разведочный туннель Бэйшань (Beishan exploration tunnel, BET), который представляет собой объект глубиной 50 м на участке Цзюцзин (Jiujiang) для разработки технологий, связанных с безопасным строительством и эксплуатацией ПИЛ.

Результаты процесса выбора площадки [37], полученные в течение последних 33 лет на основе утвержденной стратегии, определили окончательный участок Синьчан (Xinchang) для специальной ПИЛ в граните в районе Бэйшань (рис. 2.3). В процессе выбора места использовались два типа критериев: допускающие и исключающие.

1. Критерии, допускающие размещение ПИЛ:

- в пределах предпочтительной области для пункта захоронения ВАО;
- в предпочтительной горной породе;
- в условиях, пригодных для различных подземных исследований in situ;
- в месте, утвержденном местным правительством и местными гражданами;
- в месте, соответствующем национальным законам;
- в месте, соответствующем правилам в области инженерного строительства и охраны окружающей среды.

2. Критерии, исключающие размещение ПИЛ:

- районы, где воздействие (или возможность воздействия) неотектонических процессов, сейсмической активности, вулканизма, складчатости, диапиризма или других геологических процессов неприемлемо велико;
- районы изменения уровня моря, эрозии/оседания, оледенения, резкого изменения уровня поверхностных и подземных вод, резкого подъема и оседания или потенциальных геоопасностей;
- районы сосредоточения потенциальных запасов полезных ископаемых или водных ресурсов;
- участки существующих подземных инженерных сооружений, которые могли бы обеспечить каналы для миграции радионуклидов;
- районы, которые могут быть затоплены существующими или будущими водоемами;
- экологически чувствительные районы;
- области, неприемлемые для общественности или заинтересованных сторон, или из-за социальных последствий.

Процесс выбора площадки для китайского пункта захоронения ВАО начался в 1985 г. Общий процесс размещения был разделен на четыре этапа: общенациональный скрининг, региональный скрининг, районный скрининг и подтверждение места. За истекший период были проведены следующие мероприятия по выбору площадки.

1. **Общенациональный скрининг** (1985—1986 гг.). В качестве потенциальных регионов были выбраны шесть регионов: Юго-Западный Китай, Восточный Китай, Внутренняя Монголия, Южный Китай, Северо-Западный Китай и регион Синьцзян.
2. **Региональный скрининг** (1986—1989 гг.). По результатам, полученным на предыдущем этапе, были проведены дальнейшие исследования, и выбран 21 участок-кандидат. В Северо-Западном Китае район Бэйшань в провинции Ганьсу считается наиболее перспективным районом.
3. **Районный скрининг** (1990 г.). С 1990 г. основные усилия были сосредоточены на районе Бэйшань. В июле 2011 г. было решено считать его приоритетной областью для китайского пункта захоронения ВАО. Это важное решение обеспечило надежную основу для начала выбора места для ПИЛ. В качестве альтернатив одновременно с районом Бэйшань в течение 2016—2017 гг. для сравнения также было выполнено бурение в тела гранитных интрузий на других участках-кандидатах в Синьцзяне и Внутренней Монголии.

Процесс подтверждения места для первой ПИЛ в граните начался в 2015 г. Комплексные геологические, гидрогеологические и геофизические исследования, картирование поверхности и бурение глубоких скважин были проведены одновременно на 9 участках для обеспечения надежной основы для сравнения (рис. 2.4).

Окончательные результаты были таковы.

- В соответствии с установленными критериями размещения для ПИЛ в 2015—2016 гг. был проведен пошаговый экспертный опрос по выбору предпочтительного участка.
- В январе 2016 г. эксперты дали положительные рекомендации четырем участкам-кандидатам. С учетом мнения местных органов власти и общественного признания эксперты оставили два места. Далее, принимая во внимание то, что участок Синьчан имеет лучшее качество пород, более высокий индекс Q^R_{HLW} (см. подраздел 2.1.1), большой объем блока для размещения будущего хранилища и находится дальше от городов, эксперты рекомендовали его в качестве предпочтительного места для ПИЛ.

В итоге участок Синьчан (Xinchang) был выбран в качестве приоритетного, в то время как участок Шазаоюань (Shazaoyuan) был выбран в качестве резервного.

В тех странах, геологические условия которых допускали выбор из нескольких типов благоприятных пород, первым пунктом программ по методологии последовательного отбора обычно стоит выбор благоприятной геологической формации. Такова была ситуация во Франции, Японии и других странах.

Во Франции изначально (1987 г.) рассматривались в качестве перспективных для захоронения ВАО четыре типа формаций: граниты, гнейсы, каменные соли и глины-аргиллиты [56]. Дополнительными критериями отбора служили гидрогеологические и тектонические требования к безопасному захоронению, а также приемлемая глубина залегания пород и отсутствие полезных ископаемых. На сегодня выбор сузился до единственной площадки с глинистой средой [57, 58].

В Японии, несмотря на высокую тектоническую активность территории, на первом этапе также стоял выбор подходящей геологической формации. В качестве пригодных пород изучались граниты, глины и туфы [59—61].

Общественный интерес к японской программе захоронения более всего связан с влиянием, которое оказала на нее авария на АЭС Фукусима в 2011 г.

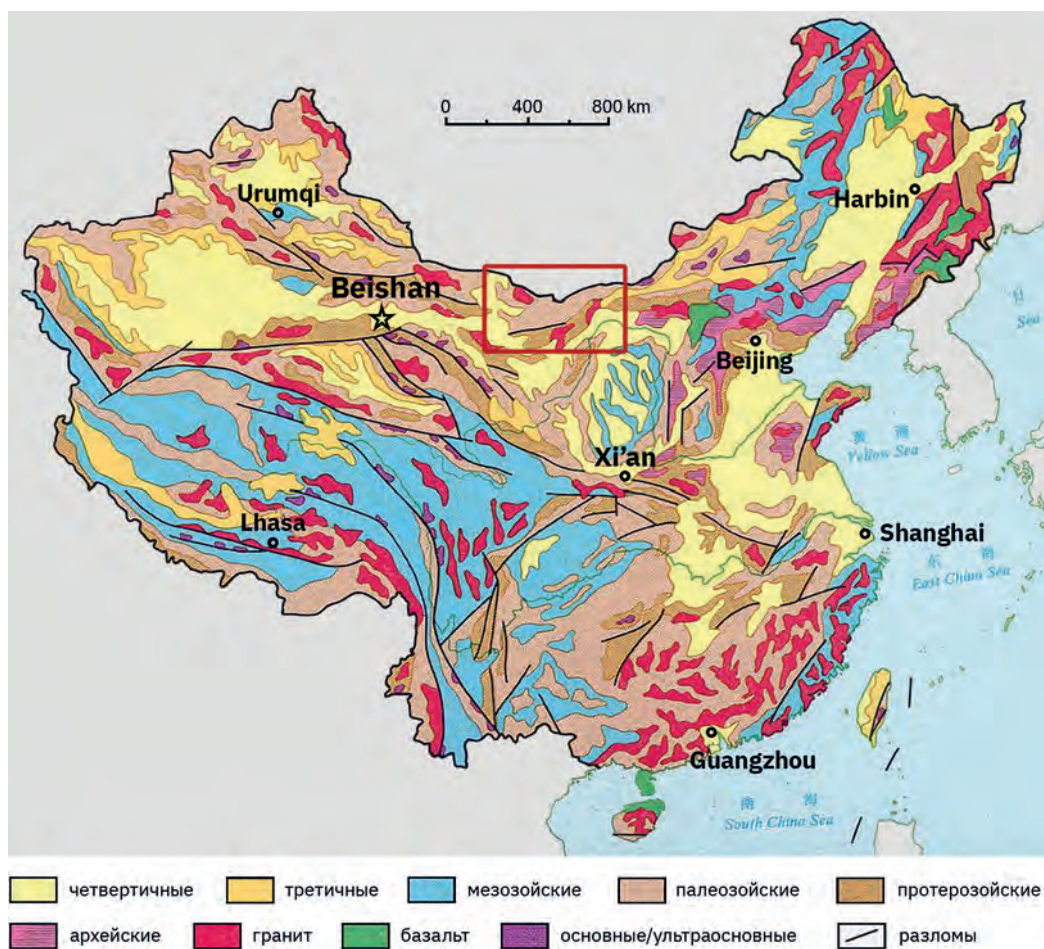


Рис. 2.3. Район Бэйшань (красный прямоугольник) на геологической карте Китая [39]

Япония начала изучать вопрос геологического захоронения ВАО в 1970-х гг. [62]. Для выбора геологического места захоронения ВАО правительство Японии приняло закон об окончательном захоронении радиоактивных отходов в 2000 г. В нем, в частности, была определена процедура выбора места для хранилища, состоявшая из трех этапов:

- обзор доступных литературных данных;
- стадия предварительного изучения;
- стадия детального изучения.

После аварии на АЭС Фукусима в 2011 г. политика захоронения была пересмотрена. В мае 2015 г. процесс выбора места был расширен за счет добавления общенационального скрининга, при этом был разработан набор критериев отбора на основе имеющихся геонаучных знаний. Теперь предусматривается ранжирование на: (I) потенциально менее подходящие районы, (II) потенциально подходящие районы и (III) потенциально более подходящие районы для размещения геологического

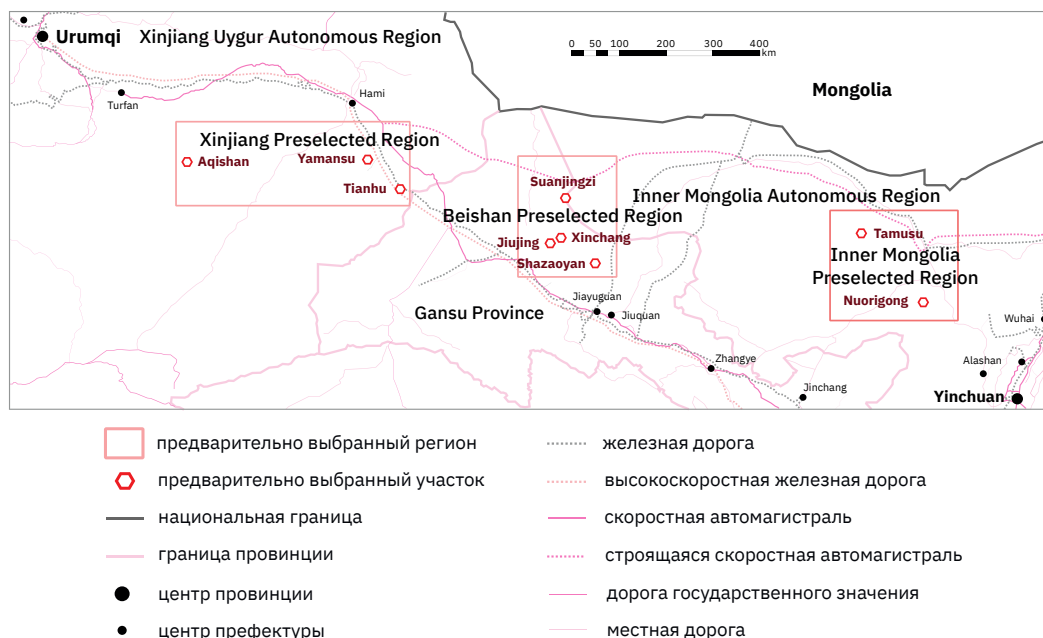


Рис. 2.4. Распределение девяти участков-кандидатов в Северо-Западном Китае (отмечены шестиугольниками) [37]

хранилища ВАО. В 2016 г. экспертная группа АЯЭ ОЭСР провела независимую техническую экспертную оценку методологии и расширенного процесса выбора, отметив, что они соответствуют международной практике [62].

Геологические критерии для оценки районов классифицируют важные события и процессы с точки зрения их потенциального воздействия на безопасность объекта.

Рассматриваются шесть категорий событий и процессов, дается их оценка (*) и рекомендации для отбора (**).

- **Вулканическая и магматическая деятельность.** Например: (*) распределение четвертичных вулканов в Японии, которое очень хорошо известно; (**) промежуточное резюме предписывает конкретное расстояние в 15 км от четвертичного вулкана.
- **Подъем и эрозия.**
- **Геотермальная активность.**
- **Химические возмущения потоком вулканических или глубинных флюидов.**
- **Минеральные ресурсы.**
- **Сейсмические опасности** (рассматриваются только для наземных сооружений; ожидается, что сейсмическое воздействие на глубине будет значительно ниже, чем на поверхности).

Современный подход обеспечивает информирование местного населения общин и властей на каждом этапе процесса выбора участка в соответствии с принятой на международном уровне стратегией геологического захоронения [63].

В некоторых национальных программах по методологии последовательного отбора приоритет отдавался тектоническим условиям. Такую позицию занимал один из ведущих экспертов России О. Л. Кедровский [64]. Выбор места, согласно его мнению, должен представлять собой несколько последовательных этапов:

- 1) анализ современных тектонических процессов и выделение «мертвой» зоны по тектоническим критериям;
- 2) анализ эндогенных факторов и прогноз состояния «мертвой» зоны;
- 3) анализ тафрогенного режима и выбор стабильных структурных форм;
- 4) инженерно-геологический и гидрогеологический анализы массива;
- 5) расчет напряженно-деформированного состояния массива и выбор участка заложения объекта;
- 6) прогноз состояния объекта.

Несмотря на наличие строгих методологий, на практике процедура выбора часто подчиняется исторически складывающимся обстоятельствам и политическим предпочтениям властей. Наиболее показательна в рассматриваемом отношении американская программа выбора места [43, 65]. Она включала оценку мест по всей стране и в различных геологических формациях (базальты, туфы и соли), приуроченных к разным гидрогеологическим условиям. Отбор участков производился в соответствии с набором геологических и социо-экономических критериев. В феврале 1983 г. было определено девять перспективных мест захоронения РАО: четыре в соляных слоях, три в соляных диапирах и по одному в базальтах и туфах. В мае 1986 г. этот этап был закончен рекомендацией трех участков в качестве «фаворитов» отбора:

- Деф-Смит в толще каменной соли;
- Хэнфорд в обводненных базальтах;
- Юкка в безводных туфах.

Затем должны были проводиться локальные геологические исследования, которые определили бы окончательный выбор. Однако из-за недостатка финансовых средств решением президента для детального изучения был оставлен только участок в горах Юкка.

Площадка Хэнфорд была отвергнута из-за неблагоприятных геолого-гидрогеологических условий, при том что она характеризовалась приемлемыми экономическими и социально-политическими условиями. Геологическая обстановка на ней рассматривалась как благоприятная только до осознания, что структура толщи слишком сложна, чтобы обеспечить достоверное моделирование безопасности системы захоронения в условиях восходящего потока подземных вод. Напротив, площадка Деф-Смит, на которой планировалось разместить РАО в солях и которая характеризовалась в геологическом отношении в высшей степени положительно, была отвергнута по социально-политическим соображениям.

Очевидно, что на выбор площадки в горах Юкка, кроме привлекательной идеи И. Дж. Уинограда производить захоронение в безводной среде, оказали влияние такие негеологические критерии, как федеральная собственность на землю, нерекультивируемость земли после ядерных испытаний, проводившихся на Невадском полигоне, низкая плотность населения, развитая транспортная инфраструктура и т. д. Площадка в горах Юкка была выбрана несмотря на сложные геологические условия, высокую тектоническую активность района, вероятность вулканических извержений и неблагоприятные гидрогеохимические условия. Другими словами, с точки зрения геологической науки условия на этой площадке очень далеки

от оптимальных. Проведение процесса отбора в США показало, что при принятии решения о месте для могильника геологическая среда может оказаться совсем не решающим фактором. Факторы, относимые к управленческим, оказались много весомее, чем геологические критерии. Длительные судебные разбирательства местных властей штата Невада и федерального оператора (US DOE) закончились приостановкой проекта в 2010 г. с неясными перспективами на будущее [66].

Перечисленные выше подходы имеют свои достоинства и недостатки. Каждый подход решает вопрос о потенциальной пригодности места, но ни один не дает однозначного ответа на вопрос о безопасности будущего хранилища. Для ответа на него необходимо достигнуть такой полноты и детальности изучения системы захоронения и прогнозирования ее эволюции, включая вмещающую геологическую среду, при которой станет возможна оценка безопасности будущего хранилища на основе принципов безопасности атомных сооружений [67]. Согласно этим принципам, пункт захоронения считается безопасным, если дозы облучения и радиационные риски для нынешнего и будущих поколений не превышают предельно допустимые нормы. Доказать соответствие будущего пункта захоронения РАО этим критериям безопасности призвана процедура оценки безопасности, которая является одним из важнейших условий получения лицензии на строительство хранилища. Оценка безопасности выполняется с использованием моделей миграции радионуклидов. Любой участок недр будет считаться всего лишь *потенциально пригодным* до тех пор, пока не будет доказана безопасность (или, наоборот, опасность) всей системы захоронения, т. е. всего объекта изоляции, включая систему инженерных барьеров и геологическую среду [68].

2.2. Критерии выбора потенциально пригодной геологической среды для размещения объекта окончательной изоляции РАО

На этапе выбора места безопасность объекта окончательной изоляции РАО определяется исключительно геологическими факторами, поскольку инженерные защитные барьеры существуют только в воображении проектировщиков, в чертежах или образцах. Выбор места — многоэтапный процесс, в начале которого оцениваются территории гораздо более обширные, чем займет впоследствии участок подземного объекта. Реализация проектов захоронения РАО подразделяется на этапы их размещения, сооружения, эксплуатации и закрытия [69]. В рекомендациях МАГАТЭ имеется более подробное деление этапа размещения (англ. — siting). Он включает, кроме прочего, определение концепции размещения и оценку площадки, состоящую из этапов выбора (site selection), проверки и подтверждения ее пригодности (site characterization или site investigation) [1]. Этап выбора может быть разделен еще детальнее на обзорное обследование обширной территории (screening) и последующие стадии ее сокращения с более подробным исследованием альтернативных участков для обоснования предпочтительности выбора единственного кандидата для детального изучения [70]. На эту этапность и стадийность процесса могут оказать влияние различные специфичные для разных стран факторы (ограничения), такие как политика, собственность на землю, законы в области недропользования, выступление местных властей и населения и др. (см. раздел 2.1). Тем не менее процесс в целом должен быть ориентирован на обеспечение безопасности объекта окончательной изоляции.

Детальность шагов в процессе отбора, как показывает практика, может быть разной, но в любом случае должны быть исследованы характерные для района предполагаемого размещения явления, процессы и факторы природного и техногенного происхождения, которые влияют на его безопасность [1, 30]. Совокупность этих факторов вытекает из целей, которые должны быть достигнуты, среди них обычно называются следующие:

- обеспечение долговременной безопасности населения;
- обеспечение эксплуатационной безопасности системы захоронения (безопасность на период строительства и загрузки);
- техническая возможность размещения и сооружения пункта захоронения;
- сохранение окружающей среды [25, 71].

Принятие в расчет перечисленных целей позволило сформулировать геологические критерии оценки территорий.

Геологические условия, которые могут послужить барьером на пути радионуклидов в биосферу, повышают изолирующие возможности всей системы глубоко-эшелонированной защиты. К ним относятся: низкая водопроницаемость вмещающих пород, отсутствие крупных проницаемых нарушений, высокая сорбционная способность пород и другие. Очевидно также, что недрам присущи и другие геологические условия, которые могут стать причиной разрушения отдельных барьеров или всей системы захоронения. Даже совершенная система инженерной защиты подвержена внешним воздействиям. За длительный период существования системы опасные события и негативные процессы могут вызвать или усилить утечку радионуклидов. Они могут быть вызваны как внешними к системе захоронения факторами (например, вулканические извержения, сейсмические события и др.), так и факторами, рожденными в самой системе захоронения (например, окисление и коррозия в неблагоприятных геохимических условиях, потеря материалами ИББ сорбционных свойств, в том числе в результате засоления и перегрева и т. д.). Многие из этих причин связаны с существующими геологическими условиями и возможными в будущем геологическими событиями.

Таким образом, двойная роль, которую может нести геологическая среда в обеспечении безопасности, диктует необходимость подбора таких геологических условий в потенциальном месте захоронения, которые в совокупности определяют пригодность геологической среды в отношении как защитных функций, так и потенциальных воздействий на систему захоронения.

2.2.1. Принципы выбора геологической среды для пунктов захоронения РАО

Основным положением большинства национальных концепций захоронения, что справедливо и для российской, является принцип максимального использования преимуществ местной геологической среды [72–74]. Использование этих преимуществ в общей системе защиты – один из фундаментальных подходов к обеспечению безопасности и, следовательно, принципов выбора пригодных геологических условий.

Геологическая среда как часть системы защиты населения должна удовлетворять нескольким требованиям безопасности [12, 75–78].

- Свести к минимуму контакт подземных вод с инженерными барьерами.
- Свести к минимуму миграцию любых радионуклидов, которые все-таки смогут покинуть пункт захоронения с подземными водами или газами в результате деградации инженерных барьеров.
- Обеспечить такой тепловой режим в пункте захоронения, который исключит потерю изолирующих свойств геологической среды и нежелательные изменения в РАО и инженерных барьерах.
- Обеспечить минимальный уровень геологических событий и процессов, которые могут нарушить целостность системы захоронения и привести к усилению утечек радионуклидов в биосферу.

Прежде всего, изолирующие свойства геологической среды определяют саму возможность размещения в ней РАО. В свою очередь, особые свойства размещаемых РАО предъявляют к геологической среде требования, ограничивающие круг пригодных для захоронения условий. Далее, как всякое строительство, сооружение подземного пункта захоронения РАО осуществимо только в определенных геологических условиях. И аналогично параметры будущего пункта захоронения задают некоторые ограничения пригодности геологических ситуаций.

2.2.2. Критерии пригодности геологической среды

Как уже упоминалось, при выборе геологической среды для изоляции РАО решаются две главные задачи, связанные с обеспечением безопасности хранилища: максимальное использование в системе безопасности защитных свойств геологической среды и выявление негативных геологических факторов, потенциально опасных для будущего хранилища РАО, с целью минимизации их влияния.

Для установления соответствия геологической среды требованиям, необходимым для обеспечения безопасной изоляции РАО, разработаны специальные *геологические критерии*. Критерии, используемые на этапе выбора места, обычно качественные и основываются на предпочтительности для захоронения сред с определенным составом и состоянием. Качественный уровень определения граничных значений приемлемости обусловлен, с одной стороны, общим характером информации, доступной на этом этапе работ, особенно на начальных обзорных стадиях, а с другой — целесообразностью отказа от жестких отсекающих количественных критериев, которые могут затруднить процесс формирования компромиссных решений.

Совокупность геологических критериев при выборе площадок для окончательной изоляции РАО утверждена в нормативных документах Российской Федерации (в первую очередь [30] и [69]), которые соответствуют рекомендациям международных организаций и практике других стран (см. подраздел 2.1.2). Так, не допускается размещение глубоких геологических хранилищ в районах с активными движениями земной коры, высокой сейсмической и вулканической активностью, в районах интенсивной разработки полезных ископаемых, в том числе в границах расположения карьеров, шахтных полей, санитарно-защитных зон водозаборов подземных вод, в пределах горных отводов месторождений полезных ископаемых.

Площадка для размещения пункта глубинного захоронения должна выбираться с учетом следующих требований [30, 78]:

- вмещающие породы должны быть представлены одним из потенциально пригодных типов (кристаллические породы: граниты, гнейсы, туфы предпочтительно основного и ультраосновного состава; каменная соль, ангидрит; глины);
- породы должны иметь достаточный объем, залегать на приемлемой глубине, обладать благоприятными физико-механическими свойствами, однородной структурой и низкой трещиноватостью;
- район площадки не должен испытывать интенсивных тектонических движений;
- горизонт пород, вмещающий хранилище, не должен содержать линзы рассолов, пласты проницаемых пород;
- толща вмещающих горных пород не должна содержать водоносных горизонтов, линз подземных вод или трещиноватых зон, по которым возможны водопритоки в горные выработки хранилища и их затопление*.

При наличии альтернативных вариантов площадок для размещения хранилищ глубокого заложения, отвечающих перечисленным требованиям, предпочтение следует отдавать тем, условия которых удовлетворяют одному или нескольким дополнительным требованиям:

* Это трудно исполнимое из-за своей расплывчатости требование, поскольку горные породы на потенциальной глубине захоронения обычно содержат то или иное количество подземных вод.

- подземные воды имеют восстановительный характер, слабощелочную реакцию и низкую минерализацию;
- активные разломы в пределах площадки отсутствуют;
- район расположения хранилища характеризуется пониженным тепловым потоком;
- выше предполагаемой глубины заложения подземных сооружений хранилища располагаются непригодные для водоснабжения водоносные горизонты и водоупоры;
- отсутствуют каналы гидравлической связи предполагаемого уровня размещения хранилища с дневной поверхностью, с выше и нижележащими водоносными горизонтами, включая непригодные для водоснабжения.

Перечисленные требования многообразны и касаются свойств горных пород, подземных вод, геологических, тектонических и гидрогеологических условий, а также факторов внешних воздействий. При этом они имеют разную значимость в обеспечении безопасности. Некоторые требования обязательны для выполнения — например, наличие пригодных пород. Другие требования, прежде всего касающиеся факторов внешнего воздействия, необходимо тщательно оценивать из-за большой опасности возможных последствий их проявления (вероятность сейсмической и вулканической активности и др.). Кроме того, присутствуют рекомендации, следование которым всего лишь желательно при наличии такой возможности, например, присутствие региональных водоупоров [2].

2.2.3. Сравнение потенциально пригодных пород

Наличие потенциально пригодной породы — важнейшее требование к среде захоронения. Пригодные для размещения хранилища среды должны отвечать определенным инженерно-геологическим требованиям, дающим возможность строительства и функционирования подземного сооружения. Например, совокупность теплофизических свойств должна придавать породе способность хорошо проводить (отводить) тепло и противостоять напряжениям, возникающим под воздействием высоких тепловых потоков от РАО. По физико-механическим свойствам они должны поддаваться проходке горным способом с применением имеющихся технологий и при этом быть достаточно прочными, чтобы поддерживать горные выработки до полной загрузки хранилища, сохранять устойчивость подземного сооружения в перспективе десятков (а может быть, и сотен) лет. Тела горных пород должны иметь размеры, достаточные для размещения хранилища требуемого объема, и залегать на глубине, приемлемой для строительства и недоступной для поверхностных процессов. Кроме того, такие породы сами по себе не должны быть ценным полезным ископаемым. Горные породы, пригодные для изоляции РАО, кроме того, должны обладать комплексом фильтрационных, геохимических и сорбционных свойств, препятствующих миграции радионуклидов в биосферу.

Ни одна из пород не обладает всеми перечисленными свойствами одновременно, поэтому «пригодная порода» — это всегда компромисс, что необходимо учитывать при выборе среды захоронения. Как показано выше, в той или иной мере потенциально пригодны породы трех групп [78]: (1) разнообразные магматические и метаморфические кристаллические породы (граниты, базальты, туфы, гнейсы); (2) эвапориты (каменная соль, ангидрит) и (3) глины (включая аргиллиты).

Эти группы пород принципиально отличаются друг от друга по физико-механическим свойствам (прочные или пластичные) и/или по их поведению в воде (растворимые или нерастворимые) [2].

Каменная соль (галит) привлекла внимание своей водонепроницаемостью и практически полным отсутствием межзерновых рассолов [15, 79, 80].

Глины привлекательны для целей захоронения из-за низкой гидравлической проницаемости, высоких сорбционных свойств и способности залечивать трещины [15, 81–83].

Кристаллические породы (граниты, гнейсы, базальты, туфы, некоторые другие разновидности кристаллических пород) положительно оцениваются благодаря высокой механической прочности и хорошей теплопроводности, однако для захоронения могут использоваться только малотрещиноватые блоки таких пород, обладающие относительно низкой водопроницаемостью. Разновидности кристаллических пород сильно различаются по фильтрационным, сорбционным, теплофизическим свойствам, что требует большого количества исследований, прежде чем рекомендовать такую породу для размещения хранилища [15]. Считалось, что одной из проблем кристаллических пород в связи с захоронением РАО является проблема моделирования водного потока в сложной трещиноватой среде [25]. Эксперименты в ПИЛ Стрипа поставили под сомнение детерминированные эквивалентные модели потока подземных вод для пористых сред, поэтому были разработаны модели дискретной сети трещин, стохастического континуума, а в последнее время — модель разреженных каналов для подземного потока. Ключевой вывод из новых моделей: неопределенность, связанная с представлением водного потока в трещиноватых породах, оказывает малое влияние на риск в оценке долговременной безопасности. Значительно важнее роль породы, которая заключается в обеспечении стабильных механических и химических условий в системе захоронения [39].

Многие страны выбрали для геологической изоляции ВАО и ОЯТ кристаллические породы в зоне затрудненного водообмена. Геологические условия в России таковы, что именно эта среда присуща многим районам наработки и хранения отвержденных РАО, которые рассматривались как перспективные территории для размещения геологических хранилищ [84, 85]. Исследования по выбору участков для захоронения ВАО в кристаллических породах ведутся в районе ФЯО ФГУП «ГХК» (г. Железнодорожск, Красноярский край) уже более 20 лет, прежде также велись в Челябинской области в районе ФГУП «ПО «Маяк» (г. Озерск, Челябинская обл.), на территории Кольского полуострова и других районах (см. главу 3).

Размещение хранилища РАО в слаботрещиноватых кристаллических породах, залегающих в зоне затрудненного водообмена на территории со спокойной тектонической обстановкой, теоретически может обеспечить возможность надежной изоляции радионуклидов в геологической среде. Но эта возможность требует количественного обоснования для условий реальной площадки. В связи с этим при изучении площадки, выбранной для захоронения РАО в кристаллических породах, важно тщательное исследование и количественная оценка факторов трещиноватости, водообмена и тектонической стабильности, которые в наибольшей мере будут влиять на безопасность будущего объекта [9].

2.3. Краткая геологическая характеристика зарубежных участков проектируемых хранилищ РАО в древних кристаллических горных породах

2.3.1. Форсмарк, Швеция

Место Форсмарк было выбрано из двух альтернативных площадок: Форсмарк в муниципалитете Эстхаммар и Лаксемар в муниципалитете Оскарсхамн на основе результатов, полученных после нескольких лет исследований поверхности и условий на глубине (рис. 2.5, см. также подраздел 2.1.2). Итоги исследований были обобщены в междисциплинарной модели описания места в 2008 г. [51]. Модель объединяла геологию, механику горных пород, тепловые свойства пород, гидрогеологию, гидрогеохимию, миграционные свойства коренных пород и свойства поверхностной системы. Модель обеспечивала понимание условий места в рамках различных дисциплин, а также давала оценку неопределенности в этих свойствах. Информации было достаточно, чтобы в уже в 2009 г. разработать проект пункта захоронения, привязанный к реальным условиям площадки, а в 2011 г. завершить оценку долговременной безопасности для него [86].

Участок Форсмарк расположен в северной части графства Уппланд в пределах муниципалитета Эстхаммар примерно в 120 км к северу от Стокгольма (см. рис. 2.5). Потенциальный район для исследования объекта имеет приблизительно 6 км в длину и 2 км в ширину, расположен вдоль береговой линии залива Балтийского моря. Кристаллические породы фундамента в районе Форсмарк относятся к Фенноскандийскому щиту и сформировались 1,85–1,89 млрд лет назад во время Свекокарельской орогении. Тектонические линзы (блоки), в которых коренные породы были меньше подвержены пластической деформации, заключены между сильно деформированными зонами. Область-кандидат расположена в самой северо-западной части одной из этих «слабодеформированных» тектонических линз вблизи АЭС Форсмарк и хранилища низко- и среднеактивных отходов (точка «SFR» на рис. 2.6).

Новейшая тектоника территории определяется влиянием двух крупномасштабных деформационных процессов: глобальной тектоникой плит и ледниковой изостатической коррекцией земной коры вследствие отступления последнего Фенноскандийского ледяного щита.

Нынешний рельеф в районе Форсмарк является частью субкембрийского пенеплена юго-восточной Швеции. Этот пенеплен сегодня представляет собой низкую относительно ровную поверхность, полого понижающуюся к востоку и сформировавшуюся более 540 млн лет назад. Наиболее возвышенные участки, находящиеся к юго-западу от района-кандидата, расположены на высоте около 25 м над современным уровнем моря. Вся область и большая часть территории участка-кандидата появились из-под Балтийского моря в течение последних 2000 лет. Регрессия береговой линии со скоростью опускания уровня моря около 6 мм в год продолжается. Морское дно непрерывно трансформируется в новые наземные районы, пресноводные озера и водно-болотные угодья.

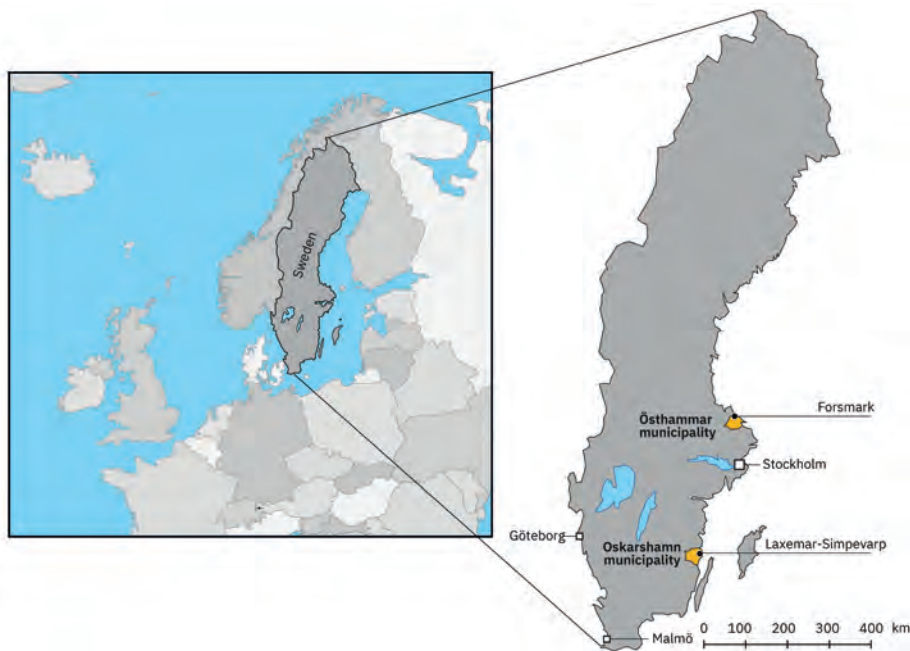


Рис. 2.5. Районы в Швеции, исследованные под окончательное хранилище ОЯТ (показаны желтым цветом). Место Форсмарк было в итоге признано предпочтительным вариантом [51, 86]

Северо-западная часть одной такой потенциально перспективной линзы была выбрана в качестве целевого района (площадки) для пункта захоронения (рис. 2.7). Изучение коренных пород в целевом районе и окрестностях было проведено как с поверхности, так и исследованиями в скважинах. Наземные исследования включали геологическое картирование, различные наземные и аэрогеофизические исследования, а также поверхностные экологические исследования и мониторинг. Скважинные данные, положенные в основу описания участка Форсмарк, получены из 25 скважин, пробуренных с керном на 12 буровых площадках (см. рис. 2.7). Эти скважины имеют глубину до 1000 м и общую длину около 17 800 м. Кроме того, 38 скважин пробурены ударным способом, и более 100 мелких картировочных скважин вскрывают только четвертичный покров.

Породы фундамента были затронуты как пластичными, так и хрупкими деформациями. Пластическая деформация привела к появлению протяженных сильно смятых поясов и более дискретных зон смятия. Тектонические линзы, в которых порода была менее подвержена пластической деформации, заключены между этими поясами (рис. 2.6).

Среди пород в тектонической линзе, в которой может быть расположено хранилище, преобладает среднезернистый метагранит с высоким (~20–50 %) содержанием кварца. Подчиненные породные типы — гранит пегматитовый, граниты мелкозернистые и среднезернистые, метагранитоиды и амфиболиты, а также другие мафические и промежуточные породы. Породы разделены на две группы, обозначаемые RFM029 и RFM045. Эти же две группы пород слагают целевой блок. Доминирующим типом породы в группе RFM029 является среднезернистый метагранит (74 % объема домена). В группе пород RFM045 преобладают аплитовидный метагранит и среднезернистый метагранит. (рис. 2.8). Эта группа пород слагает центр целевого блока и окружена группой RFM029 (рис. 2.9, а).

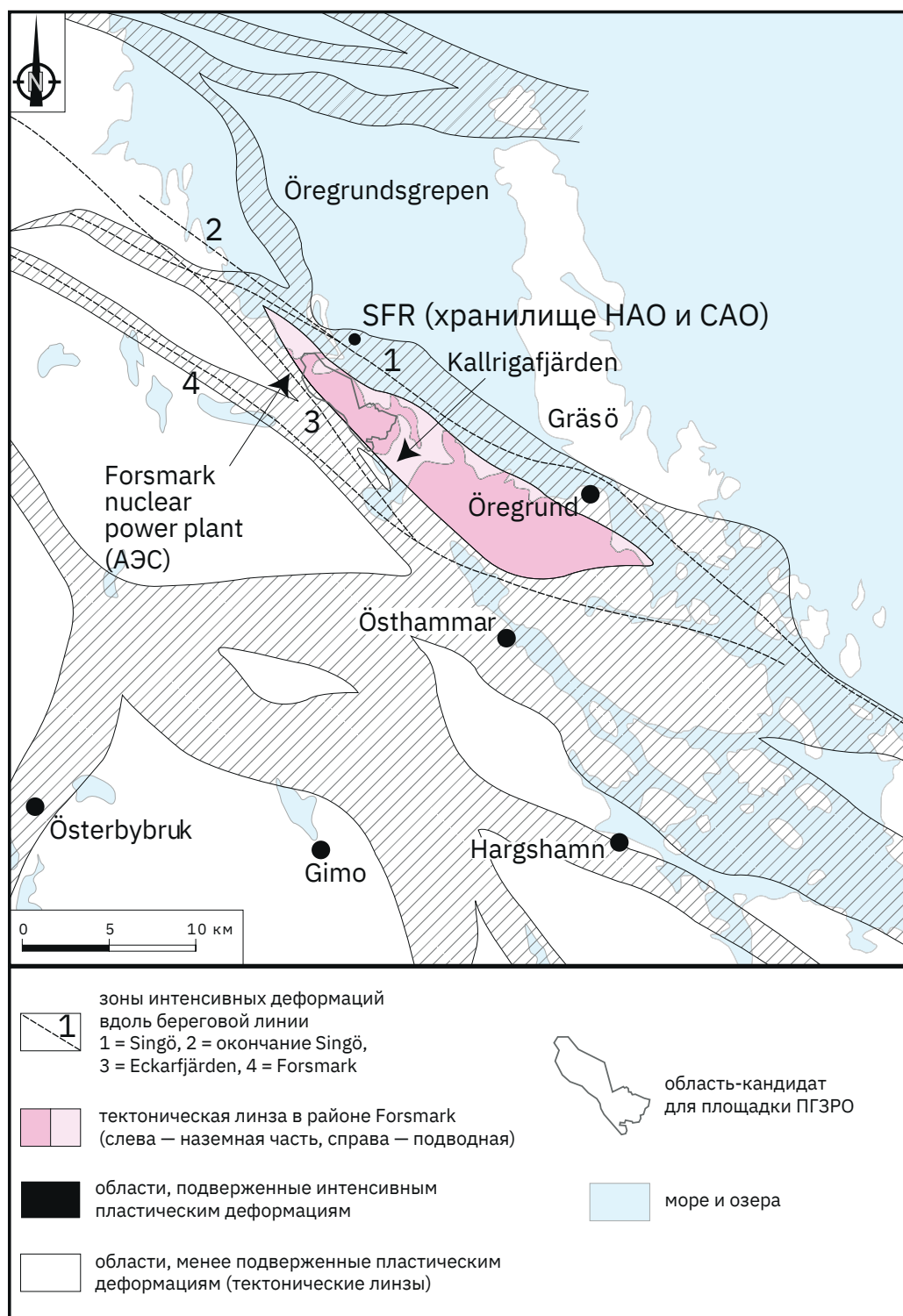


Рис. 2.6. Тектонически слабо деформированные линзы пород района Форсмарк и зоны, подверженные интенсивным пластическим деформациям [51, 86]

Достоверность как геометрии, так и свойств горных пород внутри и непосредственно вокруг целевого объема высока вплоть до глубины 1000 м. Неопределенности сохраняются в отношении характера и геометрии пород вне целевого объема, например, в районе моря.

На участке Форсмарк с высокой степенью достоверности были идентифицированы четыре группы зон деформаций (рис. 2.10). Вертикальные и крутые зоны ЮЗ падения ЗСЗ и СЗ простираения объединяют пластичные и хрупкие деформации. Региональные зоны протяженностью более 10 км, находящиеся за пределами области-кандидата, ограничивают эту группу. Зоны остальных трех групп образованы только хрупкими деформациями и могут быть названы зонами трещиноватости. Вертикальные и крутопадающие зоны разломов ВСВ (СВ) и ССВ простираения пересекают тектоническую линзу и часто встречаются внутри целевого блока. В этих зонах присутствуют только залеченные трещины. Зоны трещин пологого падения чаще встречаются вне целевого блока. Для них характерна повышенная частота открытых трещин. Четвертая группа состоит из вертикальных и крутопадающих зон трещин ССЗ падения, в которых снова доминируют залеченные трещины. Они имеют подчиненное распространение по сравнению с тремя другими группами.

Локальная структурная модель, охватывающая целевой блок, включает в себя 60 зон деформаций, и большинство из этих зон (> 60 %) оценивается как имеющие высокую степень достоверности существования. Только две зоны крутого падения с длиной поверхностного следа более 3000 м пересекают целевой блок, и еще двадцать две крутопадающих зоны, которые показывают след на поверхности земли протяженностью 1000–3000 м, обнаружены на глубине 400–600 м внутри объема будущего хранилища. Пять пологих зон также присутствуют на глубине 400–600 м внутри или непосредственно над объемом хранилища. Основная оставшаяся неопределенность в детерминированной модели зон деформаций касается размера зон трещиноватости с пологим падением.

Анализ данных по трещиноватости показал большую степень пространственной изменчивости размеров, интенсивности и свойств трещин. На основе систематической оценки изменения частоты трещиноватости с глубиной вдоль каждой скважины коренная порода между зонами деформаций была разделена на группы по интенсивности трещиноватости. Таким образом, группы по интенсивности трещиноватости и зоны деформации являются взаимоисключающими объемами, в то время как группы горных пород (RFM029 и RFM045) содержат и те и другие.

Детальные исследования минералогии трещин и изменений прилегающих пород показали, что наиболее распространенными минералами являются кальцит и хлорит. Другими распространенными минералами являются лаumontит, адуляр, кварц, альбит и гематит, тогда как пренит, пирит, глинистые минералы и эпидот встречаются реже. Наблюдаются также редкие проявления асфальтита и гетита. На стенках некоторых трещин встречены богатые ураном минеральные фазы, но их природа неизвестна. Трещины без минерального выполнения наблюдались в приповерхностной области, но также присутствуют на больших глубинах.

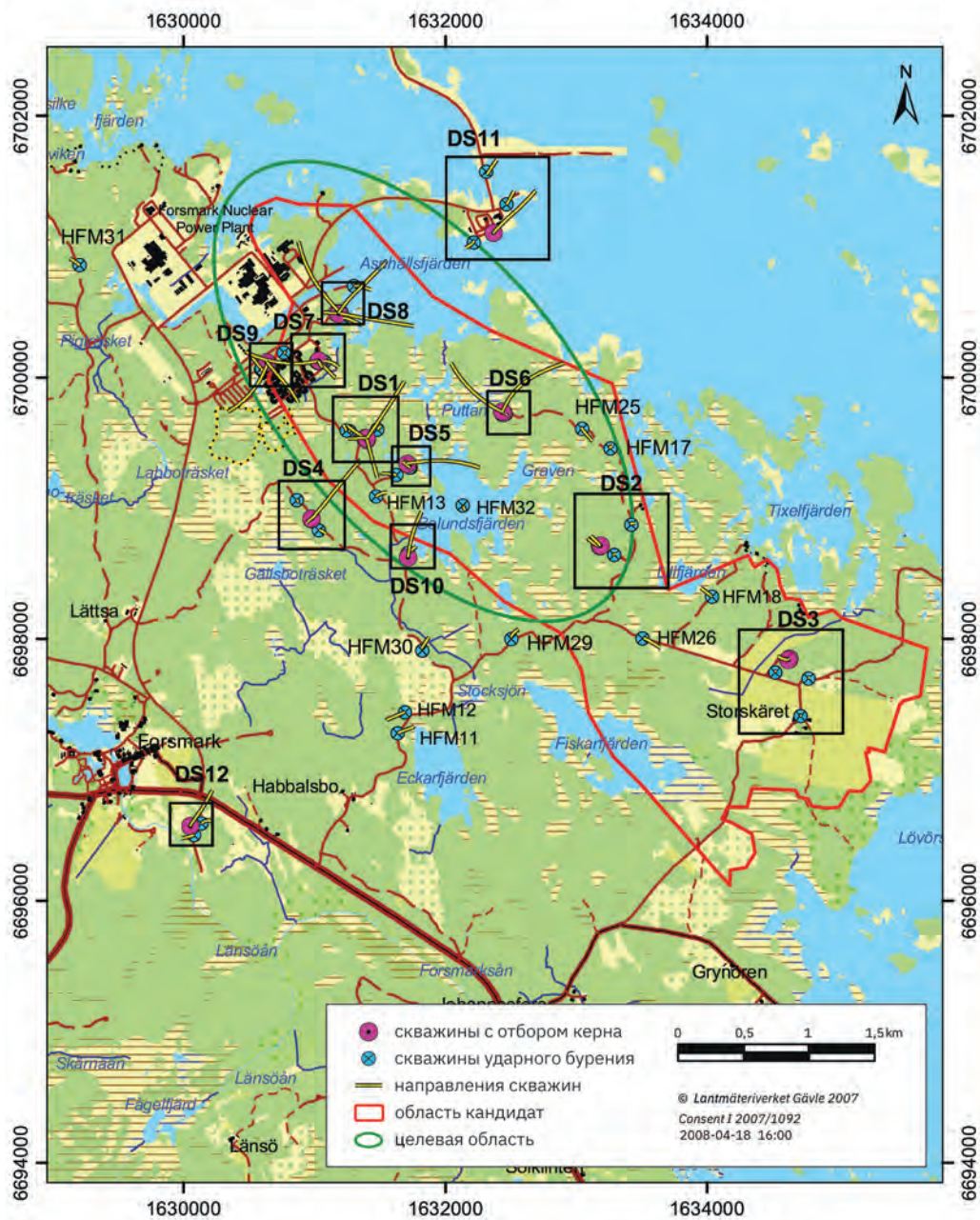
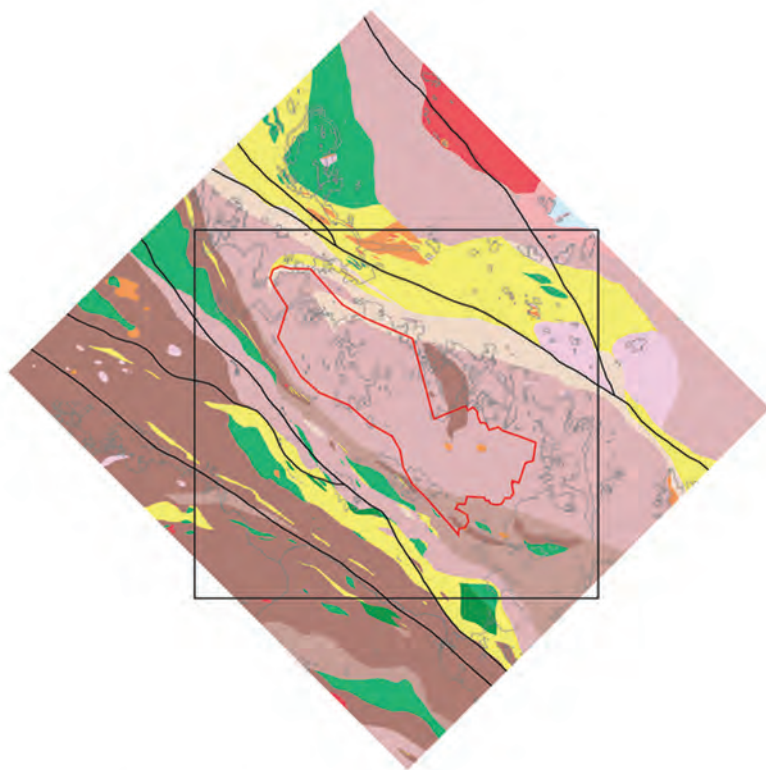


Рис. 2.7. Позиция буровых скважин в районе Форсмарк [51, 86]



Доминирующий тип пород

Группа D		граниты от мелко- до среднезернистых
		пегматиты, гранитные пегматиты
Группа C		граниты, гранодиориты и тоналиты, метаморфические, от мелко- до среднезернистых
		граниты, метаморфические, аплиты
Группа B		от гранитов до гранодиоритов, метаморфические, с прожилками до мигматических среднезернистых
		от гранитов, до гранодиоритов, метаморфические, среднезернистые
		гранодиориты, метаморфические
		от тоналитов до гранодиоритов, метаморфические
		диориты, кварцевые диориты и габбаро, метаморфические
		ультраосновные, метаморфические
Группа A		магнетитовая минерализация из-за наличия известково-силикатных пород (скарнов)
		вулканические, от кислых до средних, метаморфические

Другие обозначения

	береговая линия		область-кандидат
---	-----------------	--	------------------

Рис. 2.8. Геологическая карта фундамента участка Форсмарк [51]

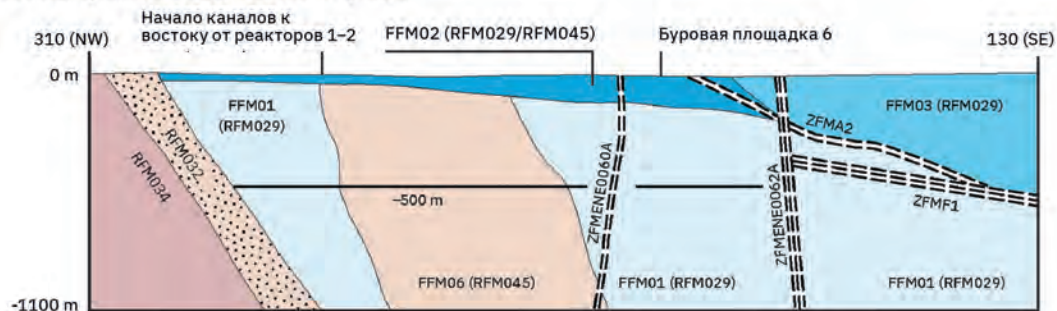
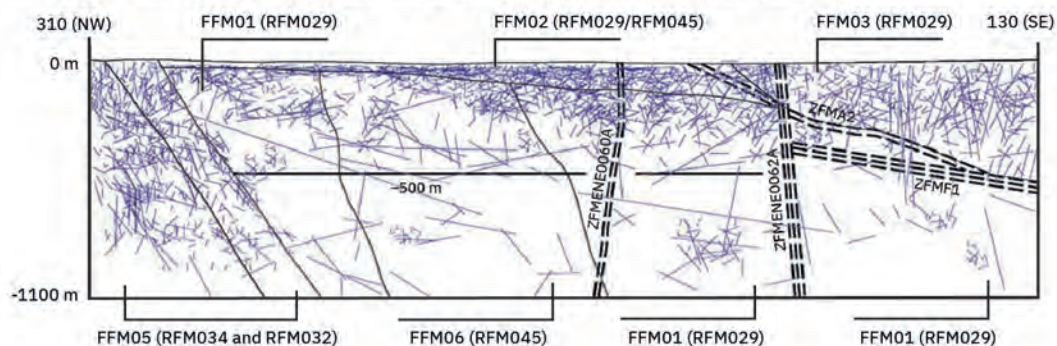
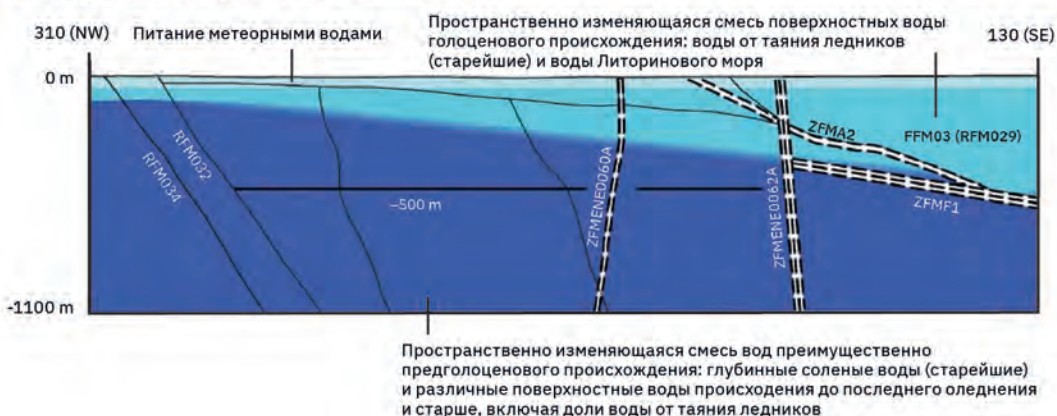
Концептуальная модель системы трещин**Концептуальная гидрогеологическая DFN-модель (соединенные открытые трещины)****Концептуальное распределение подземных вод**

Рис. 2.9. Три концептуальные модели, используемые для оценки надежности подземного хранилища ОЯТ на участке Форсмарк [51]

На всех трех изображениях показан профиль СЗ–ЮВ. Аббревиатуры на всех разрезах с началом ZFM относятся к зонам деформации горных пород, FFM относятся к трещинным группам и RFM – к породным группам

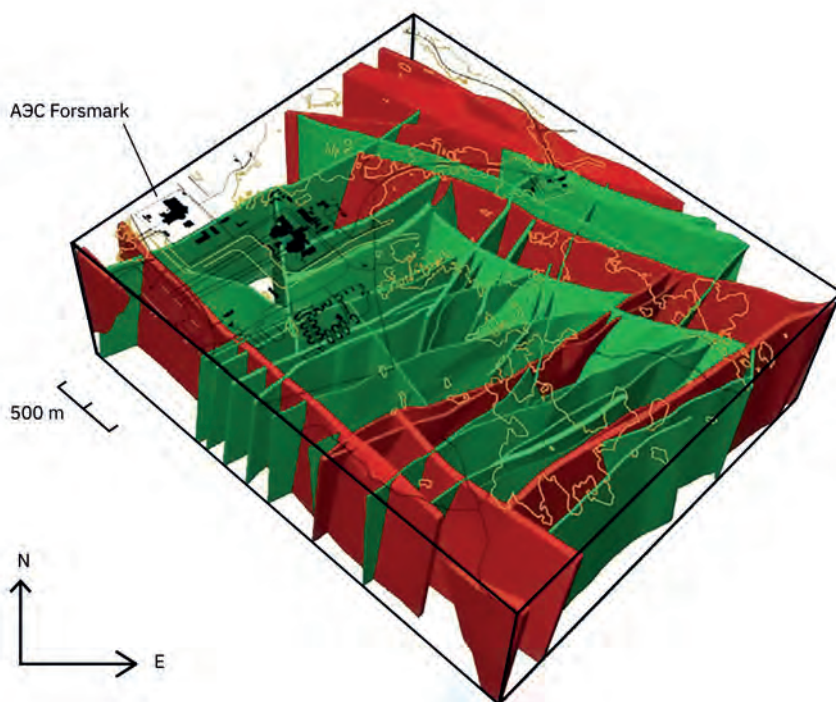


Рис. 2.10. Трехмерная модель, которая показывает все вертикальные и крутопадающие зоны в объеме локальной области [51, 86]

Зоны, показанные красным цветом, имеют длину следа на поверхности более 3000 м, зеленым — менее 3000 м

Пологопадающие зоны чаще встречаются в юго-восточной части области-кандидата и имеют более высокую гидравлическую проницаемость, чем у вертикальных и крутых зон деформации на площадке. Глубже приблизительно 300 м частота проявления открытых и частично открытых трещин очень мала по сравнению с тем, что наблюдается в верхней части коренных пород в северо-западной части области-кандидата, которая является целевым блоком для хранилища. Верхний интервал (от 100 до 150 м) коренной породы, перекрывающий целевой блок, содержит много высокопроницаемых трещин, создающих в горизонтальном плане хорошую гидравлическую связь на большие расстояния, тогда как на глубине породы имеет очень низкую проницаемость с небольшим количеством проницаемых трещин. На глубине хранилища (ок. 470 м) среднее расстояние между проницаемыми трещинами более 100 м (рис. 2.9, б).

Несколько типов воды, которые в настоящее время присутствуют в коренной породе, могут быть связаны с прошлыми климатическими событиями в плейстоцене (последние ок. 2 млн лет), включая межледниковья, оледенения, дегляциацию и связанные с ними изменения уровня моря в связи с трансгрессиями и регрессиями. Среди них последнее оледенение и последниковый период (голоцен, начавшийся 10 000 лет назад) являются наиболее важными для развития подземных вод в Фенноскандийском щите, особенно с точки зрения поднятия суши и смещения береговой линии, а также развития Балтийского моря.

Подземные воды в верхних 100–200 м фундамента имеют высокую вариабельность химического состава с концентрацией хлоридов в диапазоне от 200 до 5000 мг/л, что предполагает влияние как солоноватой морской воды, так и метеорных вод. На глубинах от 200 до 800 м соленость сохраняется достаточно постоянной (5000–6000 мг/л), а состав воды указывает на ее остаточный характер от Литоринового моря, которое покрывало территорию в период от 9500 и 5000 лет назад. На глубинах от 800 до 1000 м соленость увеличивается до более высоких значений (рис. 2.9, в).

Анализ газа, растворенного в подземных водах участка Форсмарк, показал, что его содержание увеличивается с глубиной. Основными компонентами газа являются азот и гелий. Метан был обнаружен в небольших количествах (менее 0,2 мл/л). В настоящее время неизвестно, имеет ли метан биогенное или абиогенное происхождение.

Количество коллоидов в подземных водах Форсмарка сопоставимо с количеством коллоидов в других гранитных средах. Коллоиды состоят в основном из соединений железа и серы. Уран, связанный с коллоидами, был обнаружен в скважинах KFM02A и KFM06A, в которых высокие концентрации урана установлены в подземных водах.

Потенциал площадки Форсмарк в отношении залежей металлических и промышленных полезных ископаемых получил отрицательную оценку.

Таким образом, основными особенностями места Форсмарк, связанными с безопасностью, являются (см. рис. 2.9) следующие факторы.

- Низкая частота водопродводящих трещин на уровне хранилища. В хранилище на глубине ~470 м среднее расстояние между субвертикальными проницаемыми трещинами составляет более 100 м. Вместе со слаборасчлененным низинным рельефом местности это обуславливает чрезвычайно низкий поток подземных вод на глубине хранилища в современных климатических условиях.
- Благоприятные химические условия, в частности, восстановительная среда на уровне хранилища и соленость, которые могут обеспечить стабильность бентонитового буфера.
- Отсутствие потенциала для обнаружения залежей металлических и промышленных полезных ископаемых в пределах рассматриваемой территории, что снижает риск будущего вторжения человека.

Кроме того, относительно высокая теплопроводность пород способствует эффективному использованию объема породы и благоприятную механику горных пород. Породы фундамента также обладают другими благоприятными свойствами, имеющими важное значение для безопасного и эффективного строительства хранилища. Механика горных пород и другие важные свойства также благоприятны для безопасного и эффективного строительства хранилища. Скальная масса жесткая и прочная с модулем деформации приблизительно 70 ГПа, одноосная прочность на сжатие приблизительно 90 МПа. Однако напряжения в горных породах в Форсмарке относительно высоки по сравнению с типичными значениями для пород фундамента на территории Швеции. Максимальное основное напряжение на уровне хранилища оценивается приблизительно в 41 МПа.

2.3.2. Олкилуото, Финляндия

Остров Олкилуото (площадь около 10 км²), выбранный в качестве места для хранилища ОЯТ, расположен на побережье Балтийского моря в юго-западной части Финляндии (рис. 2.11) [87, 88]. На противоположном берегу моря находится шведский участок Форсмарк.

Кристаллический фундамент Финляндии является частью докембрийского Фенноскандинавского щита, который на юго-западе Финляндии состоит в основном из метаморфических пород раннего палеопротерозоя и магматических пород, принадлежащих к Свекофеннской области. Эта область сформировалась между 1930 и 1800 млн лет назад. Свекофеннский ороген традиционно характеризуется как последовательная аккреция нескольких вулканических дуговых комплексов к Карельскому кратону. Породы фундамента острова Олкилуото можно разделить на два основных класса. Первый — кристаллические метаморфические породы, в том числе различные мигматитовые гнейсы: тоналит-гранодиоритово-гранитные, слюдяные, кварцевые и мафические. Второй — магматические породы, в том числе пегматитовые граниты и диабазовые дайки. Интрузии рапакиви внедрялись спустя 150 млн лет (возраст 1583 Мл) в среднем протерозое, оливиновые диабазовые дайки и силлы — еще позже (ок. 1270–1250 Мл). Самыми важными породообразующими минералами в породах фундамента являются кварц, калиевый полевошпат, плагиоклаз, биотит и другие слюды, роговая обманка и другие амфиболы. Метаморфические породы были подвергнуты многофазной пластической деформации, выражающейся в сложной складчатости. Фундамент в целом нарушен разломами — зонами хрупкой деформации (рис. 2.12) [89].

К моменту начала строительства ПИЛ Онкало (2004 г.) имелось 33 глубоких скважины (KR1–KR33 на рис. 2.13). За исключением скважин KR10 и KR24, все они наклонные. Длина скважин варьирует от 125 до 1050 м. Скважины KR1–KR12 были пробурены с использованием двойной колонковой трубы, тогда как более поздние скважины (KR13–KR33) были пробурены с использованием тройной трубы, что привело к заметному улучшению качества керна и его извлечения. Это особенно важно в отношении изучения внутренней структуры разломов и нарушенных зон [88].

В качестве подготовки к строительству ПИЛ Онкало была пробурена пилотная скважина PH1 (160 м) по центральной линии въездного туннеля. Кроме того, 7 неглубоких скважин (PP40–PP41, PR5–PR9) были пробурены на глубину от 15,2 до 45,80 м непосредственно над въездным туннелем. Несколько разведочных траншей (TK1, TK5, TK6, TK7 и южная часть TK4 общей длиной 2500 м) были выкопаны над въездным туннелем и обеспечили информацию о трещиноватости и литологии поверхности фундамента в области первых 150 метров туннеля.

В районе Олкилуото с воздуха, а также на поверхности и в скважинах было проведено несколько геофизических исследований. Первоначально геофизические исследования были сосредоточены в основном на изучении непосредственного окружения скважин, но затем больше внимания уделялось созданию трехмерной геологической модели территории участка методом когезионного (связанного) моделирования с учетом различных геофизических данных [88]. Породный стресс *in situ* был измерен в Олкилуото на глубинах 300–800 м в пяти скважинах.



Рис. 2.11. Остров Олкилуото [88]

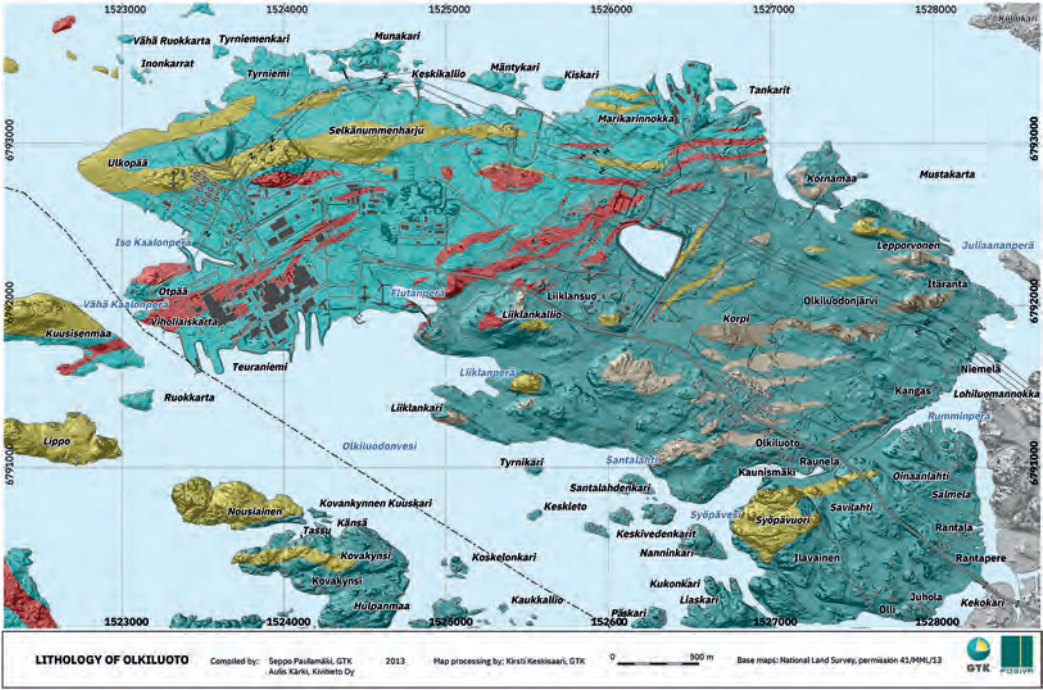


Рис. 2.12. Литологическая карта острова Олкилуото [89]

Современные знания о напряженном состоянии *in situ* при Olkiluoto говорят следующее.

- Ориентации напряжений в среднем достаточно хорошо согласуются с региональными данными о стрессе. Остров расположен вдали от активных границ плит. В Фенноскандии ориентация основного напряжения приписывается широтному давлению от Срединно-Атлантического хребта и меридиональному сжатию от Альпийской окраины, что приводит приблизительно к СЗ-ЮВ ориентации основного стресса. Местные данные поддерживают представления о режиме напряжения, вызывающего образование разрывов в Олкилуото, то есть $\sigma_h > \sigma_v$.
- Максимальное горизонтальное напряжение имеет градиент в среднем 0,047 МПа/м, в результате чего на целевой глубине 500 м величина напряжения примерно 24 МПа. Вертикальное и минимальное горизонтальное напряжения одинаковы по величине, величина около 12 МПа на глубине 500 м.
- Основное напряжение (σ_1) ориентировано субгоризонтально. Две других главных компоненты напряжений значительно различаются по величине и ориентации для различных мест измерений.

До конца ноября 2004 г. наблюдений сейсмической активности зарегистрировано не было. Результат был ожидаемым, потому что контролируемая территория довольно мала и расположена в районе с низкой тектонической активностью.

Измерения GPS проводились с 1995 г., и результаты на 2004 г. показывали, что измеренные изменения расстояний невелики. Анализ 16 серий измерений GPS показывает, что есть только две базовые линии, в которых скорость изменения расстояний превышает 0,3 мм/год.

Проведенные геологические исследования участка Олкилуото до 2003 г. были представлены в многочисленных версиях модели фундамента (см., например, рис. 2.14 и 2.15). Во время этих исследований практически все обнажения на острове (около 4 % территории) были нанесены на карту. Картирование было дополнено результатами бурения [88].

Зоны разлома в Олкилуото — это в основном разломы свекофеннского орогенеза, с простиранием Ю-С, реактивированные в несколько фаз деформаций. Также распространены СВ-ЮЗ нарушения. Проявления трещиноватости наблюдаются в следующих трех системах.

- Трещины с востока на запад с в основном субвертикальным падением к северу или югу.
- Трещины с севера на юг обычно с субвертикальным падением к востоку или на запад.
- Трещины от умеренно наклонных до полого падающих с простираением, которое обычно субпараллельно совокупной сланцеватости пород в области конкретного нарушения [87].

Основные характеристики и химические тренды подземных вод были зафиксированы до нарушения подземной гидросферы, вызванного строительством ПИЛ Онкало. Измерение гидравлического напора на глубине проводилось с помощью мультипакерной системы [88].

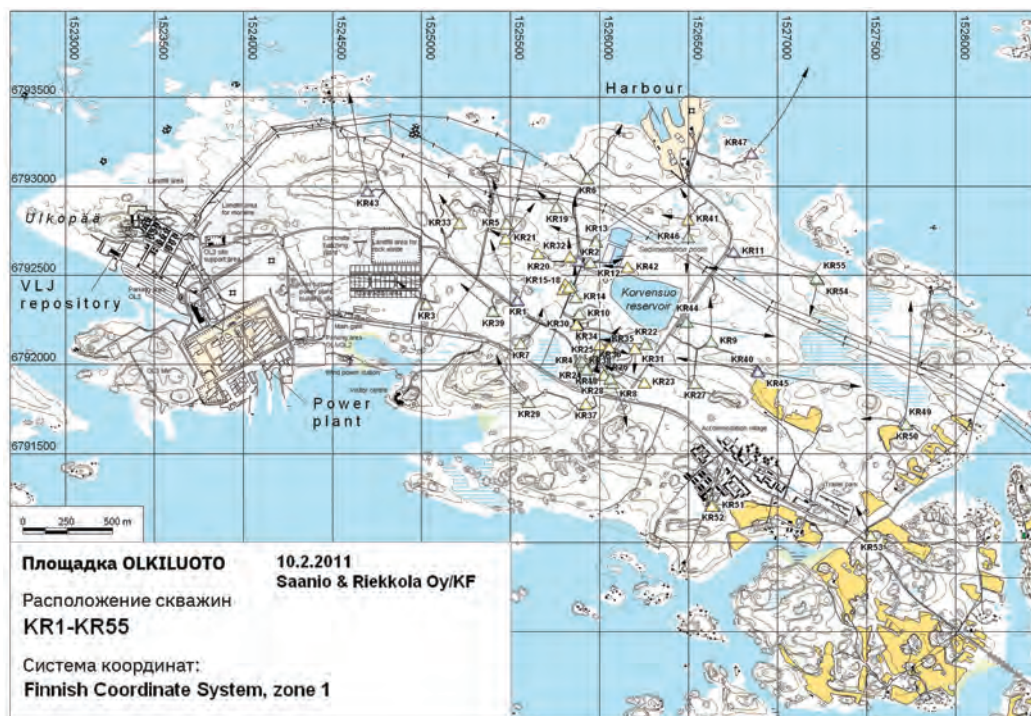


Рис. 2.13. Скважины, пробуренные в центральной зоне исследований на о. Олкилуото [88]
Многие из скважин были ориентированы на пересечение конкретных трещинных зон.
Сетка через 500 м

В кристаллическом фундаменте Олкилуото поток подземных вод проходит по гидравлически активным зонам деформации и трещинам. Гидрогеологические зоны, отвечающие зонам хрупкой деформации, несут большую часть потока воды в глубокой части фундамента. Существует общее снижение проницаемости трещин с глубиной. В естественных условиях поток подземных вод в Олкилуото определяется проникновением пресной воды и зависит от рельефа, хотя поток, обусловленный изменением солёности (плотности), также имеет место, но в меньшей степени. Поровая вода в матрице горной породе застойная, но изменяет свой состав благодаря диффузии с текучими подземными водами в трещинах [87] (рис. 2.16).

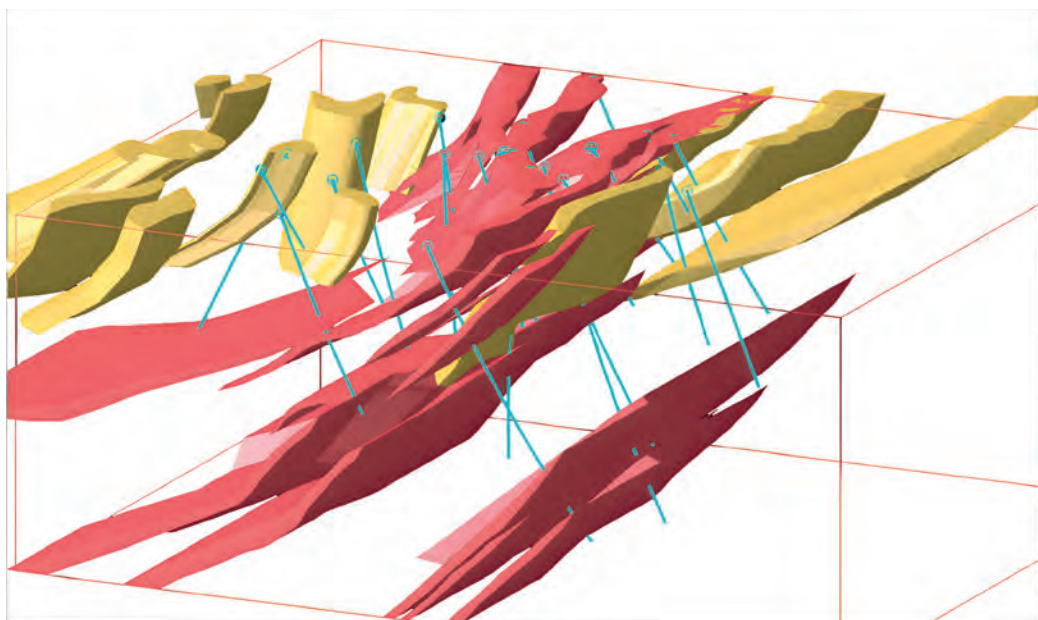


Рис. 2.14. Распределение серых гнейсов (желтое) и пегматитовых разностей (красноватое) в исследовательском блоке Олкилуото. Черная зона состоит из разных мигматитовых пород. Голубые линии — скважины. Вид к юго-западу [88]

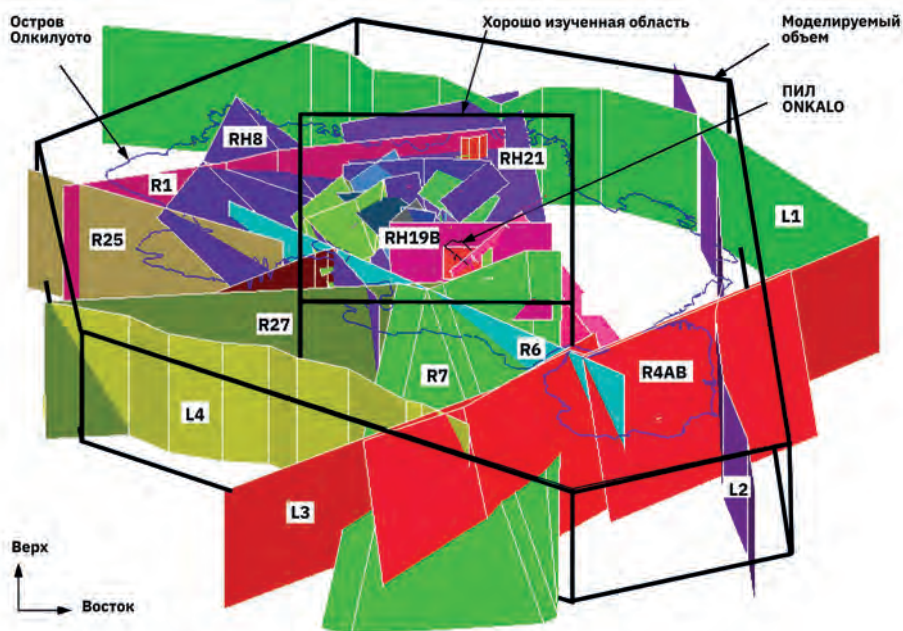


Рис. 2.15. Моделируемый объем породы и концептуальная геометрия зон разломов на основе модели фундамента версии 2003/1 [88]

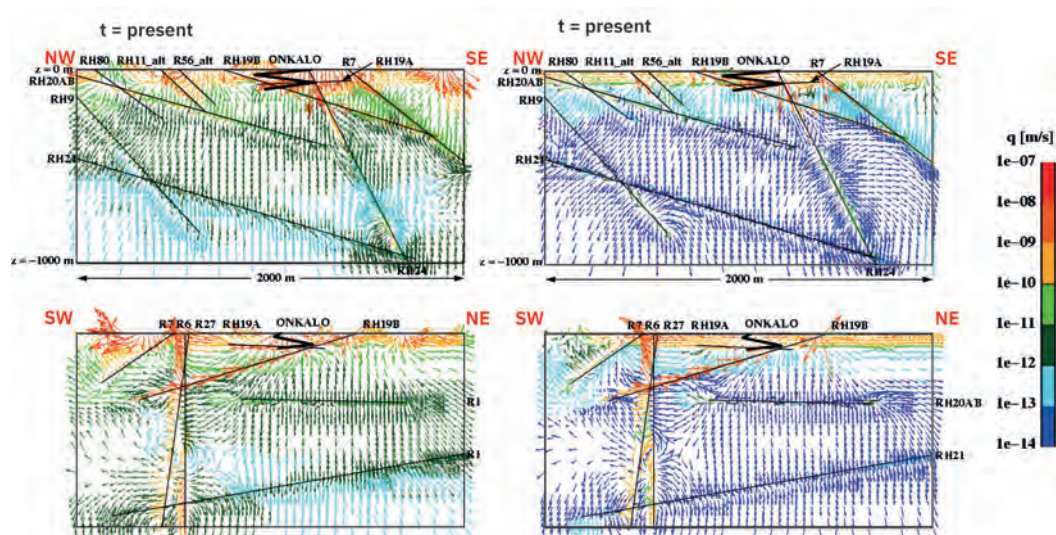


Рис. 2.16. Современное поле скоростей Дарси вдоль вертикальных сечений для двух разных случаев калибровки модели потока [87]

Сложность и различие составов трещинных подземных вод и матричных поровых вод отражает историю области Олкилуото и последствия периодов оледенения и связанных с ними проникновений пресных талых вод, погружений ниже уровня моря, влияние морских вод и медленное взаимодействие между подземными, поровыми водами и минералами пород за миллионы лет. В настоящее время состав подземных вод по глубине в диапазоне 0–1000 м в Олкилуото характеризуется значительным диапазоном солёности, и подземные воды образуют относительно многослойную систему. Пресные воды (минерализация <1 г/л) богаты растворённым карбонатом и находятся на малых глубинах в первые десятки метров. Соленоватые подземные воды с солёностью до 10 г/л доминируют на глубинах от 30 до 400 м. Соленовато-сульфатные воды распространены на глубине 100–300 м, а соленоватые воды с низким содержанием сульфата доминируют на глубинах 300–400 м. Соленые подземные воды (>10 г/л) доминируют на еще больших глубинах. На глубине хранилища начальная солёность будет в среднем около 12 г/л [87].

Окислительно-восстановительные условия в Олкилуото являются бескислородными, за исключением инфильтрирующейся грунтовой воды в нескольких местах. Редкие наблюдения гидроксидов железа на поверхности нарушений на глубине более десяти метров в коренной породе и отсутствие корродируемых пиритов поддерживают предположение о длительности восстановительных условий в глубоких горизонтах подземных вод (рис. 2.17) [87].

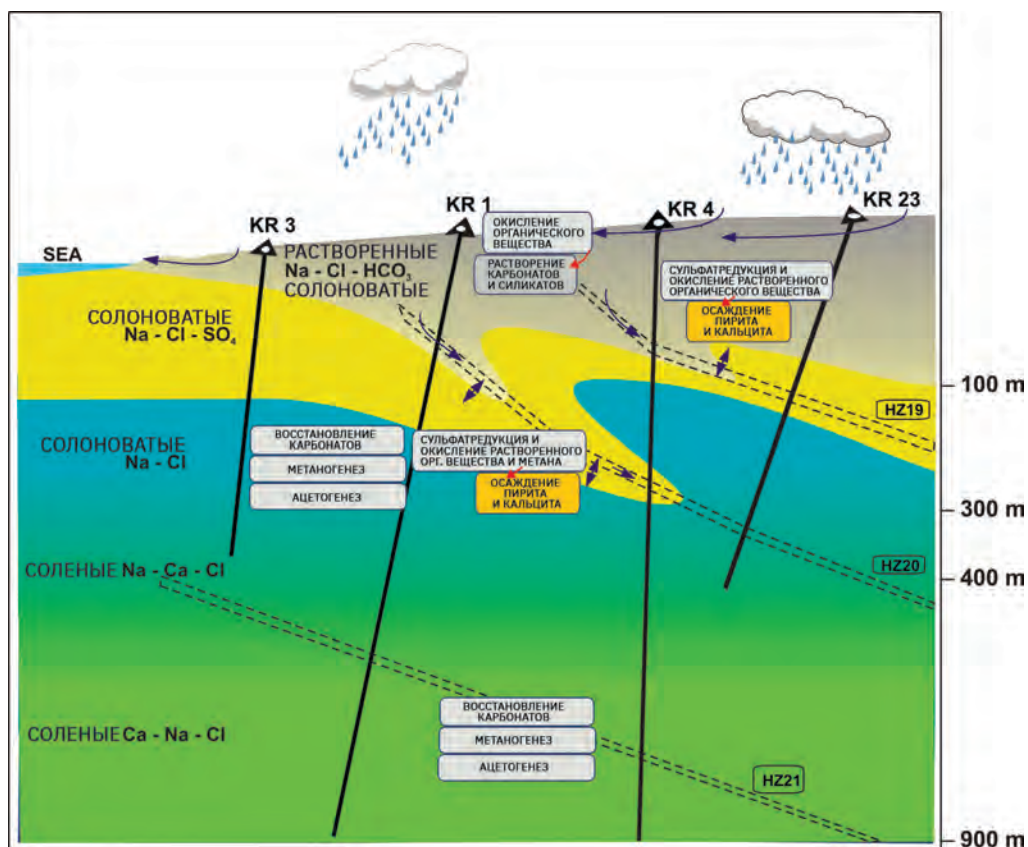


Рис. 2.17. Иллюстративная гидрогеохимическая модель участка Олкилуото в системе водопроводящих трещин (но не в матрице горных пород) [87]
Изменения в цвете указывают на изменения водного типа. Тонкие стрелки представляют направления потока. Скругленные прямоугольники — основные источники и поглотители, влияющие на pH и окислительно-восстановительные условия

Таким образом, геологические особенности острова Олкилуото показывают благоприятные условия для реализации проекта захоронения:

- породы потенциально пригодны для строительства хранилища;
- низкая частота водопроводящих трещин на уровне хранилища;
- восстановительная гидрогеохимическая среда на уровне хранилища;
- отсутствие потенциала для обнаружения залежей полезных ископаемых в пределах рассматриваемой территории.

2.3.3. Синьчан, Китай

Участок Синьчан (Xinchang) расположен в центре площади Бэйшань на расстоянии около 135 км от города Цзяюйгуань (Jiauyuguan). Рельеф участка весьма возвышенный (от 1670 до 1730 м н. у. м.) и характеризуется небольшими пологими холмами с перепадами высот менее 30 м, что обеспечивает благоприятные условия для строительства наземных объектов [37].

Большая часть участка Синьчан расположена в пределах Синьчанской гранитной интрузии (рис. 2.18). Гранитная интрузия Синьчан занимает площадь 22×7 км, имея возраст от 235 до 296 млн лет.

С целью предоставить необходимые данные для проектирования ПИЛ было выполнено исследование типов пород, геологических структур (т. е. разломов и систем трещин), гидрогеологических, геохимических и инженерно-геологических условий участка Синьчан и разработана трехмерная геологическая модель (рис. 2.19). В общей сложности были пробурены одна 1000-метровая глубинная скважина, четырнадцать скважин глубиной 600 м (три вертикальных и одиннадцать наклонных) и восемнадцать наклонных скважин глубиной 100 м. Распределение этих скважин показано на рис. 2.20.

Хорошая обнаженность коренных пород в этом районе позволила создать детальную геологическую карту пород и разломов. Поверхностное геологическое картирование и бурение скважин выявили основные типы горных пород на участке. Ими являются биотитовый монцонитовый гранит и биотитовый гранодиорит.

Основные минералы из гранита и гранодиорита – калиевый полевой шпат, кварц и плагиоклаз, с меньшими пропорциями биотита и роговой обманки. В трещинах найдены кальцит, кварц, хлорит и глинистые минералы.

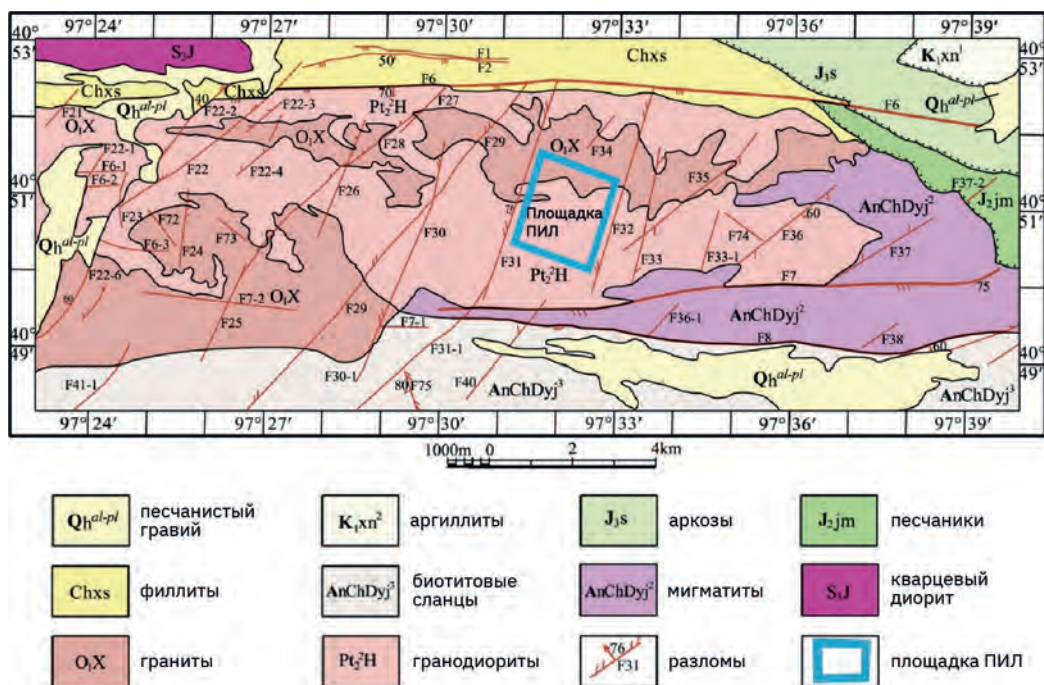


Рис. 2.18. Геологическая карта района с участком Синьчан [37]

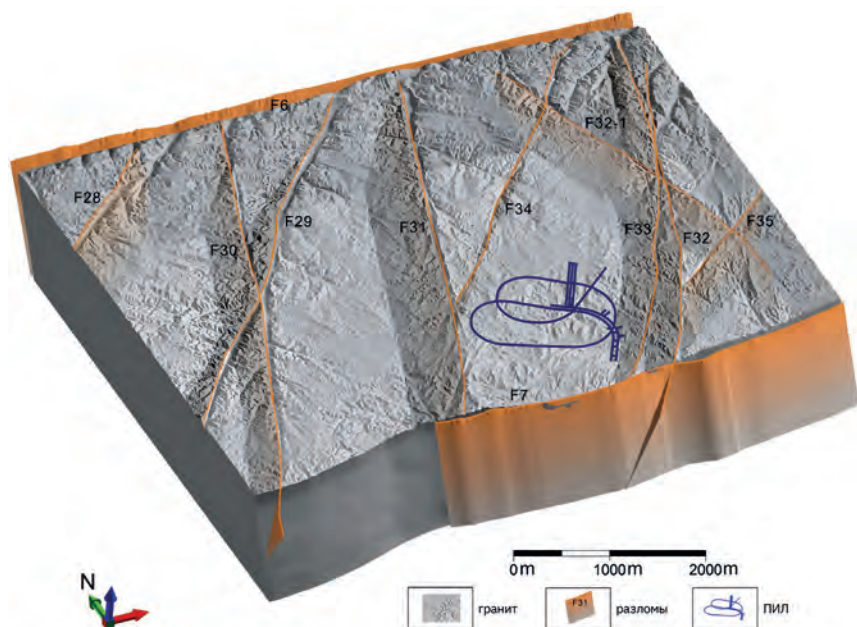


Рис. 2.19. 3D-модель участка Синьчан с положением будущей ПИЛ [37]

Породы слабо нарушены и имеют низкую плотность трещин. Главные разломы расположены западнее и восточнее площадки (см. рис. 2.18). Длина этих разломов колеблется между 3 и 6 км, в то время как мощность шва разломов составляет от 0,8 до 2 м (см. рис. 2.20).

Статистические результаты свидетельствуют о том, что трещины в четырех скважинах имеют преимущественное северо-восточное простирание (т. е. параллельно ограничивающим разломам).

Статистический анализ значений показателя качества пород RQD (Rock Quality Designation) [90] показал очень хорошую целостность пород. Значения RQD 75–90 % (означающие хорошее качество пород) и больше, чем 90 % (показывающие превосходное качество), составляют соответственно 7,2 и 86,2 % от общего объема керна скважин (рис. 2.21).

Измеренные *in situ* напряжения на глубине (менее 20 МПа) показали преобладание горизонтальных давлений над вертикальными от нагрузки перекрывающей толщи.

В результате гидрогеологических исследований установлено, что уровни подземных вод в неглубоких скважинах, как правило, выше, чем в глубоких скважинах. Тестовые испытания межпакерных интервалов длиной 12 м предоставили данные о гидравлической проводимости пород вдоль стволов скважин. Она оказалась низкой, в основном менее 10^{-8} м/с (90–98 % интервалов), главным образом между 10^{-12} и 10^{-10} м/с. Это ниже, чем на площадках Швеции и Финляндии.

Редокс-состояние подземных вод показывает низкие значения на глубинах 520–600 м.

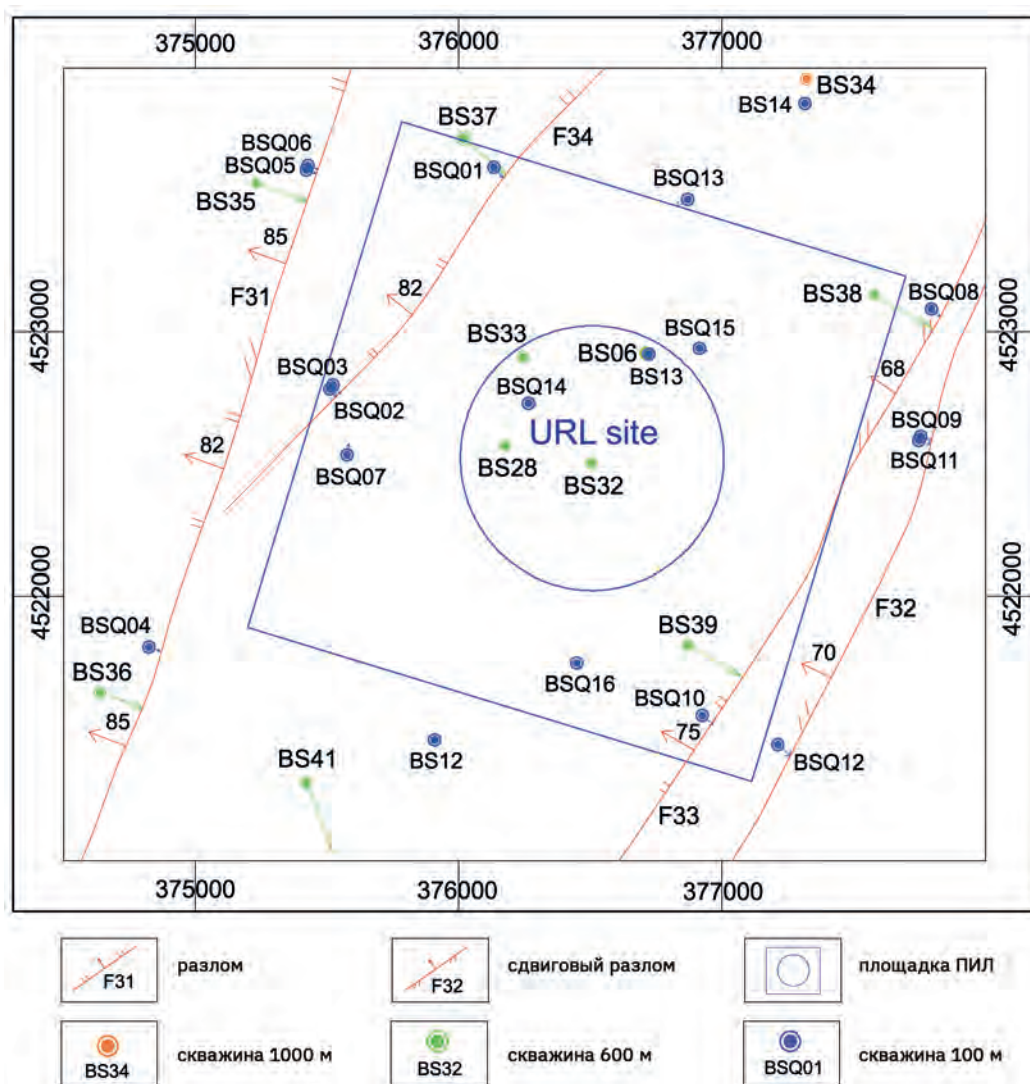
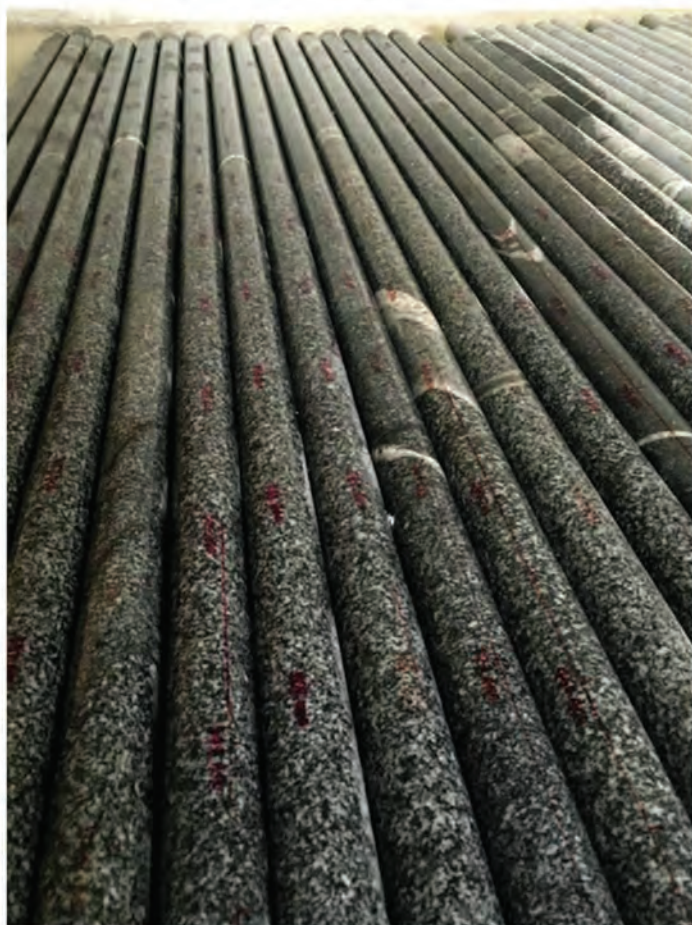


Рис. 2.20. Скважины на площадке ПИЛ Синьчан [37]

Таким образом, достоинства геологической среды, касающиеся безопасности будущих ПИЛ и пунктов захоронения РАО, следующие.

- Породный массив на участке отличается слабой тектонической нарушенностью, что обеспечит отличные условия для строительства ПИЛ.
- Горные массы имеют чрезвычайно низкую проницаемость, которая обеспечит благоприятные условия для строительства ПИЛ и изоляции ВАО.
- Полученные *in situ* значения напряженного состояния пород показывают благоприятные условия для устойчивости сооружения.
- Геохимические условия на глубине благоприятны для размещения ВАО [37].

а



б

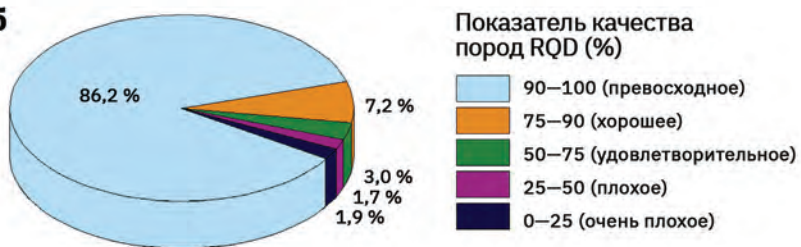


Рис. 2.21. Анализ качества пород на площадке Синьчан [37]
 а — классификация породной массы по показателю RQD для 4-х вертикальных скважин;
 б — керн диаметром 63 мм из скважины BS32

Заключение

1. Развитие подходов к выбору места размещения объектов глубинного захоронения ВАО и ОЯТ шло по пути расширения числа рассматриваемых факторов и переоценки их значимости от приоритета инженерно-геологических условий и экономической целесообразности к необходимости главенства радиологической безопасности объекта и управленческой подготовки общественного согласия для принятия решения.
2. Разработаны различные процедуры выбора места. Наиболее широко используется методология последовательного отбора с сокращением исходной территории до окончательно рекомендуемой площадки. Реализация программ выбора места в странах мира показала, что безопасность будущих объектов захоронения может быть обеспечена в широком диапазоне природных геологических условий, при этом осуществление выбора наилучшего в геологическом отношении участка среди потенциально пригодных на заключительных стадиях процесса выбора сталкивается с неопределенностями в доступной информации, что вынуждает отдавать предпочтение экономическим факторам и одновременно позволяет учитывать общественное мнение. Рекомендуемое для размещения объектов захоронения место — всегда компромисс, и хотя его геологическая среда должна удовлетворять определенным требованиям, она вовсе не обязана быть наилучшей из возможных на оцениваемой территории. Геологическая среда любого участка будет считаться *потенциально* пригодной до тех пор, пока не будет доказана безопасность (или, наоборот, опасность) всего объекта захоронения, включающего и инженерные барьеры, и геологическую среду.
3. Потенциальную пригодность геологической среды можно подтвердить или опровергнуть исследованиями в специальной ПИЛ, сооружаемой в перспективном месте. Пример первого исхода — ПИЛ Онкало в Финляндии, второго исхода — ПИЛ Аспё в Швеции. ПИЛ в Китае, сооружение которой намечено на участке Синьчан, предстоит показать правильность сделанного выбора.
4. Геологические условия мест, приуроченных к древним кристаллическим породам и изученных в настоящее время за рубежом (примеры Швеции, Финляндии и Китая), заметно отличаются между собой по составу и возрасту пород, пространенности и характеру тектонических нарушений, гидрогеохимическим условиям и другим факторам.
5. Размер будущего объекта захоронения много меньше объема пород, который изучается на глубину и охватывает весь объем потенциального распространения радионуклидов. Площадь детально исследуемых мест за рубежом составляет порядка 10 км² (Форсмарк — ок. 6 × 2 км). Изучение поверхности включает геофизические и дистанционные методы, бурение множества картировочных скважин и проходку протяженных канав (на закрытых территориях). Глубинные исследования включают 20—30 скважин с отбором керна, пройденных до глубины хранилища (500 м) и ниже (до 1000 м и более). Скважины преимущественно наклонные, подсекающие зоны тектонических нарушений.
6. В процессе детальных исследований места, перспективного для размещения объекта захоронения в древних кристаллических породах, тщательно исследуются и количественно оцениваются такие факторы, которые в наибольшей мере будут влиять на безопасность будущего объекта в данной среде: тектоническая нарушенность и трещиноватость пород, параметры водообмена и геохимические свойства пород и подземных вод в области потенциального рассеивания радионуклидов.

7. К важным структурным особенностям места относятся: иерархичность структурных нарушений, их порядок (ранг в этой иерархии) и характеристика нарушений на рекомендуемом участке. Так, например, локальная структурная модель, охватывающая целевой блок участка Форсмарк, включает 60 зон деформаций (тектонических нарушений), выявленных с разной степенью достоверности. В пределах целевого блока установлены две зоны крутого падения с длиной следа на поверхности более 3000 м. Вне этих зон установлена большая степень пространственной изменчивости размеров, интенсивности и свойств трещин более низкого ранга. В целом на уровне хранилища (~470 м) среднее расстояние между субвертикальными проницаемыми трещинами составляет более 100 м. Схожие характеристики имеют структурные нарушения участка Олкилуото — это в основном древние залеченные разломы, реактивированные в несколько фаз пластичных деформаций. Также наблюдаются проявления открытой трещиноватости. Блок, определенный для ПИЛ Синьчан, ограничен разломами протяженностью 3—6 км при мощности швов от 0,8 м до 2 м.
8. К важным гидрогеологическим особенностям места относятся: гидравлическая проницаемость и водообильность пород и трещинных зон, эволюционные изменения гидрогеохимических условий, связанных с климатом. Так, например, на участках Форсмарк и Олкилуото состав подземных вод по глубине в диапазоне 0—1000 м характеризуется значительным диапазоном солёности, и подземные воды образуют относительно многослойную систему. Считается, что эта гидрохимическая особенность связана с прошлыми климатическими событиями в плейстоцене (последние 2 млн лет), которые включают оледенения, межледниковья и дегляциацию. Им соответствуют изменения уровня моря, трансгрессии и регрессии береговой линии. Район Синьчан, в силу современных засушливых климатических условий, отличается крайне низким уровнем подземных вод и удаленностью блока размещения от области разгрузки подземных вод.
9. Привязка проекта ПИЛ или самого объекта к местности осуществляется после детального изучения района с бурением глубоких структурных скважин и подтверждения потенциальной пригодности места.

Литература

1. Захоронение радиоактивных отходов: Серия норм безопасности МАГАТЭ: Конкретные требования безопасности No. SSR-5. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2011. — 76 с.
2. Кочкин Б. Т. Геоэкологический подход к выбору районов захоронения радиоактивных отходов / Б. Т. Кочкин. — М.: Наука, 2005. — 118 с.
3. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы / Н. П. Лаверов, В. И. Величкин, Б. И. Омеляненко и др. — М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. — 280 с.
4. Подземная изоляция радиоактивных отходов: Атомная энергетика / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев и др.; под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. — 592 с.
5. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. В. Капырин и др.; под ред. И. И. Линге, Ю. Д. Полякова. — М.: Комтехпринт, 2015. — 208 с.
6. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I. Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в европейских странах: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-03 / Н. С. Цебаковская, И. И. Линге, С. С. Уткин, И. А. Пронь. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 35 с.
7. Цебаковская Н. С. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть II. актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного геологического захоронения в США, Канаде и странах Азиатского региона: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-04 / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, В. Ю. Коновалов. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 41 с.
8. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-12 / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. А. Пронь, В. Ю. Коновалов. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 34 с.
9. Кочкин Б. Т. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект) / Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский, С. В. Юдинцев. — М.: ИГЕМ РАН, 2017. — 384 с.
10. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2019-03 / И. Л. Абалкина, Л. А. Большов, И. В. Капырин и др. — М.: ИБРАЭ РАН, 2019. — 40 с.
11. The disposal of radioactive waste on land: Report of the Committee on waste disposal of the Division of Earth sciences: Publication 519. — Washington, D.C., USA: National Academy of Sciences — National Research Council, 1957. — 142 p. — DOI: 10.17226/10294
12. Chapman N. A. The geological disposal of nuclear waste / N. A. Chapman, I. G. McKinley, M. D. Hill. — Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1987. — 304 p.
13. Berlepsch T. von. Salt as a host rock for the geological repository for nuclear waste / T. von Berlepsch, B. Haverkamp // Elements. — 2016. — Vol. 12. — № 4. — P. 257–262. — DOI: 10.2113/gselements.12.4.257
14. Alexander W. R. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories / W. R. Alexander, H. M. Reijonen, I. G. McKinley // Swiss Journal of Geosciences. — 2015. — Vol. 108. — № 1. — P. 75–100. — DOI: 10.1007/s00015-015-0187-y
15. Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations: Technical Report Series: No 177. — Vienna, Austria: IAEA, 1977. — 64 p.
16. Underground disposal of radioactive waste: basic guidance: IAEA Safety Series: No. 54. — Vienna, Austria: IAEA, 1981.
17. Nuclear Waste Policy Act of 1982: Public Law 97-425: 96 STAT 2001-2263. — Washington D. C, USA: 97th United States Congress, 1983.
18. Bonano E. J. Risk assessment: a tool to facilitate solutions to environmental challenges within the governing legal scheme / E. J. Bonano, A. A. Leon // Proceedings of the 6th international conference on radioactive waste management and environmental remediation ICEM'97 (Singapore, 12–16 October 1997). — N. Y., USA: ASME, 1997. — P. 955–958.
19. Tollefson J. Battle of Yucca Mountain rages on / J. Tollefson // Nature. — 2011. — Vol. 473. — № 7347. — P. 266–267. — DOI: 10.1038/473266a
20. Di Nucci M. R. From the “right to know” to the “right to object” and “decide”. A comparative perspective on participation in siting procedures for high level radioactive waste repositories / M. R. Di Nucci, A. Brunnengräber, A. M. Isidoro Losada // Progress in Nuclear Energy. — 2017. — Vol. 100. — P. 316–325. — DOI: 10.1016/j.pnucene.2017.07.005

21. Kemp R. Why not in my backyard? A radical interpretation of public opposition to the deep disposal of radioactive waste in the United Kingdom / R. Kemp // *Environment and Planning A: Economy and Space*. — 1990. — Vol. 22. — № 9. — P. 1239–1258. — DOI: 10.1068/a221239
22. Masood E. Planning rejection leaves British nuclear waste plans in disarray / E. Masood // *Nature*. — 1997. — Vol. 386. — № 6624. — P. 423–424. — DOI: 10.1038/386423a0
23. Site selection procedure repository search. — BGE. Federal company for radioactive waste disposal, 2023. — URL: <https://www.bge.de/en/repository-search/site-selection-procedure/>
24. Raynal M. Deep disposal of long-lived radioactive waste in France: The volunteering approach in site selection / M. Raynal, P. Barber // *Proceedings of the 5th international conference on radioactive waste management and environmental remediation ICEM'95 (Berlin, Germany, 3–9 September 1995)*. — N. Y., USA: ASME, 1995. — P. 85–86.
25. *The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste* / ed. D. Savage. — Chichester, N. Y., USA: John Wiley, 1995. — 437 p.
26. Challenges to regulators in siting and licensing the construction and operation of radioactive waste repositories: *Proceedings of the RWMC Regulators' Forum Workshop Helsinki, Finland 8–9 September 2015: Radioactive Waste Management: NEA/RWM/R(2015)9*. — Paris, France: OECD NEA, 2015.
27. Siting, design and construction of a deep geological repository for the disposal of high level and alpha bearing wastes: IAEA-TECDOC-563. — Vienna, Austria: IAEA, 1990. — 38 p.
28. Experience in selection and characterization of sites for geological disposal of radioactive waste: IAEA-TECDOC-991. — Vienna, Austria: IAEA, 1997.
29. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-04: [утв. приказом Ростехнадзора № 8 от 19.10.2004]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2004.
30. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-14: [утв. приказом Ростехнадзора № 379 от 22.08.2014]: [в ред. приказов Ростехнадзора № 582 от 22.11.2018, № 163 от 18.05.2022]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2022.
31. Nilsson K.-F. Geological disposal of radioactive waste: moving towards implementation: JRC Reference Reports: Report EUR 23925 EN. Geological disposal of radioactive waste / K.-F. Nilsson, W. E. Falck. — Luxembourg: Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, 2009. — 52 p. — DOI: 10.2790/12387
32. Disposition of high-level waste and spent nuclear fuel: the continuing societal and technical challenges. — Washington, D.C., USA: National Research Council, 2001. — 198 p. — DOI: 10.17226/10119
33. Keeney R. L. Siting energy facilities / R. L. Keeney. — N. Y., USA: Academic Press, 1980. — 413 p. — DOI: 10.1016/C2013-0-10951-8
34. Морозов В. Н. Оценка рейтинга структурного блока земной коры при захоронении отвержденных РАО / В. Н. Морозов, А. П. Бирюков, В. П. Моисеев // *Радиоактивные отходы — проблемы и решения: II ежегодная конференция ядерного общества России (24–28 июня 1991): Доклады и выступления. Часть 2*. — М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1991. — С. 373–380.
35. Морозов В. Н. Методика выбора участков земной коры для размещения экологически опасных отходов. Геоэкология / В. Н. Морозов, В. Н. Татаринов // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 1996. — № 6. — С. 109–120.
36. Кочкин Б. Т. Выбор мест размещения могильников высокорadioактивных ядерных отходов / Б. Т. Кочкин // *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 1996. — № 5. — С. 35–45.
37. The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests / J. Wang, L. Chen, R. Su, X. Zhao // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. — 2018. — Vol. 10. — № 3. — P. 411–435. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.03.002
38. Damage and plastic deformation modeling of Beishan granite under compressive stress conditions / L. Chen, C. P. Wang, J. F. Liu et al. // *Rock mechanics and rock engineering*. — 2015. — Vol. 48. — № 4. — P. 1623–1633. — DOI: 10.1007/s00603-014-0650-5

39. Apted M. Underground research laboratories: purposes, evolution of objectives, and brief history / M. Apted, N. Chapman // Workshop on recent advances in repository science and operations from international underground research laboratory collaboration (24–25 April 2019). — San Francisco, USA: Nuclear waste technical review board, 2019.
40. Closs K. D. Status of “Entsorgung” in the Federal Republic of Germany / K. D. Closs, R. Papp // Waste management '88: symposium on radioactive waste management (28.02 – 3.03 1988). — Tucson, Arizona, USA: University of Arizona, 1988. — Vol. II: High-level waste and general interest. — P. 267–273.
41. Warnecke E. Migration of radionuclides: experiments within the site investigation program at Gorleben / E. Warnecke, A. Hollmann, G. Stier-Friedland // MRS Online Proceedings Library: Symposium D — Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII. — 1983. — Vol. 26(1). — P. 41–48. — DOI: 10.1557/PROC-26-41
42. Winograd I. J. Radioactive waste storage in the arid zone / I. J. Winograd // Eos, Transactions American Geophysical Union. — 1974. — Vol. 55. — № 10. — P. 884–894. — DOI: 10.1029/EO055i010p00884
43. Smith S. Geologic isolation of high-level radioactive waste: putting it away forever / S. Smith // Water well journal. — 1987. — Vol. 41. — № 4. — P. 31–39.
44. Грабовников В. А. Условия обеспечения экологической безопасности подземного захоронения токсичных отходов / В. А. Грабовников, Ю. С. Татарчук, Ю. К. Шипулин // Разведка и охрана недр. — 1999. — № 4. — С. 41–44.
45. Gupalo T. A. Prospects for development of technologies of radwaste geological isolation in Russia / T. A. Gupalo // International Journal of Nuclear Energy Science and Technology. — 2006. — Т. 2. — № 1–2. — С. 42–53. — DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010646
46. Chapman N. A. Geological environments for deep disposal of intermediate level wastes in the United Kingdom / N. A. Chapman, T. J. McEwen, H. Beale // Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radioactive Wastes (Hannover, Germany, 3–7 March 1986): Proceedings series: STI/PUB/715. — Vienna, Austria: IAEA, 1986. — P. 311–328.
47. Studies of geology and hydrology in the Basin and Range Province, Southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste — Basis of characterization and evaluation: USGS Numbered Series: Professional Paper 1370-A / M. S. Bedinger, K. A. Sargent, W. H. Langer et al. — Washington, D.C., USA: U.S. Government Printing Office, 1989. — 48 p. — DOI: 10.3133/pp1370A
48. Bedinger M. S. Studies of geology and hydrology in the Basin and Range Province, Southwestern United States, for isolation of high-level radioactive waste — Evaluation of the regions: USGS Numbered Series: Professional Paper 1370-H / M. S. Bedinger, K. A. Sargent, W. H. Langer. — Washington, D.C., USA: U.S. Government Printing Office, 1990. — 72 p. — DOI: 10.3133/pp1370H
49. Hedin A. Crystalline rock as a repository for Swedish spent nuclear fuel / A. Hedin, O. Olsson // Elements. — 2016. — Vol. 12. — № 4. — P. 247–252. — DOI: 10.2113/gselements.12.4.247
50. Vidstrand P. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (SKB) — Äspö Hard Rock Laboratory / P. Vidstrand // Workshop on recent Advances in Repository Science and Operations from International Underground Research Laboratory Collaboration (24–25 April 2019). — San Francisco, USA: Nuclear waste technical review board, 2019.
51. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. Updated 2013-08: Technical Report TR-08-05. — Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2013. — 546 p.
52. Hedin A. Swedish Operator's considerations for updating a safety case / A. Hedin // The 21st Meeting of the NEA Integration Group for the Safety Case (IGSC) (8–10 October 2019). — Paris, France, 2019.
53. Posiva — Site surveys. — 2023. — URL: <https://www.posiva.fi/en/index/finaldisposal/siteinvestigations.html>
54. The Finnish Solution to Final Disposal of Spent Nuclear Fuel / J. Vehmas, A. Rentto, J. Luukkanen et al. // The Future of Radioactive Waste Governance: Lessons from Europe: Energiepolitik und Klimaschutz. Energy Policy and Climate Protection / eds. M. Arentsen, R. van Est. — Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2023. — P. 287–317. — DOI: 10.1007/978-3-658-40496-3_11
55. Wang J. On area-specific underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China / J. Wang // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2014. — Vol. 6. — № 2. — P. 99–104. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.01.002
56. Chenevier F. The French radioactive waste management program / F. Chenevier // Geological problems in radioactive waste isolation: a world wide review / ed. P. A. Witherspoon. — Berkeley, California, USA: University of California, 1991.

57. Dupuis M.-C. The Cigeo project Meuse/Haute-Marne reversible geological disposal facility for radioactive waste: Project owner file. Public debate of 15 may to 15 october 2013 / M.-C. Dupuis, F.-M. Gonnot. — Châtenay-Malabry, France: Andra, French national radioactive waste management agency, 2013. — 103 p.
58. Metlay D. S. Selecting a site for a radioactive waste repository: a historical analysis / D. S. Metlay // *Elements*. — 2016. — Vol. 12. — № 4. — P. 269–274. — DOI: 10.2113/gselements.12.4.269
59. Doi K. Geoscientific studies for radioactive waste isolation in geologic media of Japan / K. Doi, S. Hirono // *The geological disposal of high level radioactive wastes*. — Athens, Greece: Theophrastus Publications, 1987. — P. 3–16.
60. Koide H. Geologic problems of radioactive waste disposal in Japan / H. Koide // *Episodes — Journal of International Geoscience*. — 1991. — Vol. 14. — № 3. — P. 299–302. — DOI: 10.18814/epiugs/1991/v14i3/018
61. Evaluating site suitability for a HLW repository — scientific background and practical application of NUMO's siting factor: NUMO-TR-04-04. — Tokyo, Japan: Nuclear Waste Management Organization of Japan, 2004. — 74 p.
62. Japan's siting process for the geological disposal of high-level radioactive waste: an international peer review: Radioactive Waste Management: NEA No. 7331. — OECD NEA, 2016. — DOI: 10.1787/9789264265035-en
63. Challenges to the regulators in siting and licensing the construction and operation of radioactive waste repositories: Workshop Proceedings Helsinki, Finland 8-9 September 2015: Radioactive Waste Management: NEA/RWM/R(2015)9. — OECD NEA, 2015.
64. Кедровский О. Л. Использование подземного пространства для вечного захоронения радиоактивных отходов / О. Л. Кедровский // *Подземное и шахтное строительство*. — 1992. — № 2. — С. 2–7.
65. Johnson K. S. Geotechnical characterization of the three final candidate sites for geologic disposal of high-level radioactive wastes in the United States / K. S. Johnson // *Hydrogeology and safety of radioactive and industrial waste disposal: international symposium. Documents du B.R.G.M. n° 160 (7–10 June 1988)*. — Orléans, France: International Association of Hydrogeologists, 1988. — Vol. 1: Communications. — P. 435–449.
66. Patel P. United States launches new direction to manage nuclear waste / P. Patel, R. Ewing // *MRS Bulletin*. — 2013. — Vol. 38. — № 3. — P. 206–207. — DOI: 10.1557/mrs.2013.63
67. Основополагающие принципы безопасности: Серия норм безопасности МАГАТЭ: Основы безопасности No. SF-1. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2007. — 23 с.
68. Методологические основы исследований на завершающем этапе выбора площадок для размещения хранилищ отработавших ядерных материалов в кристаллических породах / И. П. Лаверов, В. И. Величкин, Б. Т. Кочкин и др. // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 2010. — № 1. — С. 3–12.
69. Об использовании атомной энергии : №170-ФЗ : [Федеральный закон от 21.11.1995] : [в ред. федерального закона № 219-ФЗ от 28.06.2022]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2022.
70. Siting of geological disposal facilities: IAEA Safety Series: Safety Guide No. 111-G-4.1. — Vienna, Austria: IAEA, 1994. — 33 p.
71. Основные направления решения проблемы надежной изоляции радиоактивных отходов в СССР / О. Л. Кедровский, Ю. И. Шишиц, Е. А. Леонов и др. // *Атомная энергия*. — 1988. — Т. 64. — № 4. — С. 287–294.
72. Лаверов Н. П. Геологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов / Н. П. Лаверов, Б. И. Омеляненко, В. И. Величкин // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 1994. — Т. 6. — С. 3–20.
73. Reiter L. What are the attributes of a good isolation strategy? / L. Reiter // *Proceedings of the 6th international conference on radioactive waste management and environmental remediation ICEM'97 (Singapore, 12–16 October 1997)*. — N. Y., USA: ASME, 1997.
74. Кедровский О. Л. Методология обоснования концепции изоляции отвержденных радиоактивных отходов в геологических формациях / О. Л. Кедровский, Ю. И. Шишиц // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. — 1997. — № 5. — С. 63–68.
75. Krauskopf K. B. Radioactive waste disposal and geology: Topics in the earth sciences. Vol. 1 / K. B. Krauskopf. — L., United Kingdom ; N. Y., USA: Chapman and Hall, 1988. — 145 p. — DOI: 10.1007/978-94-009-1201-4

76. Обоснование условий локализации высокоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива в геологических формациях / О. Л. Кедровский, И. Ю. Шищиц, Т. А. Гупало и др. // Атомная энергия. — 1991. — Т. 70. — № 5. — С. 294–297.
77. Основные задачи радиогеоэкологии в связи с захоронением радиоактивных отходов / Н. П. Лаверов, А. В. Канцель, А. К. Лисицин и др. // Атомная энергия. — 1991. — Т. 71. — № 6. — С. 523–534.
78. Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes: Technical Report Series: No 413. — Vienna, Austria: IAEA, 2003. — 80 p.
79. Pierce W. G. Summary of rock salt deposits in the United States as possible storage sites for radioactive waste materials: Geological Survey Bulletin 1148 / W. G. Pierce, E. I. Rich. — Washington, D.C., USA: United States government printing office, 1962. — 91 p. — DOI: 10.3133/b1148
80. Herrmann A. G. Waste disposal and evaporites: contributions to long-term safety: Lecture notes in earth sciences. Vol. 45 / A. G. Herrmann, B. Knipping. — Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1993. — 193 p. — DOI: 10.1007/BFb0011851
81. Project Opalinus Clay. Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste: Technical report: NAGRA NTB 02-05. — Wetingen, Switzerland: Nagra, 2002. — 472 p.
82. Оценка влияния атомно-промышленного комплекса на подземные воды и смежные природные объекты (г. Сосновый Бор Ленинградской области) / В. Ю. Абрамов, А. В. Боронина, В. Н. Епимахов и др.; под ред. В. Г. Румынина. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2002. — 208 с.
83. Delay J. 6 — Clay geological repository systems: characterisation and site surveying technologies and techniques / J. Delay // Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste: Woodhead Publishing Series in Energy / eds. J. Ahn, M. J. Apted. — Duxford, UK: Woodhead Publishing, 2010. — P. 153–187. — DOI: 10.1533/9781845699789.2.153
84. Новые подходы к подземному захоронению высокоактивных отходов в России / Н. П. Лаверов, В. И. Величкин, Б. И. Омеляненко и др. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2000. — № 1. — С. 3–12.
85. Гупало Т. А. Перспективы развития технологий геологической изоляции РАО / Т. А. Гупало // Атомная стратегия. — 2004. — № 13. — С. 23–35.
86. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project: Technical Report TR-11-01. Vol. I. — Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2011.
87. Olkiluoto site description 2011: POSIVA 2011-02. — Eurajoki, Finland: Posiva Oy, 2012. — 1028 p.
88. Olkiluoto site description 2004: POSIVA 2005-03. Vols. 1–3. — Eurajoki, Finland: Posiva Oy, 2005. — 444 p.
89. Geology of Olkiluoto: POSIVA 2016-16 / I. Aaltonen, J. Engström, K. Front et al. — Eurajoki, Finland: Posiva Oy, 2012. — 398 p.
90. Deere D. U. The rock quality designation (RQD) index in practice / D. U. Deere, D. W. Deere // Rock classification systems for engineering purposes / ed. L. Kirkaldie. — ASTM International, 1988. — P. 91–101. — DOI: 10.1520/STP48465S

Глава 3

Ранняя история геологических исследований в России с целью выбора района размещения хранилищ РАО

В период гонки вооружений в сороковых и пятидесятых годах XX века районы размещения объектов производства компонентов ядерного оружейного комплекса выбирались исходя из геополитических соображений, военной безопасности и инженерно-геологической пригодности для строительства. Фактор экологически безупречной утилизации продуктов их деятельности, т. е. как раз радиоактивных отходов, рассматривался в последнюю очередь. Судя по международному «наследию» того периода, так было во всех ядерных странах. Со временем ситуация изменилась и вопрос безопасной утилизации РАО встал очень остро, в том числе в СССР.

Изначально в СССР подземному захоронению подлежали, как правило, низко- и среднеактивные отходы. В исключительных случаях рассматривалась возможность подземной изоляции высокоактивных (тепловыделяющих) радиоактивных отходов (ВАО).

В СССР была предложена и внедрена в практику технология закачки жидких РАО в глубокозалегающие горизонты. Однако жидкие РАО не охватывали всего разнообразия отходов. Кроме того, выяснилось, что не все районы СССР, в которых накапливались РАО, оказались пригодны для использования этой технологии. Наконец, в стране росло количество ВАО, которые стали настоящей экологической проблемой, особенно после ряда аварий в местах их хранения.

По заданию Минатома СССР (в настоящее время — Госкорпорация «Росатом») разработкой технологии и поиском площадок, пригодных для подземного захоронения твердых (отвержденных) РАО, активно занялись специалисты ведомственных организаций и ученые Академии наук [1]. Естественно, что в первую очередь интерес вызвали районы расположения производственных организаций, которые были «обделены» природными условиями, дававшими возможность геологической изоляции жидких РАО [2].

В частности, ВНИПИпротехнологии начал изучение потенциала территорий Кольского полуострова, архипелага Новая Земля, окрестностей ПО «Маяк» на Южном Урале, районов на юге Красноярского края в окрестностях ГХК (рис. 3.1). Геологические работы именно в этих районах будут рассмотрены ниже. В некоторых из этих исследований принимали участие также иностранные фонды и организации (табл. 3.1) [3].

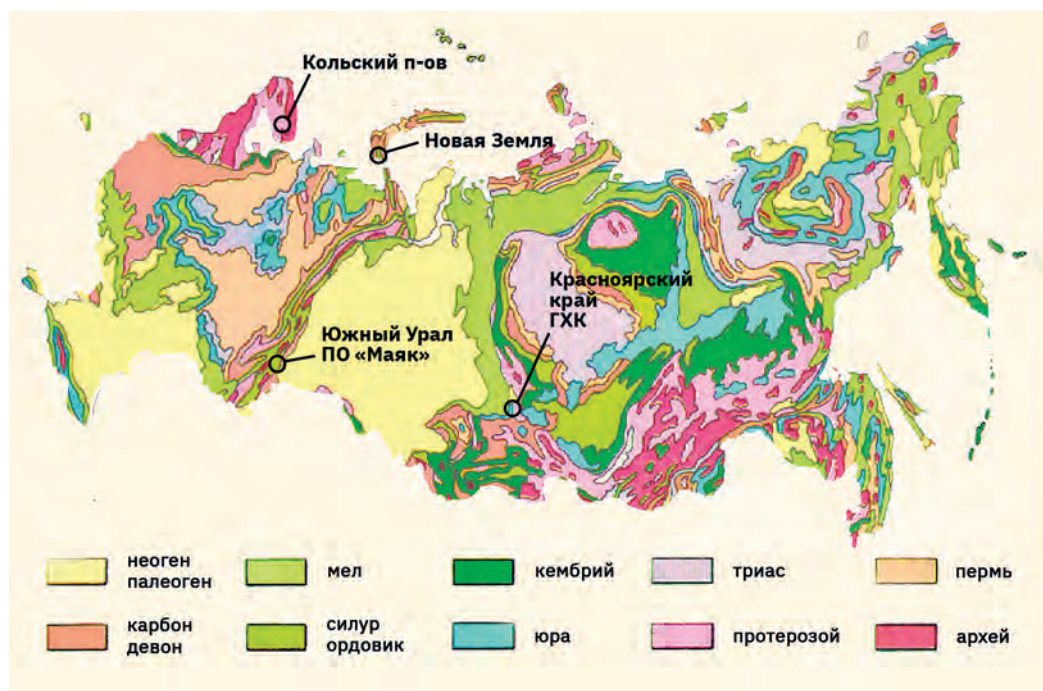


Рис. 3.1. Районы на территории СССР и Российской Федерации, изучавшиеся в конце XX века с целью геологического захоронения БАО

Следует помнить, что нормативно установленные принципы выбора мест для безопасной изоляции БАО и ОЯТ в то время в СССР вообще отсутствовали, и разработчикам проектов приходилось ориентироваться на инженерно-геологическое обеспечение будущих подземных объектов и рекомендации МАГАТЭ.

Наряду с этими систематическими исследованиями по долгосрочным программам Минатома СССР (ГК «Росатом»), нацеленными на выбор мест изоляции БАО, выполнялись работы по локальным проектам, решавшим частные вопросы, например, изучение возможности подземной изоляции ОЯТ от Билибинской АЭС на Чукотке или ОЯТ от атомных двигательных установок судов в Приморье. Отдельно решались вопросы изоляции менее опасных типов РАО.

Одновременно с геологическими исследованиями по выбору перспективных территорий для захоронения БАО в России уже в конце XX века рассматривалась возможность создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в соответствии с мировой практикой поэтапного подхода к подземной изоляции БАО и ОЯТ. В частности, рассматривали возможность заложения трех таких лабораторий: на территории ПО «Маяк» (Челябинская область), на территории Нижнеканского массива (Красноярский край) и на Кольском полуострове [3].

Таким образом, история проектов подземного захоронения РАО в России (вместе с периодом СССР) насчитывает более 35 лет. На ранних этапах наибольшее развитие получили проекты в многолетнемерзлых породах архипелага Новая Земля и в кристаллических породах Кольского полуострова, Южного Урала и юга Красноярского края.

Таблица 3.1. Этапы геологических исследований в конце XX века по обоснованию перспективных площадок для планируемой долговременной изоляции в будущем твердых радиоактивных отходов в России (действовавшие временные хранилища РАО и ОЯТ Минатома, ВМФ, научно-производственного объединения «Радон» и др. не включены) [3]

Годы	Финансирование	Исполнитель	Территория
До 1994	Минатом	ВНИПИПромтехнологии	Южный регион, в т. ч. Астраханская область
1985–1990	Минатом	Тот же и ВНИПИЭТ	Кольский полуостров
1985–1988	Минатом	МГРЭ, ЦКГРЭ	Кольский полуостров, район п. Дальние Зеленцы
1989–1991	Минатом	Горный институт КНЦ РАН	Кольский полуостров
1993–1995	Европейский Союз	Горный институт КНЦ РАН, DBE (Германия)	Кольский полуостров
1996–2000	Европейский Союз	Горный институт КНЦ РАН, SGN (Франция), Belgatom (Бельгия)	Кольский полуостров, Архангельская область, арктические острова
2001	Европейский Союз	Горный институт КНЦ РАН, SGN (Франция), Belgatom (Бельгия)	Карелия, Таймыр, Полярный Урал
1993–1996	Минобороны	ВМФ	Береговые подземные выработки флотов
1999–2002	МНТЦ	НПО «Звездочка»	Кольский полуостров, Архангельская область, арктические острова
1991–1992	СКВ (Швеция)	НПЦ «Недра», НПЦ «Кольская Сверхглубокая»	Район Кольской сверхглубокой скважины
1998–2002	ЮНЕСКО	НПЦ «Недра», НПЦ «Кольская Сверхглубокая», Геологический Институт КНЦ РАН	Район Кольской сверхглубокой скважины
1991–2000	Минатом, Ленинградская область	Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, ВНИПИЭТ	Ленинградская область, район п. Копорье
1999–2000	Компания «Росредмет»	Комбинат «Севредмет»	Район п. Ревда, Мурманская область
1993–1996	Минатом, Минобороны	ВНИИЭФ, НИИ Минобороны	Архипелаг Новая Земля, ядерные полигоны
1991–2000	Минатом	ВНИПИПромтехнологии	Архипелаг Новая Земля, ядерные полигоны
1999–2000	Европейский Союз	ФРГ, Швеция, Норвегия	Архипелаг Новая Земля, ядерные полигоны.
1985–2000	Минатом	ВНИПИПромтехнологии, ИГЕМ РАН	ПО «Маяк», Челябинская область
1993–2000	Минатом	Радиевый институт им. В. Г. Хлопина	Красноярский край, Нижнеканский массив
1999–2000	Минсудпром	Завод «Нерпа»	Район п. Сайда-Губа, Мурманская область
1999–2000	Минатом	МКЦ «Нуклид»	Судоремонтные заводы Мурманской и Архангельской области, Дальний Восток

3.1. Архипелаг Новая Земля

Концепция изоляции РАО в многолетнемерзлых породах была разработана в институте ВНИПИпромтехнологии Минатома России [4]. Анализ обширных материалов по исследованию свойств многолетнемерзлых пород давал основание считать, что они обладают высокими изолирующими свойствами и могут быть использованы для подземной изоляции РАО. Концепция, как утверждалось, соответствует техническим критериям МАГАТЭ [5], была одобрена Государственной экологической экспертизой Минприроды России, Минздравом России, Госатомнадзором России [4].

Ведущий замысел (концепция) обеспечения экологической безопасности при подземной изоляции РАО в многолетнемерзлых горных породах заключается в реализации следующего принципа [4]: «Если рабочий блок многолетнемерзлых горных пород является криогенным водоупором, а глубина размещения рабочего объема для изоляции РАО выбрана достаточной для исключения влияния на него сезонного протаивания и мерзлотно-геологических процессов, то необходимым и достаточным условием практического исключения выноса радионуклидов за пределы рабочего объема могильника (хранилища) в течение всего срока потенциальной опасности изолируемых РАО является превышение времени работоспособности инженерных барьеров над временем естественного восстановления криогенного водоупора, нарушенного вокруг рабочего объема могильника (хранилища) в процессе его создания и (или) под воздействием тепловыделения размещенных в нем РАО».

Естественные свойства мерзлых пород замедляют течение окислительно-восстановительных процессов, что, в свою очередь, существенно увеличивает сроки работоспособности инженерных барьеров. Проблему представляют процессы, связанные с распространением потока тепловой энергии от РАО и приводящие к образованию зоны оттаивания вокруг хранилища (могильника), а после пика тепловыделения — процессы, связанные с обратным промерзанием. Обеспечение экологической безопасности при подземной изоляции тепловыделяющих РАО (ВАО и ОЯТ) в условиях многолетнемерзлых пород требует специального рассмотрения, при том что максимальный размер и время существования зоны оттаивания поддаются теоретическому прогнозу [6, 7].

При современном распространении многолетнемерзлых и сезонно-мерзлых горных пород суммарная площадь, занятая многолетнемерзлыми породами, составляет около 25 % территории суши земного шара, практически 50 % территории бывшего СССР и примерно 65 % территории Российской Федерации, из которых значительная часть имеет сплошное по площади и непрерывное в разрезе распространение. Сплошная криолитозона характеризуется ярусным строением. В вертикальном разрезе она включает в себя мерзлые, морозные и охлажденные породы, ниже которых температурный режим соответствует местному геотермическому градиенту.

Мерзлые породы, слагающие верхний ярус, имеют отрицательную температуру и содержат в своем составе лед. К ним относятся рыхлые четвертичные отложения и скальные коренные породы со льдом по трещинам выветривания и зонам дробления, сопровождающим тектонические нарушения. Верхний ярус промерзания обычно захватывает бывшие зоны активного и частично замедленного водообмена.

Морозные породы, также обладая отрицательной температурой, не содержат льда. Обычно это коренные породы, залегающие глубже зоны площадного выветривания с закрытыми, притертыми и залеченными трещинами вне зон тектонических нарушений.

Охлажденные породы отличаются пониженными относительно геотермического градиента температурами.

Кроме льда, в криолитозоне могут встречаться в разных количествах высокоминерализованные подземные воды с отрицательными температурами, так называемые криопэги.

Ключевыми критериями выбора районов, перспективных для подземной изоляции РАО в многолетнемерзлых горных породах, были определены следующие [4]:

- надежную изоляцию можно реализовать в северных районах, где многолетнемерзлые горные породы представляют собой криогенный водоупор и не содержат внутримерзлотных вод (криопэгов), в результате чего естественным образом минимизируются миграционные процессы в рабочем блоке горного массива;
- ландшафтно-климатические условия должны обеспечить такую глубину подземной локализации рабочего блока с РАО, на которой процессы сезонного протаивания грунтов и развития мерзлотно-геологических явлений близ поверхности не оказывали бы на него влияния;
- мощность криолитозоны должна обеспечить постоянное во времени природное многолетнемерзлое состояние горных пород вокруг рабочего блока, что позволит использовать их в качестве естественного теплофизического барьера тепловыделению РАО;
- минимальное содержание криопэгов должно обеспечить инженерно-гидрогеологические условия сохранности консервирующих свойств в начальный термальный период изоляции и обеспечивать длительную сохранность инженерных барьеров.

Архипелаг Новая Земля полностью соответствовал концепции изоляции РАО в многолетнемерзлых породах. Создание северного регионального могильника на архипелаге рассматривалось в связи с необходимостью утилизации РАО, образующихся как в Мурманской (береговые базы ВМФ и Атомфлота), так и в Архангельской области (заводы в г. Северодвинске) [8].

3.1.1. Криолитозона Южного острова архипелага Новая Земля

В четвертичном периоде Новая Земля была одним из центров максимального оледенения Северного полушария. Мощность ледникового щита достигала 800—1000 м, он создавал значительную нагрузку на земную кору и предопределял ее опускание до 400 м ниже современного уровня моря. Неоднократное развитие и сокращение ледников в четвертичном периоде приводило то к погружению суши и трансгрессии моря, то к поднятию, оледенению и формированию серии террас, наиболее древние из которых достигают отметок 200 м и более в современном рельефе. В настоящее время происходит сокращение ледников и поднятие архипелага, о чем свидетельствуют невыработанные продольные профили, наличие порогов и водопадов [9].

Криолитозона Южного острова — сплошная по площади распространения и непрерывная по разрезу. Геокриологические характеристики Южного острова архипелага полностью соответствовали перечисленным выше критериям. Это делало его потенциально пригодным для обеспечения инженерно-геологической безопасности захоронения РАО.

Прогноз устойчивости мерзлой зоны архипелага Новая Земля, выполненный на основании анализа естественной динамики прошлых климатов, показал, что в ближайшие 10 000 лет на его большей части криолитозона сохранит достаточно устойчивое состояние. Только на самых южных и юго-западных участках криолитозона в отдельные периоды будущих потеплений может начать деградировать. Влияние на устойчивость криолитозоны «парникового эффекта» может оказаться более заметным, и уже к середине XXI века на большей части Южного острова Новой Земли криолитозона начнет интенсивно деградировать [10].

Изучение инженерно-геологических условий Новой Земли было начато в середине 1950-х гг. в связи с испытаниями ядерного оружия (рис. 3.2). Основным исполнителем геологических изысканий с 1960 г. являлась Экспедиция № 10 Государственного геологического предприятия «Гидроспецгеология». С 1991 г. в южной части Южного острова началось доизучение территории в связи с оценкой ее перспективности для захоронения радиоактивных отходов [9].

Территория Южного острова входит в зону сплошного распространения многолетнемерзлых пород. По основным мерзлотным характеристикам (среднегодовая температура пород — t_{cp} и мощность мерзлой толщи — M) территория острова подразделяется на два района: южная равнинная часть острова (среднегодовая температура пород t_{cp} от -3 до -5°C ; мощность мерзлых пород $M=200-400$ м) и северная горная часть (t_{cp} от -5 до -7°C ; $M=200-400$ м, в пределах горных хребтов до 500 м).

Захоронение РАО в указанных геокриологических условиях таким образом, чтобы реализовались положения ведущего замысла подземной изоляции РАО в многолетнемерзлых породах, представлялось возможным в относительно простых горных выработках (траншея, шахтный ствол, скважина большого диаметра, штольня).

В результате проведенного анализа геоморфологических, геологических и геокриологических особенностей архипелага Новая Земля для размещения опытно-промышленного объекта с целью подземной изоляции РАО и ОЯТ двигательных установок был выбран район губы Башмачная (см. рис. 3.2). Он относится к территории бывшего Северного полигона ядерных испытаний [8]. Толщина многолетнемерзлых грунтов на участке превышает 350 м, что подтверждено бурением в 1999 г. Также была определена альтернативная перспективная территория для строительства объекта захоронения РАО, находящаяся вне границ Северного полигона в районе залива Рейнеке.

3.1.2. Район губы Башмачная

Район находится в юго-западной части Южного острова южнее параллели 73° с. ш. Общая площадь района составляет 860 км^2 . С юга и запада он омывается водами Баренцева моря и пролива Костин Шар (рис. 3.2, 3.3).

Климат территории суровый, с продолжительной холодной зимой и коротким прохладным летом. Среднегодовая температура воздуха составляет $-6,5^{\circ}\text{C}$.

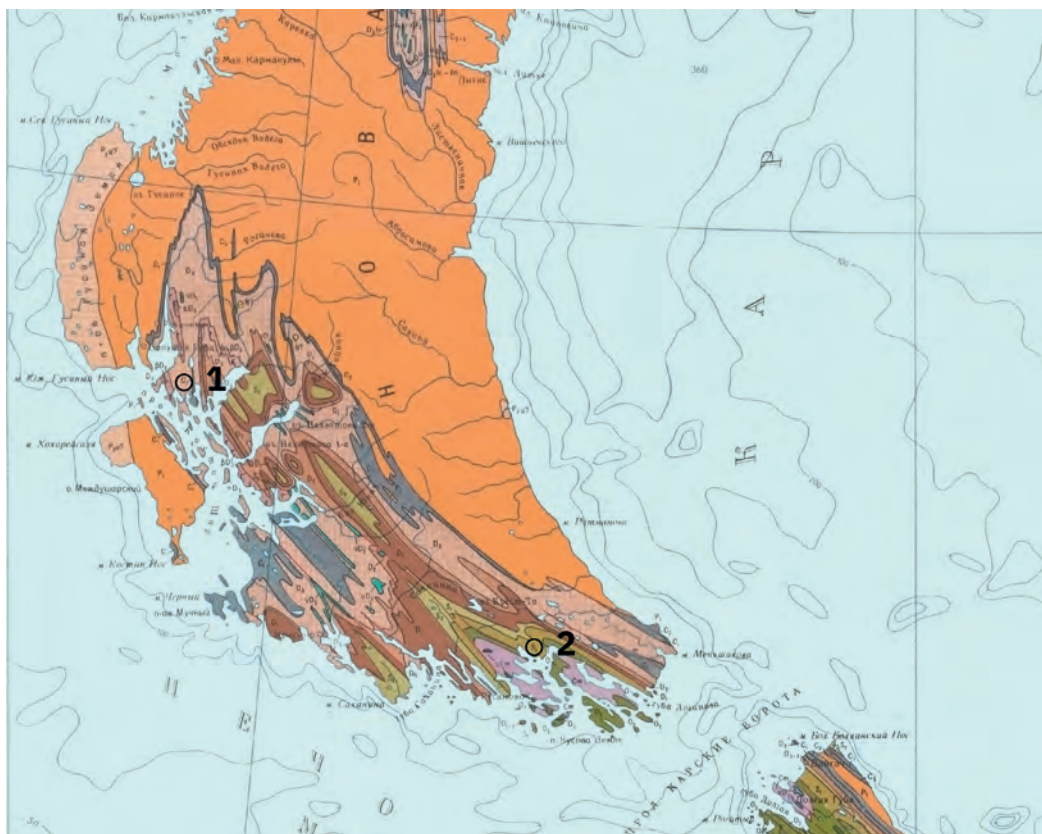


Рис. 3.2. Позиция перспективных районов на Геологической карте южной части острова Новая Земля
 1 — Бухта Башмачная;
 2 — Залив Рейнеке (фрагмент Геологической карты масштаба 1:1 500 000, 1967 г.)



Рис. 3.3. Бухта Башмачная

В геоморфологическом отношении район представляет собой террасированную равнину, постепенно повышающуюся в северном и северо-восточном направлении до абсолютной высоты 100–140 м. Поверхность террас пологоволнистая, увалистая. Увалы ориентированы в северо-западном направлении, имеют относительную высоту 30–35 м. Гряды сложены коренными породами, устойчивыми к эрозии.

В геологическом строении территории участвуют палеозойские терригенные отложения верхнего отдела силура, девонской системы и нижнего отдела каменноугольной системы (см. рис. 3.2). Известняки и доломиты с прослоями глинистых сланцев и других пород смяты в складки и нарушены разломами. С поверхности они перекрываются прерывистым маломощным чехлом верхнечетвертичных и современных отложений. В целом для данной территории характерно четко выраженное складчато-блоковое строение, определяемое ее положением в пределах Южно-Новоземельского антиклинория.

По физико-механическим характеристикам коренные породы палеозойской группы преимущественно крепкие, прочные и очень прочные, иногда средней и слабой прочности (сланцы и некоторые разности рассланцованных пород). Характеристики упругих свойств служат дополнительным подтверждением значительной плотности и очень слабой проницаемости палеозойских пород [9].

Вмещающие породы относятся по своим фильтрационным характеристикам к водоупорным, непроницаемым. Вскрытые разведочными скважинами подземные воды прерывистолинзовидные, трещинные, трещинно-жильные, маловодообильные. Общим для криопэгов на территории района губы Башмачной является их трещинно-жильный характер залегания, маловодообильность, отсутствие гидравлической связи между собой и морем, причем скважины, их вскрывшие, расположены на первом уровне рельефа с абсолютной высотой до 30 м. Различаются криопэги соленостью, напорами и глубиной залегания.

Трещинные воды (и криопэги, и подмерзлотные воды с положительными температурами) имеют незначительную водообильность. По данным от качек разведочных скважин, удельные дебиты изменяются от 0,001 до 0,08 л/с. Водопроницаемость вмещающих пород чрезвычайно мала. Коэффициенты водопроводимости обводненных трещиноватых песчаников, известняков, сланцев, алевролитов составили 0,004–0,65 м²/сут, соответствующие им коэффициенты фильтрации 0,00004–0,02 м/сут [9].

По результатам анализа материалов мерзлотных исследований, проведенных на Южном острове, установлена зависимость основных характеристик криолитозоны (мощность мерзлоты, температура горных пород, вероятность наличия криопэгов и глубина их залегания) от абсолютной высоты рельефа [11]. На основе анализа этих данных был намечен перспективный участок строительства пункта захоронения РАО (губа Черная) в 15 км от моря [12]. Результаты детальных исследований на участке, выполненные в 1999 г., подтвердили предварительные данные. При абсолютных высотных отметках 84,2–127,2 м мощность толщи многолетнемерзлых пород колеблется от 350 до 400 м, их среднегодовая температура на глубине нулевых годовых теплооборотов находится в интервале от –3 до –5 °С. Пробуренная в 1999 г. скважина (Б-6) глубиной 350 м не достигла подошвы многолетнемерзлых пород. Отрицательно-температурные воды (криопэги) в интервале морозных пород (98,0–450,0 м) имеют встречаемость менее 5 %. Годовые колебания температур наблюдаются до глубины 20 м.

3.1.3. Район залива Рейнеке

Район залива Рейнеке, также оцененный как перспективный для строительства объекта захоронения РАО, расположен в 200 км к востоку от ближайшего населенного пункта Белушья Губа, уже вне границ Северного полигона (см. рис. 3.2).

Перспективная территория занимает пологие вершины водораздельных гряд в наиболее приподнятой части пологоволнистой равнины (от 50 до 157 м), вытянута на 10 км от залива Рейнеке на северо-запад до границы Центрального ядерного полигона, имеет ширину 8 км. Наивысшая часть гора Рейнеке (157,3 м н. у. м.).

Геологическое строение этой территории резко отличается от предыдущей, поскольку приурочено к древнему ядру Южно-Земельского антиклинория. В геологическом разрезе выделены несколько толщ верхнего протерозоя: Пиритовская толща (Рифей), Кривенерская и Рейнекская толщи (Венд). Пиритовская толща сложена хлорит-серицит-глинистыми, глиносто-кремнистыми и хлорит-углистыми сланцами. Кривенерская толща представлена переслаиванием песчаников полевошпат-кварцевого, полимиктового и вулканогенного состава, а также алевролитов, аргиллитов и сланцев. Рейнекская толща — полосчатые хлорит-серицит-кремнистые, глиностокремнистые сланцы и аргиллиты с прослоями алевролитов и песчаников. Породы крепкие, устойчивые, по своим физико-механическим свойствам благоприятны для проходки горизонтальных и вертикальных горных выработок.

Выбранная площадка расположена в границах тектонического блока, морфологически совпадающего с приподнятой частью равнины. Тектонические нарушения складчатые, крутопадающие, активные в среднее и позднее девонское время, когда по разломам происходило внедрение силлов, даек, штоков диабазов и габбро-диабазов.

Район расположен в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, в которой мощность мерзлоты зависит в том числе и от высоты поверхности территории над уровнем моря. В районе залива Рейнеке на территориях с абсолютными отметками 80—120 м прогнозная мощность мерзлоты достигает 350—400 м.

Внутримерзлотные воды (криопэги) отличаются спорадическим распространением в плане и разрезе, залегая в виде разобщенных линз, не связанных или имеющих затрудненную гидравлическую связь между собой. На территориях с абсолютными отметками 80—120 м породы водонепроницаемые, вероятность наличия изолированных линз криопэгов менее 10 %, причем на глубинах более 300—350 м.

Принципиальное решение о возможности размещения опытно-промышленного объекта для захоронения твердых и отвержденных отходов среднего и низкого уровней активности среди многолетнемерзлых пород было принято в 1996 г. В 1998 г. начались разработка проекта в пределах Северного полигона на архипелаге Новая Земля с планами пуска объекта в 2000 г. и переговоры об инвестициях для проведения НИОКР [12].

Несмотря на то, что работы на архипелаге Новая Земля были доведены до проекта, они были прекращены в связи с отсутствием требуемого объема финансирования. Немалую роль сыграл тот факт, что в условиях распространенного в мировом сообществе мнения о глобальном потеплении климата размещение РАО и особенно ВАО на Новой Земле в «вечной» мерзлоте на международном уровне стало мощным раздражающим антиядерным фактором [3].

3.2. Кольский полуостров

Северо-западное побережье Кольского полуострова – район, в котором на береговых технических базах ФГУП «СевРАО» скапливались значительные объемы РАО. Здесь проводились специализированные инженерно-геологические изыскания, результаты которых послужили основанием для отнесения территории в число претендентов для захоронения РАО.

Эта часть побережья относится к Мурманскому блоку северо-восточной части Балтийского щита, который отличается спокойной тектонической обстановкой и потенциально благоприятным составом слагающих его кристаллических пород (рис. 3.4). Южная граница Мурманского блока является архейской палеоколлизией, которая не проявляется в современных тектонических движениях. Северное ограничение Мурманского блока по геофизическим данным находится в море, на удалении от берега порядка 10–15 км.

Мурманский блок сложен комплексом кристаллических пород докембрийского возраста. В его составе ведущую роль играют магматические и ультраметаморфические породы архея, представленные гранитами и мигматитами, а также реликтами первичных осадочных и осадочно-метаморфических пород. Породы архейского-нижнепротерозойского возраста представлены крупными телами габбро-диабазов, оливиновых габбро, габбро-норитов. Породы верхнепротерозойского-палеозойского возраста представлены дайками габбро-диабазов и диабазов.

Трещиноватость верхней части пород до глубины 80–100 м связана с процессами выветривания. Трещины открытые, не залечены. По стенкам трещин развиты тонкие пленки гидроокислов железа. Ниже зоны выветривания во вскрытом скважинами разрезе развиты трещины тектонической природы разной ориентировки и мощности от долей миллиметра до 5 мм. Также имеются зоны повышенной трещиноватости и дробления. Мощность их колеблется от сантиметров до 8,1 м. Трещины и зоны дробления залечены карбонатом, хлоритом, эпидотом и др.

Среди рыхлых четвертичных отложений (до 3 м мощности) наиболее широкое распространение имеет моренный покров последнего оледенения (Валдайского).

Прочностные показатели коренных пород выдержаны независимо от петрографического состава. Коэффициент крепости пород колеблется для порфиридных гранитов 7,83 до 8,94 (среднее 8,25), для мигматитов от 8,74 до 9,83 (среднее 8,93).

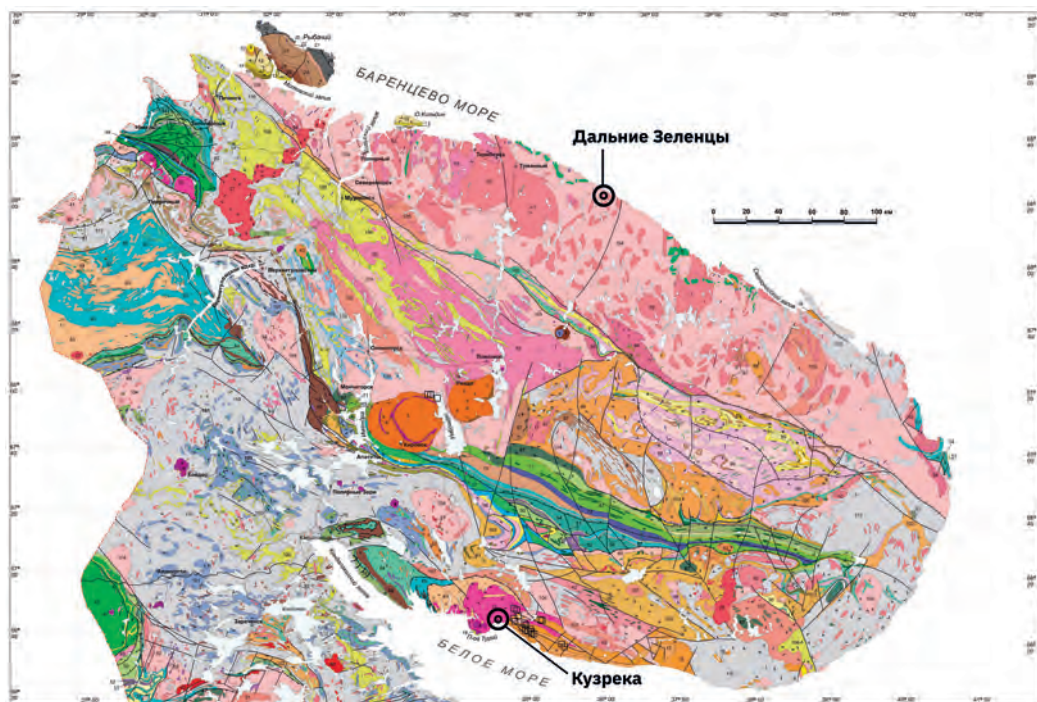


Рис. 3.4. Геологическая карта Кольского полуострова и участки, изучавшиеся в связи с захоронением РАО

На территории Мурманского блока распространены порово-пластовые воды рыхлых четвертичных отложений и трещинные воды кристаллических пород до глубины 100–150 м, реже 250 м. Они образуют единый водоносный горизонт со слабой обводненностью и низкими фильтрационными показателями. Коэффициент фильтрации (K_f) изменяется от 0,001 до 0,01 м/сут. Ниже верхней трещиноватой зоны кристаллических пород развиты жильные воды на глубинах до 500 м, которые приурочены к зонам тектонических нарушений и контактам интрузивных тел. Основное питание подземных вод как четвертичных отложений, так и коренных пород осуществляется за счет атмосферных осадков.

По химическому составу подземные воды кристаллического фундамента относятся к гидрокарбонатно-натриево-калиевым, слабоминерализованным. Минерализация колеблется в пределах 66–116 мг/л. Воды мягкие, жесткость не превышает 11 мг-экв/л со слабокислой и слабощелочной реакцией. Общая направленность движения подземных вод на территории Мурманского блока определяется дренирующим влиянием Баренцева моря, которое служит основным базисом всего континентального стока этого района.

3.2.1. Особенности геологических условий потенциальных участков захоронения РАО на Кольском полуострове

Принципиальная возможность строительства пунктов захоронения РАО на глубинах свыше 200 м на территории Кольского полуострова рассмотрена в монографии Н. Н. Мельникова, В. П. Конухина и В. Н. Комлева [13].

К геологическим особенностям территории Кольского полуострова авторы относят высокую степень нарушенности скальных массивов за счет разрывов и трещиноватости, встречающихся даже на значительных глубинах. В связи с отсутствием водоупорных слоев, подземные воды четвертичных отложений и кристаллических пород гидравлически связаны между собой и образуют общее зеркало подземных вод, из-за чего фундамент Кольского региона уязвим к любым факторам загрязнения. Это подтверждается имеющимся негативным опытом хранения на поверхности и приповерхностного захоронения радиоактивных отходов и материалов в Северо-Западной части России на береговых технических базах ВМФ и других объектах.

Из 16 изученных сотрудниками Горного института Кольского научного центра РАН (КНЦ РАН) площадок 14 — месторождения облицовочного камня, в том числе уникальное месторождение поделочного камня Одьярв. Все они сравнительно хорошо изучены бурением и дают представления о свойствах потенциально пригодных пород-аналогов для перспективных площадок. На территории Мурманской области авторами монографии были рассмотрены различные типы горных пород, в том числе интрузивные гранитоиды Лицко-Арагубского комплекса и чарнокитовые граниты сближенных массивов Умбинского комплекса. По результатам региональных исследований авторы посчитали самыми перспективными для размещения РАО условия, характерные для площадок Кузрека и Дальние Зеленцы.

Площадка Кузрека расположена в 800 м от берега Белого моря в границах Умбинского гранитоидного массива. По данным поисково-разведочных работ на облицовочный камень, проницаемость Умбинского гранитоидного массива по результатам откачек 4-х скважин изменяется от 5×10^{-3} — 2×10^{-2} м/сут до 1,6 м/сут. Глубина развития водоносного горизонта трещинных вод свыше 100 м. Наблюдается родниковая разгрузка подземных вод в долины рек Умбинского заповедника.

Площадка Дальние Зеленцы расположена в 10 км к востоку от одноименного поселка и в 1,8 км от берега Баренцева моря. В 1984—1985 гг. на этой площадке, которая тогда назвалась «Гранитный», ВНИПИпромтехнологии проводил инженерно-геологические работы по обоснованию возможности сооружения подземного хранилища нефтепродуктов для нужд Северного Флота.

Площадка локализована в пределах гранитного массива и приурочена к возвышенности, окруженной озерами, сообщающимися по протокам и по р. Зарубихе с Баренцевым морем. В пределах массива выделено пять систем тектонических нарушений, разбивающих массив на многочисленные блоки. Один из блоков размером 400 × 700 м изучен более детально комплексом геологических работ, включающих бурение трех разведочных скважин глубиной до 600 м.

Мощность перспективных порфировидных гранитов, полого залегающих на толще мигматитов, составляет от 326,9 до 456,2 м. До глубины 80—100 м отмечена открытая трещиноватость, связанная с процессами выветривания. Ниже зоны гипергенеза скважинами вскрыт ряд зон повышенной трещиноватости и дробления. Мощность их колеблется от первых сантиметров до 8,1 м.

Объединенный гидрогеологический горизонт трещинных вод в покровных и коренных породах при опробовании скважин на всю глубину (0—600 м) дал удельные дебиты около 0,01 л/с.

Высокая степень тектонической нарушенности вмещающих горных пород, характерная для площадки, связывается с геодинамической активностью в новейшее время Кильдино-Иоканьгской зоны глубинных разломов.

Поиск потенциально пригодной площадки для целей захоронения РАО было рекомендовано сместить южнее и западнее в сторону увеличения мощности порфиридных гранитов.

К 2000 г. изучение перспективных участков на Кольском полуострове и в Северо-Западном регионе в целом получило определенное развитие. Северо-Запад стал рассматриваться как территория для перспективных разработок моделей захоронения на основе уже существующих баз геологических данных. Это соответствовало международному подходу к изучению геологических формаций-аналогов и созданию на этой основе обобщенных моделей захоронения РАО. Модель радиогеоэкологического обеспечения безопасного подземного захоронения РАО в скальных породах Кольского полуострова, разработанная Горным институтом КНЦ РАН [14], названа в числе основных результатов в отчете о деятельности РАН в 2000 г. [3, 15].

3.2.2. Международное сотрудничество в изучении альтернативных участков

В этот же период организации Северо-Запада России активно сотрудничали с зарубежными организациями и фондами (см. табл. 3.1) [3].

В г. Апатиты 15–16 марта 2000 г. состоялось международное рабочее совещание по итогам выполнения второй фазы проекта NUCRUS 95410 [3] программы TACIS (англ. — Technical Assistance for the Commonwealth of Independent States, Техническая помощь Содружеству Независимых Государств) [16]. На совещании был подтвержден официальный статус проекта NUCRUS 95410, отмечен значительный прогресс в развитии работ и принято решение начать подготовку третьей фазы работ — детальное исследование перспективных площадок, выбранных на основе базы данных о полезных ископаемых региона, и проектирование общего для Мурманской и Архангельской областей объекта размещения отходов, включая отработавшее ядерное топливо и реакторные отсеки демонтируемых АПЛ, создание регионально-го Центра информирования и образования населения по ядерным проблемам.

К третьему этапу проекта к уже известным участкам Дальние Зеленцы и Куз-река были добавлены другие участки в Мурманской и Архангельской областях (например, базальты горы Шапочка на границе с Карелией). Кристаллические массивы этих площадок получили высокую оценку. Результаты комплексной оценки площадок по проекту NUCRUS 95410 отражают и негативные аспекты даже самых перспективных площадок. Если выполненные радиологические оценки и предусмотренные технологии изоляции исключали вынос радиоактивности в биосферу, то процессы строительства и эксплуатации объектов могли оказывать значимое воздействие на особо охраняемые природные территории или серьезно нарушить среду обитания отдельных биологических видов. Аргументированно выбрать одну заведомо лучшую площадку из четырех наиболее перспективных и практически равнозначных с помощью предложенной западными экспертами системы критериев оказалось невозможным.

Проект NUCRUS 95410 (1996–2000 гг.) отражал наиболее полные и комплексные сравнительные исследования в России применительно к альтернативным территориям крупного Северо-Западного региона [3].

В начале 2000-х гг. финансирование проектов на Кольском полуострове было прекращено в связи с изменениями в политике и планах Минатома России в отношении обращения с ОЯТ и РАО.

3.3. Южный Урал (ПО «Маяк»)

Территория в районе ПО «Маяк» (Челябинская область) была включена в число кандидатов для захоронения отверженных ВАО по нескольким причинам. Здесь расположено крупное радиохимическое производство, геологические условия исключали закачку жидких РАО в глубоко залегающие горизонты, хранилища на поверхности стали источником аварийного загрязнения окружающей среды.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Производственное объединение «Маяк» (ФГУП «ПО Маяк») — крупнейшее радиохимическое предприятие Федерального агентства по атомной энергии (Росатома) — расположено в Челябинской области, на восточном склоне Уральского горного хребта. Предприятие начало свою работу в 1948 г. на основании постановления Совета народных комиссаров СССР «О заводе № 817» от 1 декабря 1945 г. [17] для производства оружейного плутония, выработка которого продолжалась на предприятии до 1986 г. В процессе выполнения военных заказов, а также переработки ОЯТ с АЭС на промплощадке предприятия накапливались различные виды РАО, в числе которых жидкие высокоактивные отходы (ВАО), хранящиеся на промплощадке предприятия в специальных емкостях. С 1987 г. жидкие ВАО отверждаются на заводе РТ-1 в стеклоподобные алюмофосфатные матрицы, которые подлежат захоронению.

Подземная изоляция ВАО изначально планировалась исключительно в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) ПО «Маяк», что позволило бы исключить транспортировку этих опасных отходов по дорогам общего пользования. Работы, связанные с выбором полигона, приемлемого для сооружения могильника ВАО, вначале проводились на территории ПО «Маяк» в период с 1970 по 1987 г. специалистами ВНИПИпромтехнологии [18]. Работы по комплексному изучению геолого-гидрогеологических условий проводились на площадке «Марс-2» площадью 0,25 км², находящейся в пределах СЗЗ предприятия. Здесь было пробурено несколько скважин глубиной от 300 до 1200 м. В этих скважинах, наряду с отбором керна для изучения, были проведены геофизические и гидрогеологические исследования. Они, в частности, показали, что в массиве пород развиты несколько зон повышенной трещиноватости. Эти зоны залегают до глубины 100 м. Ниже в монолитной толще раннепалеозойских лавобрекчий, туфов и туфолов порфиритов отмечаются единичные трещины и участки повышенной трещиноватости. Трещины полностью залечены кварц-карбонатным, серицитовым и хлоритовым материалом. Признаков тектонических перемещений в виде зеркал скольжения и глинки трения не отмечено. В интервале глубин от 100 до 1200 м средняя проницаемость ($K_{\text{общ}}$) по разрезу постепенно снижается, коэффициенты фильтрации составляют от $n \times 10^{-2}$ до $n \times 10^{-5}$ м/сут. Ниже глубины 700 м порода становится практически непроницаемой, коэффициент фильтрации составляет $n \times 10^{-4}$ и менее.

К сожалению, эти работы не получили развития. Одной из причин явилось изменение подхода к выбору схемы захоронения: от пункта захоронения скважинного типа на небольшом по площади участке (который мог быть реализован на площадке «Марс-2») до сооружения с разветвленной подземной инфраструктурой. Тем не менее керн скважин, а также результаты скважинных геофизических каротажей и гидрогеологических испытаний явились важными фактическими материалами, которые были использованы при дальнейшей характеристике глубинного строения центральной части СЗЗ ПО «Маяк».

Начиная с 1992 г., по согласованию с руководством предприятия ПО «Маяк», в пределах СЗЗ и прилегающей к ней территории силами специалистов ИГЕМ РАН и других академических институтов были развернуты комплексные геолого-геофизические, тектонофизические, геоморфологические, минералого-геохимические, структурно-петрофизические, ландшафтно-геохимические и гидрогеохимические исследования, направленные на выбор геологической формации и полигона для создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) и объекта для захоронения отвержденных ВАО. Финансирование этих работ осуществлялось Минатомом, РАН, МНТЦ и РФФИ.

3.3.1. Общие сведения о геологическом строении территории ПО «Маяк» и ее обрамления

В силу длительности ограниченного доступа на территорию СЗЗ кондиционных геологических карт масштаба 1:250 000 — 1:25 000, позволяющих провести оценку характеристик геологической среды для подземной изоляции ВАО и ОЯТ в районе ПО «Маяк», до начала работ в 1992 г. не существовало. В связи с этим были предприняты беспрецедентные усилия для получения этих материалов, включая поиск и описание всех доступных для картирования обнажений коренных пород от г. Касли (на севере) и г. Карабаш (на юге), в том числе карьеров, выемок, канав и трасс трубопроводов, пройденных в промышленных и народно-хозяйственных целях.

Территория ПО «Маяк» расположена на восточном склоне Уральского горного хребта в зоне сочленения складчатой области и субплатформы. Здесь сочетаются три крупных геологических мегаблока субмеридионального простираения, разделенные региональными разломами глубокого заложения: Западный, сложенный допалеозойскими—раннепалеозойскими (PR_2 — PZ_1) гнейсо-амфиболитовыми породами, прорванными гранодиоритами и габбро, Центральный, образованный среднепалеозойским (S_1 — D_1) осадочно-вулканогенным комплексом, и Восточный, сложенный позднепалеозойскими (C_{1-2}) карбонатно-терригенными образованиями (рис. 3.5).

Наиболее полно изучена толща метавулканитов Центрального блока, которая составляет основную часть территории СЗЗ. Максимальная мощность комплекса, установленная на основе структурных и геофизических данных, составляет 2—3 км. Осадочно-вулканогенные породы смяты в синклинальную складку, называемую «Горненской синклиналью», ось которой ориентирована в субмеридиональном направлении. Крылья синклинали осложнены многочисленными складками более высоких порядков вплоть до микроплотчатости. Породы осадочно-вулканогенного комплекса представлены лавами, лавобрекчиями и туфолавами андезито-базальтовых порфиритов, их туфами различной зернистости, туфопесчаниками и туфоалевролитами, а также сланцами, образованными в результате динамометаморфизма этих пород. Осадочно-вулканогенные породы слагают две свиты (рис. 3.6).

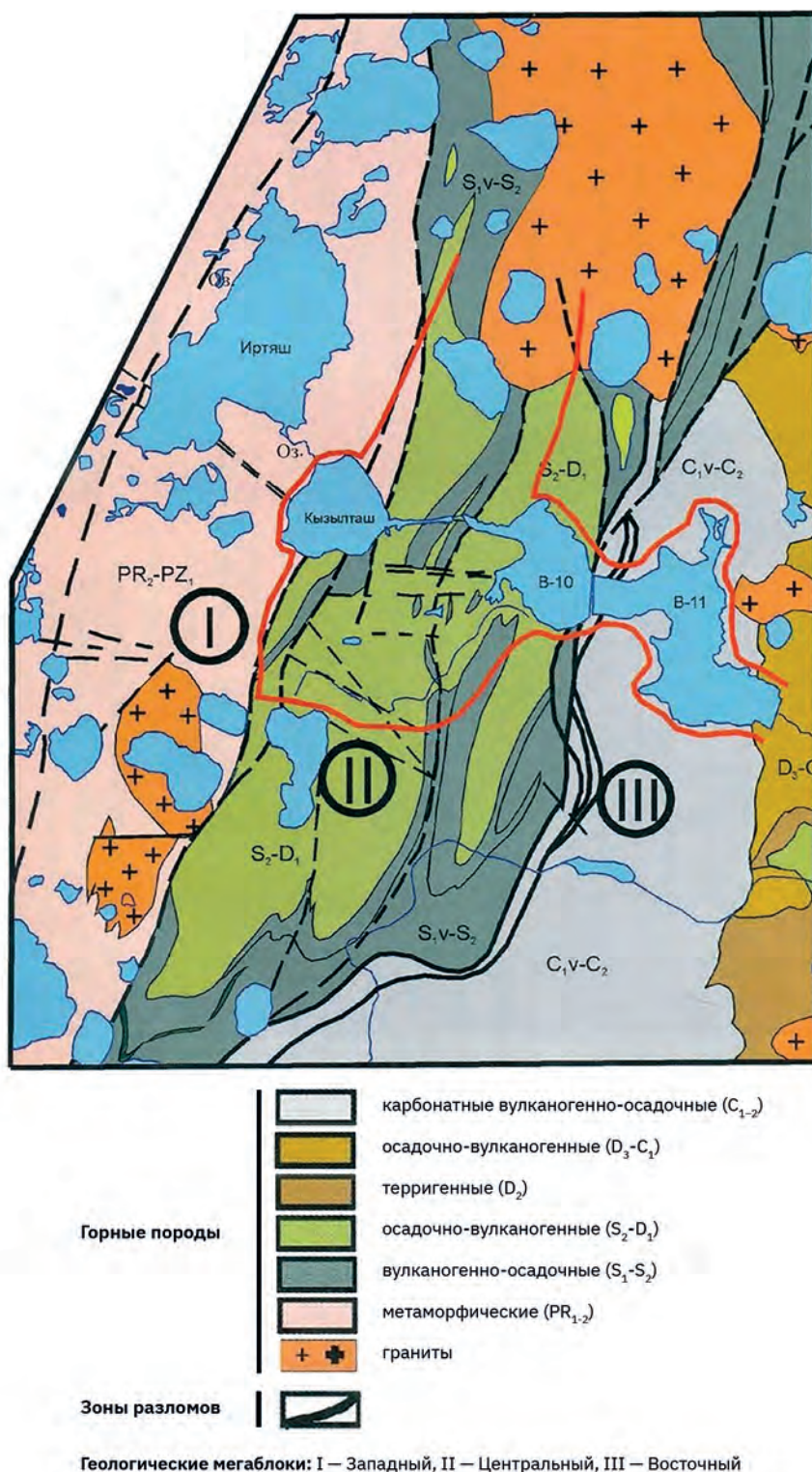


Рис. 3.5. Геологическое строение района ПО «Маяк» (исходный масштаб 1:100 000) [19]

Стратиграфические подразделения

	миасская свита, верхняя подсвита $C_{1-v2-3-n}$
	миасская свита, нижняя подсвита $C_{1-v2-3-n}$
	асановская свита D_3-C_1
	нерасчлененные вулканогенно-осадочные образования S_2-D_1 возраста
	сергайдинская свита S_2-D_{1sr}

	назировская свита, верхняя подсвита $S_{1v}-S_{2nz2}$
	назировская свита, нижняя подсвита $S_{1v}-S_{2nz1}$
	нерасчлененные образования PR_3-PZ_1 возраста

Литологические разновидности пород

	сланцы хлорит-серицитовые, кварц-альбит-серицит-хлоритовые, (глинистые, углисто-глинистые)
	сланцы кварц-серицит-хлоритовые, микрокварциты (кремнистые, углисто-кремнистые)
	туфоалевролиты, туфопесчанники, кремнистые туффиты с элементами слоистости
	алевро-псаммитовые и псаммитовые туфы
	туфы мелкопсефитовые
	туфы крупнопсефитовые до агломератово-глыбовых
	лавы, лавобрекчии, пироксен плагиоклазовых порфиритов андезито-базальтового состава
	туфолавы андезит-базальтовых порфиритов
	органогенные известняки, доломитизированные, доломиты

	известняки мраморизованные, мраморы
	кристаллические сланцы, гнейсы биотитовые, биотит-амфиболовые, образованные за счет средне-кислых эффузивов
	амфиболиты
	хлоритовые сланцы
	сланцы кварц-альбит-хлорит-серицитовые, образованные по вулканитам S-D возраста
	нерасчлененные вулканогенно-осадочные образования S_2-D_1 возраста

Интрузивные породы

	габбро, габбро-пироксениты
	граниты, гранодиориты

	границы структурно-формационных комплексов
	границы а – стратиграфические б – фациальных разновидностей пород
	разрывные нарушения а – установленные б – предполагаемые
	разрывы Аргаяшского надвига
	зоны интенсивной сланцеватости

Элементы залегания

	слоистости
	сланцеватости и разрывных нарушений
	инженерно- и гидрогеологические скважины
	контур ореола загрязнения от оз. Карачай

Обе свиты близки по петрографическому составу, но отличаются различными соотношениями лавового, пирокластического и вулканогенно-осадочного материала. Верхняя свита — существенно вулканогенная, нижняя — вулканогенно-осадочная. Породы повсеместно, но с различной интенсивностью, подвержены регионально-метаморфическим преобразованиям зеленосланцевой фации, соответствующим актинолит-эпидотовой, хлорит-эпидотовой и хлорит-карбонатной ступеням. Эти процессы обусловили нивелирование петрохимических свойств пород.

На большей части территории ПО «Маяк» палеозойские скальные породы залегают под чехлом рыхлых образований, которые представлены продуктами выветривания этих пород и четвертичными отложениями. В обобщенном вертикальном разрезе коры выветривания выделяются три зоны: верхняя, состоящая в основном из гипергенных глин; средняя, в которой реликты коренных пород заключены в массе глинистых и других гипергенных минералов; и нижняя, представленная интенсивно трещиноватыми коренными породами и глинистыми минералами, «выстилающими» стенки трещин. Мощность коры выветривания изменяется от единиц до 100—150 м в зонах разломов. Четвертичные глинисто-песчаные отложения мощностью до первых десятков метров распространены в отдельных блоках рассматриваемой территории.

Район ПО «Маяк» характеризуется интенсивной, но неравномерной тектонической нарушенностью. По морфогенетическим особенностям, времени заложения (от более древних к более молодым) и масштабам проявления разрывные нарушения представлены: (1) глубинными разломами; (2) зонами рассланцевания; (3) милонитовыми швами и зонами брекчирования; (4) системами трещин. Глубинные разломы и зоны рассланцевания являются региональными межблоковыми, а милонитовые швы, зоны брекчирования и системы трещин — внутриблоковыми структурами. Преобладающими являются линейные зоны рассланцевания и повышенной трещиноватости складчатого заложения, а также милонитовые швы и зоны дробления с различным минеральным выполнением. Перечисленные тектонические элементы образуют протяженные (многие километры) мощные (сотни метров) региональные разломы субмеридионального, северо-западного и субширотного направлений, отдельные тектонические швы которых нередко «омоложены» подвижками позднечетвертичного возраста. Современная активность разломов субмеридионального и северо-западного направления подтверждается наличием в них гелиевых аномалий высокой интенсивности [20].

Региональные разломы разделяют территорию ПО «Маяк» на серию разобщенных блоков относительно небольших размеров. Последние характеризуются существенно меньшей тектонической нарушенностью, однако и в них выявляются разрывные нарушения более высоких порядков: зоны интенсивного рассланцевания и брекчирования, милонитовые швы и системы сближенных трещин. Основной каркас тектонических нарушений был сформирован на заключительном этапе позднепалеозойского складкообразования. Многие разрывы обновились в процессе деформаций в мезозое. В процессе кайнозойского тектогенеза ряд разломов выступал в роли рельефообразующих, одновременно возникали отдельные новообразованные зоны повышенной трещиноватости.

Рельеф поверхности района сформировался в течение разновозрастных эпох пенепленизации: позднемеловой, позднеолигоценовой, позднемиоценовой и плиоцен-четвертичной. В указанные эпохи образовывались поверхности выравнивания, на которых накапливались рыхлые осадки соответствующих возрастов, занимающие определенные уровни в современном рельефе [21, 22].

Современный геодинамический режим района ПО «Маяк» характеризуется как постплатформенная тектоническая активизация низкой интенсивности. В соответствии с существующей схемой сейсмического районирования район находится в зоне вероятностных проявлений землетрясений с интенсивностью не более шести баллов. Эпицентры ранее наблюдавшихся землетрясений зафиксированы к западу и северо-западу от объекта [23].

Подземные воды в районе ПО «Маяк» приурочены к трещинной зоне коры выветривания (безнапорные трещинные и трещинно-карстовые воды), покровным рыхлым отложениям (пластово-поровые воды) и разрывным нарушениям в складчатом основании (напорные трещинно-жильные воды). Наиболее распространены пресные метеорные воды. Глубина интенсивной циркуляции инфильтрационных вод в среднем колеблется от 40 до 120 м. В зонах региональных тектонических нарушений, на глубинах более 1 км, развиты рассолы хлоридно-натриевого состава, характерные для застойного гидродинамического режима подземных вод [24].

В региональном отношении район представляет собой гидродинамическую систему с одним безнапорным водоносным горизонтом в зоне приповерхностной трещиноватости, который локально осложнен более глубоко проникающими линейными водоносными зонами, развитыми вдоль тектонических нарушений. Подземные воды в обоих типах трещинных коллекторов находятся в водообмене с поверхностью и формируют подземный поток, который направлен в основном с запада на восток. При этом поверхность зеркала подземных вод повторяет в сглаженной форме рельеф земной поверхности. Результаты численного решения задачи региональной фильтрации для территории ПО «Маяк» для различных моделей переноса радионуклидов показали, что основная неопределенность в прогнозных оценках скорости переноса связана с неясной ролью процессов трещинной миграции [25].

3.3.2. Геолого-геофизические исследования

При отсутствии кондиционных геологических материалов, необходимых для оценки характеристик среды для подземной изоляции ВАО и ОЯТ, существенное значение приобрел комплекс разномасштабных геолого-съёмочных изысканий, сопровождавшийся набором дополнительных специализированных исследований и формированием коллекции образцов пород для лабораторных испытаний. Среди специализированных изысканий выделим геоструктурно-тектонифизические, петрографо-минералогические, петрофизические и гидрогеохимические исследования, позволившие выявить ключевые параметры геологической среды.

Детальными структурно-геологическими и тектонифизическими исследованиями в районе ПО «Маяк» было выявлено три этапа деформаций, в результате которых формировались разновозрастные структурные парагенезисы: герцинский, мезозойский и кайнозойский [26].

Наиболее распространенные представления относительно природы неотектонического поднятия Урала приписывают ведущую роль в его возникновении горизонтальному ССВ-субширотному сжатию литосферы, которое обусловлено динамическим влиянием Уфимского выступа Восточно-Европейской платформы. Суммарная амплитуда неотектонического поднятия Урала за новейший период составила 300–400 м [27]. Оценка неотектонической активности района ПО «Маяк», проведенная по анализу абсолютных уровней залегания позднемиоценовой поверхности выравнивания, показала [22], что амплитуды плиоцен-четвертичных вертикальных движений тектонических блоков колебались от единиц до 10–15 м.

Современное напряженно-деформированное состояние (НДС) геологической среды на региональном уровне является унаследованным, когда план региональных деформаций сохраняется по крайней мере с голоцена, т. е. около 10 000 лет. Региональный план современных деформаций находит отражение в локальной картине НДС геологической среды района ПО «Маяк» (рис. 3.7).

Геолого-структурные, тектонофизические и геофизические данные указывают на то, что в развитии палео- и современных полей напряжений прослеживается явная унаследованность. Это позволило предполагать, что в течение ближайших 10 000 лет картина распределения напряжений в районе ПО «Маяк» будет, по-видимому, аналогична существующей. В этой ситуации наибольшей способностью к фильтрации подземных вод и переносу радионуклидов будут обладать разломно-трещинные системы, ориентированные под острым углом к оси максимальных сжимающих усилий с кинематической характеристикой отрывов и сдвигов.

Минералого-геохимические исследования показали наличие в составе вмещающих пород вулканитов лавового и пирокластического генезиса, а также присутствие осадочно-пирокластических образований [29].

В составе вулканитов основная роль принадлежит вторичным минералам, образовавшимся при зеленокаменном метаморфизме. Метаморфические процессы привели к полной девитрификации вулканического стекла и деанортизации первичного плагиоклаза. В табл. 3.2 отражены средние составы пород района ПО «Маяк», рассчитанные по результатам более 100 химических анализов.

Комплекс структурно-петрофизических исследований включал определение плотности, эффективной пористости и проницаемости матрицы пород, тесты по выявлению модулей Юнга и сдвига, коэффициента Пуассона, скоростей упругих волн и их анизотропии.

Эти исследования показали, что изменения исходных метавулканитов в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма привели к формированию относительно однородной не только по текстурным, но и петрофизическим свойствам среды, что отчетливо проявлено вне зон дислокаций [30, 31]. Основные вариации петрофизических параметров и минерально-химических свойств пород связаны с зонами дислокаций, где широко развиты бластомилонитовые, катакластические и брекчиевые текстуры. Здесь породы обладают пониженными упругими характеристиками и механической устойчивостью, но повышенной фильтрационной способностью (рис. 3.8).

Хотя катаклаз, милонитизация и рассланцевание увеличивают водопроницаемость вулканитов, они вместе с тем приводят к развитию в микротрещинах и порах сорбционноемких вторичных минералов, ограничивающих миграцию большинства радионуклидов [32]. Таким образом, тектоническая проработка вулканитов, понижая уровень физической изоляции ВАО, одновременно приводит к увеличению уровня геохимической изоляции радионуклидов.

Интегральные геохимические свойства вулканогенных пород ПО «Маяк» исследовались путем лабораторных измерений pH-Eh водных растворов, равновесных с этими породами, и натурных исследований вертикальной гидрогеохимической зональности подземных вод в толще осадочно-вулканогенных пород. Изучены также взаимодействия указанных пород с различными радиоизотопами. При этом определялись емкостные нейтрализационные и восстановительные, катионообменные и сорбционные свойства вулканитов по отношению к наиболее распространенным радионуклидам.

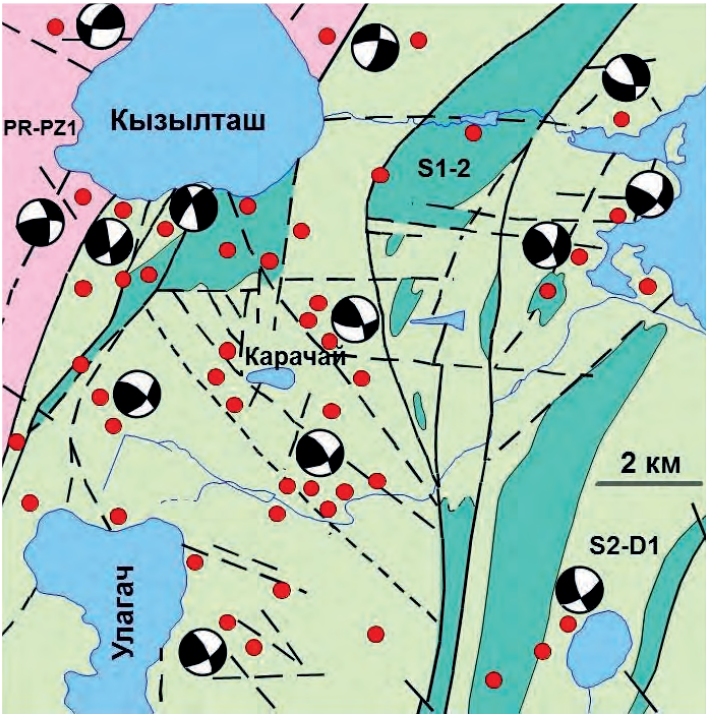


Рис. 3.7. Ориентировка оси главных сжимающих напряжений (черные сектора) в центральной части СЗЗ ПО «Маяк» по данным стрейн-анализа [28]
Красные кружки — места измерений и отбора проб на минералого-петрографические и петрофизические исследования

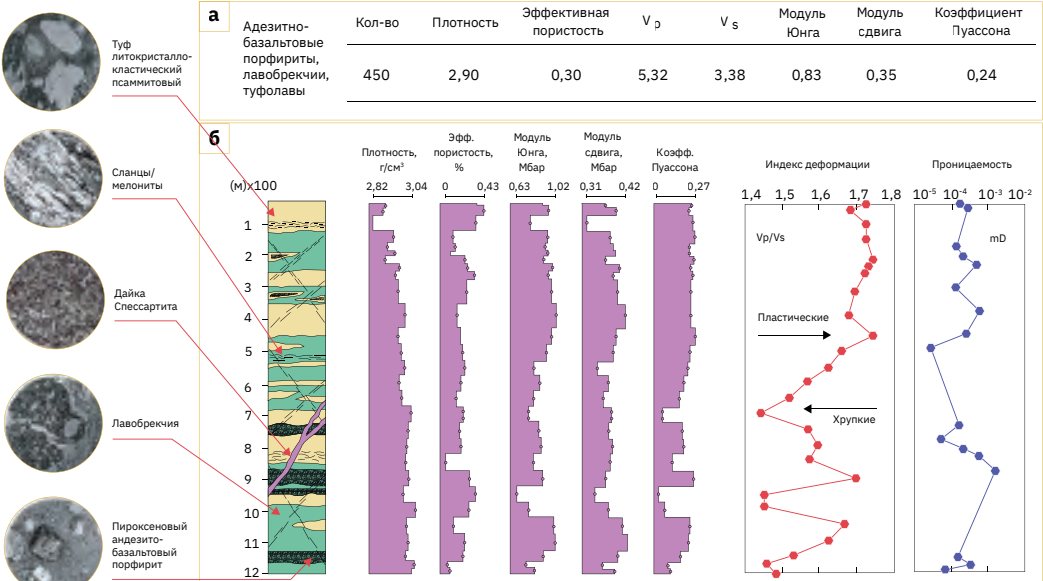


Рис. 3.8. Результаты структурно-петрофизических исследований [31]
а — средние значения петрофизических параметров метавулканитов территории ПО «Маяк»;
б — вариации параметров в разрезе скв. 8001–8002, участок «Марс-2»

Таблица 3.2. Состав пород вулканогенно-осадочной толщи района ПО «Маяк»

Окисел, масс. %	Петрографические разновидности пород*							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	49,52	50,35	48,49	48,51	44,08	57,11	90,78	60,68
TiO ₂	0,87	0,94	0,77	0,82	0,69	0,65	—	0,58
Al ₂ O ₃	13,84	14,39	13,17	13,30	12,96	15,30	0,63	14,84
Fe ₂ O ₃	3,07	3,18	2,92	3,34	2,23	8,23	—	3,08
FeO	6,59	7,05	6,03	6,45	7,31	0,65	0,46	1,87
MnO	0,16	0,17	0,15	0,18	0,15	0,08	0,03	0,08
MgO	8,38	8,74	7,93	9,48	8,35	1,14	0,04	4,13
CaO	9,27	7,83	11,03	9,99	9,41	15,40	4,50	6,03
Na ₂ O	3,33	3,15	3,56	3,04	0,08	0,26	0,03	5,79
K ₂ O	0,51	0,60	0,41	0,49	2,23	0,03	0,06	0,70
P ₂ O ₅	—	—	—	—	0,10	0,16	—	—
CO ₂	1,36	0,16	2,83	1,31	7,15	0,10	3,35	0,54
H ₂ O	3,10	3,44	2,68	3,09	5,25	0,90	0,13	1,68
Количество образцов	110	55	9	5	3	2	2	2

* Цифрами обозначены средние составы вулканогенно-осадочной толщи в целом (1), вулканитов лавового происхождения (2), туфов (3), туфоалевролитов (4), хлорит-серицитовых сланцев (5), эпидит-кварцевой брекчии (6), кварц-карбонатных прожилков (7), спессартитов (8).

Установлено [33], что pH водных растворов, равновесных с вулканитами среднего-основного состава, не подверженными гипергенным изменениям, определяется диапазоном 7,5–8,2. Eh тех же вод, равновесных с аналогичными породами, колеблется от –80 до –400 мВ, но в большинстве случаев находится в промежутке между –150 и –250 мВ.

В гидрогеологическом разрезе района ПО «Маяк» выделяются две гидродинамические зоны с различными физико-химическими параметрами. Верхняя зона, распространяющаяся до глубин 40–80 м, приурочена к зоне экзогенной трещиноватости. Воды этой зоны слабокислые и близонейтральные (pH 6,4–7,2), окислительные (Eh от +200 до +480 мВ), кислородосодержащие (5–12 мг/л), слабоминерализованные (M 90–200 мг/л). Они агрессивны по отношению к вмещающим вулканитам, выщелачивая из них карбонаты, сульфаты, силикаты. Воды нижней зоны залегают глубже 40–80 м. Они контролируются разрывными структурами складчатого основания. Эти воды отличаются слабоокислительными (Eh < +120 ÷ –120 мВ) и слабощелочными (pH 8–8,5) свойствами, малое содержание кислорода (0–4 мг/л), повышенная минерализация (400–600 мг/л).

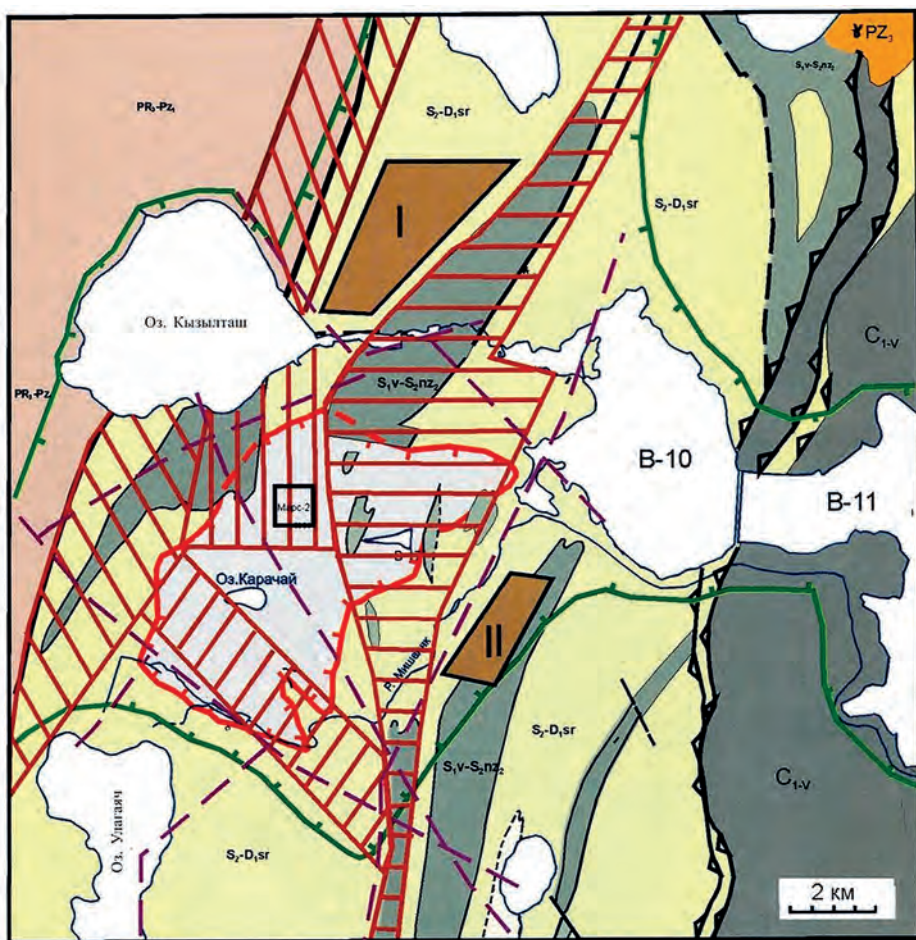
Учитывая выявленную гидрогеохимическую зональность, следует ожидать, что на глубинах предполагаемого захоронения БАО (гипсометрический уровень около –500 м) подземные воды будут находиться в режиме замедленной циркуляции и обладать слабощелочными-близнеутральными восстановительными свойствами, неблагоприятными для миграции большинства радионуклидов. Нейтрализационная, восстановительная, катионообменная и сорбционная емкости рассматриваемых вулканитов в отношении стронция-90, цезия-137 и актинидов обуславливают задержку их переноса подземными водами, равновесными с этими породами, соответственно в десятки, сотни и тысячи раз, по сравнению со скоростью фильтрации самих вод [33].

Итогом проведенных в районе ПО «Маяк» комплексных исследований явились: выбор пригодной для захоронения отвержденных БАО геологической формации; выявление и детальная характеристика основных элементов геологической структуры СЗЗ ПО «Маяк» и прилегающих территорий; реконструкция истории их формирования; оценка современного геодинамического состояния геологической среды; выделение участков, перспективных по размерам, минеральному составу пород, их петрофизическим свойствам и напряженно-деформированному состоянию для размещения ПИЛ и ПГЗРО (рис. 3.9).

Показано, что подавляющая часть пород вулканогенно-осадочной толщи:

- *в ненарушенном состоянии характеризуется высокой механической устойчивостью и низкой эффективной пористостью, которую сохраняют при повышении температур вплоть до 400 °С;*
- *обладает достаточно высокой сорбционной и катионной емкостью и создает в равновесной с ними водной среде восстановительную нейтральную-слабощелочную обстановку, неблагоприятную для миграции наиболее распространенных радионуклидов;*
- *при давлениях и температурах, имитирующих наиболее вероятные условия эволюции пунктов захоронения БАО, подвергается гидратации и карбонатизации, в ходе чего возникают новообразованные сорбционноемкие минералы, «залечивающие» трещинно-поровое пространство пород и повышающие их сорбционные свойства.*

Приведенные данные позволили заключить, что вулканические породы основного состава, слагающие большую часть территории СЗЗ ПО «Маяк», пригодны для размещения в них объектов глубинного захоронения теплогенерирующих ядерных материалов. Однако решение о продолжении детальных исследований на выявленных перспективных участках принято не было, что связано с изменением общих подходов к выбору региона для создания пункта глубинного захоронения РАО.



Горные породы

	известняки (C_{1v})
	осадочно-вулканогенные (S_2-D_{1sr})
	кремнисто-туфогенные ($S_{1v}-S_{2nz2}$)
	метаморфические (PR_3-P_{z1})
	разломные зоны
	граница ореола радиоактивных натриево-нитратных подземных вод
	новейшие тектонические швы
	граница СЗЗ
	перспективные участки

Рис. 3.9. Положение участков I и II, перспективных для создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, на карте тектонического районирования территории ПО «Маяк» (исходный масштаб 1:25 000) [19]

3.4. Красноярский край (обзорные работы 1992–1993 гг.) *

Исследования по поиску геологических формаций и площадок для строительства подземного комплекса (ПГЗРО) с целью изоляции отвержденных высокоактивных отходов Горно-химического комбината (ГХК, г. Железногорск) начались в 1993 г. в рамках задания Министерства по атомной энергии Российской Федерации. Планировалось разместить в этом ПГЗРО отходы проектировавшегося в то время завода по переработке ОЯТ (РТ–2).

В конце 1992 г. [34, 35] по поручению Минатома России был сформирован коллектив специалистов, представляющих предприятия атомной отрасли, Российской академии наук, Министерства науки и образования, а также геологические организации Красноярского края. В дальнейшем количество участников возросло в основном за счет привлечения красноярских специализированных предприятий. Научное руководство и координация работ по поиску и выбору площадки были возложены на Радиевый институт им. В. Г. Хлопина и персонально на заместителя генерального директора, доктора геолого-минералогических наук Е. Б. Андерсона.

План работ составлялся в соответствии с опубликованными в то время рекомендациями МАГАТЭ [36–38], методическими основами поисково-разведочных работ [39] и существовавшими на то время нормативными документами РФ [40]. Геологические исследования выполнялись поэтапно, причем на каждом этапе площадь рассматриваемой территории сужалась, и создавались условия для повышения детальности работ.

Для поисково-аналитических работ была разработана концепция перспективных структур и специальные, приемлемые для исследуемых геологических формаций критерии выбора [41, 42]. В их основу было положено главное требование: перспективный литосферный блок должен быть сравнительно однородным при малой проницаемости и водонасыщенности.

Территория обзора (screening — по международной классификации этапов выбора) первоначально охватывала краевые части трех глобальных геологических структур на их стыке — Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской орогенической зоны (рис. 3.10). Территория составляла около 22 000 км²; по ней была собрана и проанализирована следующая информация:

- геологические, геофизические и специализированные карты различных масштабов;
- отчеты по геологической съемке, поискам полезных ископаемых, гидрогеологическим исследованиям, изучению тектоники, специальным геофизическим (аэрогеофизическим, гравиметрическим и др.) и геодезическим работам, анализу различных геологических процессов;
- аэрофотоснимки, спутниковые снимки, топокарты различных масштабов;
- научные публикации по исследуемому району.

* Раздел является несколько измененным фрагментом публикации, подготовленной сотрудниками Радиевого института им. В. Г. Хлопина под руководством Е. Б. Андерсона в 2006 г. [34].

На территории Сибирской платформы рассматривались соляные отложения Канско-Тасеевской впадины, образованные в результате крупной трансгрессии в начале кембрия. По имеющимся данным [43, 44], соленосные формации этой впадины ни по составу пород, ни по мощности пластов каменной соли не удовлетворяли критериям выбора площадок для подземной изоляции РАО. Чехол Западно-Сибирской плиты сложен юрскими слабо литифицированными осадочными породами, не являющимися оптимальной средой для подземной изоляции. Определенные ограничения ставила также потенциальная нефтегазоносность этого региона. Алтае-Саянский ороген примыкает к Центрально-Азиатскому складчатому поясу и характеризуется повышенной сейсмичностью и высокими скоростями вертикальных тектонических движений.

К середине 1993 г. группа экспертов выбрала в качестве наиболее перспективных для поисков геологические формации *Южно-Енисейского кряжа* (Ангаро-Канский выступ). Этот регион является краевой структурой фундамента древней Сибирской платформы, отделенной от более молодых комплексов Енисейского кряжа трансрегиональной ангарской зоной глубинных разломов.

Южно-Енисейский кряж имеет длительную, многоэтапную историю развития, прослеживающуюся от архейской эры (более 2,5 млрд лет назад) до неотектонических блочных движений в наше время. Тем не менее именно среди формаций Южно-Енисейского кряжа можно было выделить перспективные участки: *крупные блоки, сложенные формациями малопроницаемых магматических или метаморфических пород.*

В частности, указывалось, что в биотитовых гнейсах атамановской толщи на правом берегу р. Енисей размещен подземный комплекс ГХК, эксплуатируемый (к тому времени) почти 40 лет. Многолетние натурные, лабораторные и аналитические исследования дали исключительно ценную информацию о геологическом строении и поведении гнейсовых толщ под влиянием многофакторных техногенных воздействий, что было подтверждено более поздними публикациями [45, 46] (см. также раздел 4.3 ниже).

Поиск геологических формаций и площадок для строительства ПГЗРО в Красноярском крае начался в 1993 г. План обзорных работ был составлен в соответствии с существовавшими на то время рекомендациями МАГАТЭ и российскими нормативными документами. Геологические исследования начались с обзора обширной территории на сочленении Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской орогенической зоны. В числе перспективных формаций рассматривались соляные отложения, осадочные и кристаллические породы. Выбор пал на малопроницаемые магматические и метаморфические формации Южно-Енисейского кряжа.



Рис. 3.10. Расположение глобальных геологических структур по отношению к Горно-химическому комбинату (г. Железногорск)

3.4.1. Геологическая характеристика Нижнеканского массива и его обрамления

Поисково-аналитические научные исследования, выполненные в 1992—2005 гг., показали, что в наибольшей степени геологическим критериям окончательной глубинной изоляции РАО соответствуют древние магматические и метаморфические формации в южной части Енисейского кряжа — краевого юго-западного выступа кристаллического основания Сибирской платформы [34].

По современным представлениям структура юго-западной окраины Сибирского кратона сформирована в процессе сочленения гранит-зеленокаменных и гранулитогнейсовых блоков раннедокембрийской коры, образовавших Тунгусскую коровую провинцию, последовавшего затем развития эпиконтинентальных складчатых поясов — раннепротерозойского Ангарского и позднепротерозойского Саяно-Енисейского и завершилась аккрецией позднепротерозойских островодужных комплексов и микроконтинентов [47].

Енисейский кряж расположен на юго-западной окраине Сибирского кратона, протягиваясь в субмеридиональном направлении вдоль р. Енисей почти на 700 км при ширине от 50 до 200 км. Геофизические данные свидетельствуют о вертикальном утолщении земной коры, поверхность Мохоровичича под Енисейским кряжем расположена глубже на 40—50 км, чем в соседних регионах. Поэтому эта орогенная структура обладает утолщенной корой, обеспечивающей ее стабильность в течение длительного геологического времени. Коллизионная модель формирования структуры земной коры в этом регионе подтверждается данными сейсмического профилирования [48].

Традиционно Енисейский кряж делят на два крупных территориальных сегмента — Заангарский и Южно-Енисейский, разделенные субширотным Нижнеангарским региональным глубинным разломом, проходящим вдоль долины р. Ангары. Соответственно, к югу от Ангары находится Южно-Енисейский кряж, представляющий собой архейско-палеопротерозойский кратонный Ангаро-Канский блок (выступ), образованный канским гранулитогнейсовым и енисейским гнейсово-сланцевым комплексами и гранитоидами Нижнеканского массива (рис. 3.11). Поэтому географический (хорологический) термин «Южно-Енисейский кряж» и геолого-структурный термин «Ангаро-Канский блок, выступ или террейн», используемые различными авторами, можно воспринимать как синонимичные наименования части Енисейского кряжа, расположенной южнее Ангары.

Заангарская часть Енисейского кряжа, расположенная севернее Ангары, сложена в основном более молодыми протерозойскими породами.

Геологическая структура Ангаро-Канского выступа сформирована продуктами регионального метаморфизма, ультраметаморфической гранитизации, контактового, дислокационного, локального динамотермального метаморфизма, диафтореза, а также гидротермально-метасоматическими образованиями. Характерной особенностью геологической структуры Ангаро-Канского выступа является ее блочный характер. Интенсивно дислоцированные архейские и протерозойские породы залегают в виде коллажа отдельных блоков с тектоническими контактами между ними. При этом стратиграфическая последовательность в докембрийских образованиях не прослеживается. Тектонические блоки разнообразных размеров разделены разнопорядковыми разломами преимущественно северо-западного простирания с субвертикальным падением. Наиболее крупные дизъюнктивные структуры представляют собой систему сближенных субпараллельных разломов сдвиговой, взбросовой и надвиговой кинематики с проявлениями приразломного катаклаза, меланжирования и динамометаморфизма. Их протяженность определяется десятками или сотнями километров при ширине зоны стресс-метаморфизма от сотен метров до первых десятков километров; как правило, эти линейные зоны являются областями активного взаимодействия тектонических блоков. В приразломных зонах по нарушенным породам развиты бластомилониты (рис. 3.12).

На крайнем западе Ангаро-Канского выступа к нему в виде узкой полосы примыкает Предивинский островодужно-офиолитовый террейн (рис. 3.11), аккреция которого произошла, по-видимому, в вендское время. Термин «террейн» применяется здесь как описательный элемент для структур, характеризующихся самостоятельным стилем строения и развития [49]. Породы островодужной и офиолитовой формаций в пределах Предивинского террейна формируют две тектонические пластины субмеридионального простирания, надвинутые одна на другую в северо-восточном направлении. Западная пластина сложена породами островодужного комплекса, а восточная — офиолитового. В пределах обеих пластин проявлены разломы северо-западного и северо-восточного простираний, разбивающие их на блоки, перемещенные относительно друг друга. В составе пород Предивинского террейна преобладают неопротерозойские метагабброиды, метаморфизованные в условиях зеленосланцевой фации [50, 51]. Предивинский террейн не образует монолитных тел больших размеров, поэтому он малоперспективен для захоронения РАО, в связи с чем далее он не рассматривается.

Стратиграфически выше метаморфитов и гранитоидов Ангаро-Канского выступа залегают осадочные породы различного возраста. С восточной стороны к выступу прилегают осадочные отложения чехла Сибирского кратона различного возраста, от венда (эдиакария) до пермокарбона и юры. С запада распространены преимущественно мезозойские отложения чехла Западно-Сибирской плиты, границы с которыми могут быть либо тектоническими, либо несогласными стратиграфическими. Представления о распространении и вещественном составе комплексов пород, не относящихся непосредственно к вопросам глубинного захоронения РАО, дает фрагмент Государственной геологической карты масштаба 1:1 000 000 (рис. 3.12), в тексте ниже эти образования не рассматриваются.

На начальной стадии исследований гранитоиды Нижнеканского массива считались наиболее привлекательными в качестве перспективного объекта для глубинного захоронения РАО [34]. Однако эти гранитоиды не формируют геологическую структуру Ангаро-Канского выступа, а лишь вмещаются в нее, при этом их внедрение произошло значительно позднее, чем формирование вмещающих докембрийских пород и их кратонизация. Поэтому вначале нами рассматриваются метаморфические образования, формирующие фрейм Ангаро-Канского выступа.

Метаморфические породы представляют собой выступы кристаллического основания Сибирского кратона, сложенные ранне- и позднеархейскими гранулитогнейсовыми и гранитно-зеленокаменными комплексами умеренных и повышенных давлений с чарнокитоидами, нередко подверженными регрессивному метаморфизму с развитием мигматитов и ассоциаций амфиболитовой фации [47].

Начало системному изучению метаморфитов Ангаро-Канского блока было положено работами Ю. А. Кузнецова. Созданная им схема метаморфических и магматических раннедокембрийских образований района в дальнейшем в различной мере детализировалась, изменялась и дополнялась в работах Ю. И. Парфенова, И. А. Санжары, Е. К. Ковригиной, Л. В. Махлаева, К. А. Заблоцкого, А. Д. Ножкина, Т. Я. Корнева, В. М. Даценко, В. А. Верниковского, И. И. Лиханова, В. В. Семеняко и др. Большое значение для систематизации геологических данных в соответствии с современными представлениями о геодинамике региона имели Государственная геологическая съемка масштаба 1:200 000 [52, 53] и издание листа О-46 Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 [54].



Рис. 3.11. Енисейский кряж в структуре Сибирского кратона
АК — Ангара-Канский выступ; ПТ — Предвинский террейн

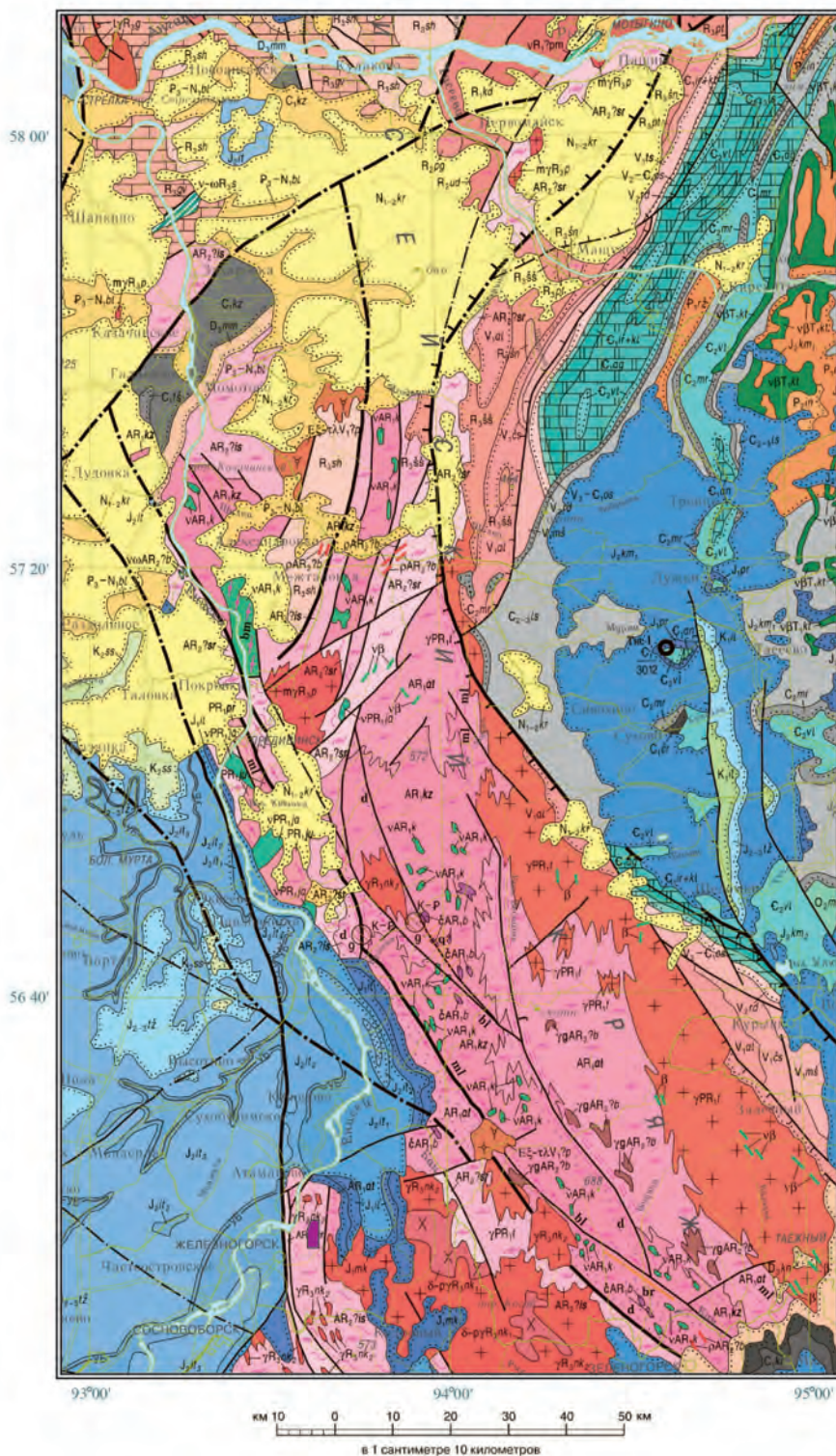
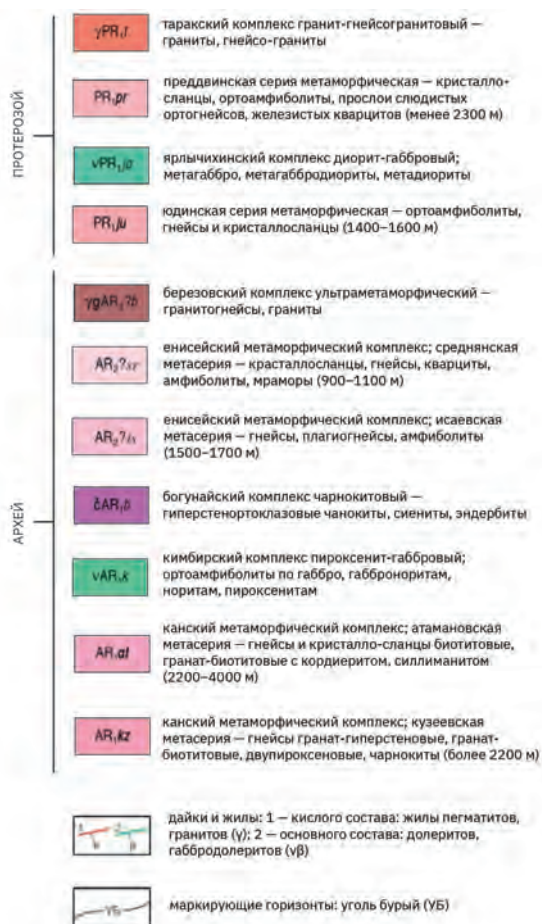
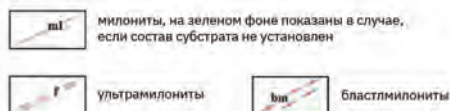
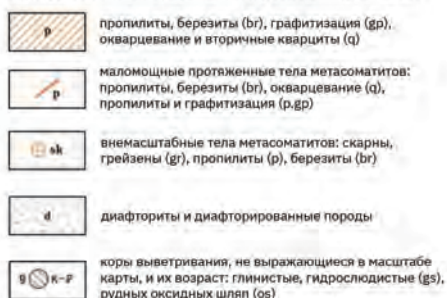
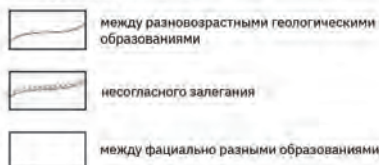
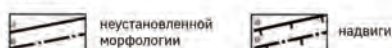
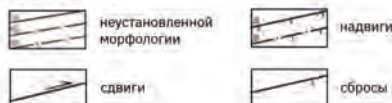


Рис. 3.12. Геологическая карта Ангаро-Канского выступа Енисейского кряжа [54]
Обозначения: см. следующий разворот

МЭЛ	$N_{1-2}kr$	миоцен-плиоцен; кирнаевская свита – пески ожелезненные, галечники; железистые конгломераты (4–100 м)
	$P_3-N_{1,2}bi$	олигоцен-миоцен; бельская свита – глины, алевроиты, пески, прослои бурых углей (менее 120 м)
	$K_{1,2}li$	берриас-барремский ярусы; илекская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, гравелиты, конгломераты, известняки (22–224 м)
ЮРА	J_2-1Z	тяжинская свита – алевролиты, аргиллиты, песчаники, прослои мергелей (100–225 м)
	J_2it	ааленский-батский ярусы; итатская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, аргиллиты, прослои и пласты углей бурых (140–570 м)
	J_2itg	батский ярус; итатская свита, верхняя подсвита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослои и пласты углей бурых (60–140 м)
	J_2itg	байосский ярус; итатская свита, средняя подсвита – алевролиты, аргиллиты, песчаники, угли бурые (60–150 м); бородинская свита (br) – переслаивание песчаников, алевролитов, угли бурые (7–78 м)
	J_2km_2	ааленский ярус; итатская свита, нижняя подсвита – песчаники, алевролиты, угли бурые (20–280 м)
	J_2li	Камалинская свита, верхняя подсвита песчаники, алевролиты с прослоями аргиллитов, углей бурых (38–73 м); нижняя подсвита – чередование песчаников, алевролитов, углей бурых (28–71 м)
	J_2km_1	
	J_2mk+li	тоарский ярус; иланская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослои гравелитов, углей бурых (4,6–24,2 м)
	J_2li	плинбасхский и тоарский ярусы; макарская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, пласты углей бурых (30–120 м); перяславская свита (pr) – песчаники, алевролиты, аргиллиты, угли бурые и каменные (32–142 м)
	J_2li	
ТРИАС	$vBT_{1,2}kt$	катангский комплекс габбро-долеритовый; пластовые и пластовосекущие интрузии, штоки, дайки; габбро-долериты, долериты
ПЕРМЬ	$P_{2,3}ln$	уфимский ярус; ингамбинская свита – алевролиты, прослои песчаников, конгломератов (15–90 м)
	$P_{1,2}z$	рыжковская свита – чередование песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей (250–480 м)
	$C_{2-3}ls$	листвяжнинская свита – песчаники, алевролиты, аргиллиты, пласты углей, известняки (150–220 м)
	$C_{2,3}mli$	башкирский ярус; урумнинская свита – конгломераты, песчаники, алевролиты, аргиллиты, линзы углей (4–50 м)
КАРБОН	$C_{1,2}ls$	турнейский и визейский ярусы; тушамская свита – песчаники, туфопесчаники, туфы, алевролиты, аргиллиты (100 м)
	$C_{1,2}kr$	казачинская, красногорьевская, чаргинская свиты – песчаники, аргиллиты, алевролиты, известняки, мергели, туфы, туфиты (30–450 м)
	$C_{1,2}kr$	
	$C_{1,2}kr$	
	$C_{1,2}kr$	
	$C_{1,2}kr$	
ДЕВОН	D_3mm	момотовская свита – аргиллиты, прослои известняков, песчаников (20–115 м); Кунгууская свита (kn) – алевролиты, мергели, песчаники, аргиллиты (300 м)
	D_2mm	планвирский-карадокский ярусы; мамырская свита – песчаники кварцевые, алевролиты, аргиллиты (220–400 м)
	D_1mm	
КЕМБРИЙ	$C_{1,2}li$	верхолонская свита – алевролиты, песчаники, аргиллиты, мергели, доломиты, прослои известняков, гипсов (450–500 м)
	$C_{1,2}og$	агалевская свита – доломиты, известняки, алевролиты, доломитовые брекчи (240–270 м)
	$C_{1,2}p+li$	иркинеевская и климинская свиты объединенные – доломиты, известняки, мергели, каменная соль, карбонатные брекчи (50–450 м)
	$V_{2,3}os$	поздний венд – ранний кембрий; островная свита – песчаники, алевролиты, доломиты, конгломераты, прослои аргиллитов (100–170 м)
	$V_{2,3}id$	венд – ранний кембрий; редколесная свита – песчаники с прослоями и линзами гравелитов, конгломератов, алевролитов (185–350 м)
	$E_{2,3}E_{1,2}V_{2,3}av$	средневогровский комплекс: щелочно-гранит-сиенитовый – щелочные сиениты, граносиениты, щелочные граниты
	$V_{1,2}m$	мошакская свита – песчаники, красноцветные и сероцветные алевролиты, аргиллиты, прослои конгломератов (130–1400 м)
	$V_{1,2}sa$	чистяковская свита – песчаники, алевролиты, прослои доломитов (100–310 м)
	$V_{1,2}ai$	алешинская свита – песчаники красноцветные, алевролиты, аргиллиты, конгломераты (140–2000 м)
	$R_{1,2}st$	сухохребтинская свита – сланцы серицит-глинистые, алевролиты, песчаники, гравелиты, редко лавы и туфы трахизальтов (более 1460 м)
ВЕНД	$R_{1,2}gv$	горевская свита – известняки алевроито-глинистые, прослои сланцев, песчаников, гравелитов, туфитов основного состава (более 2040 м)
	$v-vpR_{1,2}S$	степановский комплекс – амфиболитизированные трахидолериты, трахизальты, субщелочные габбро, метапикриты
	$lyR_{1,2}g$	глушихинский комплекс – лейкограниты, гранитпорфиры, алякситовые граниты
	$R_{1,2}ss$	шишинская толща – переслаивание металав, металавокластиков, метатифов, базальтов, серицит-глинистых сланцев, метаалевролиты (1500 м).
	$vR_{1,2}nk_1$	нижнеканский комплекс гранитовый; первая фаза – гранодиориты, плагиограниты, диориты; вторая фаза – граниты порфировидные, лейкограниты
	$\delta-p\gamma R_{1,2}nk_1$	
	$m\gamma R_{1,2}p$	посольненский комплекс мигматит-гранитовый – граниты, мигматит-граниты, гнейсограниты
	$R_{1,2}st$	шунтарская свита – филлиты, кварциты, доломиты, сланцы глинисто-серицитовые (700–1250 м)
	$R_{1,2}pl$	потоскуйская свита – филлиты, метаалевролиты, металавокластиков, прослои известняков, доломитов, сланцы (1000–1300 м)
	$R_{1,2}pg$	погоройская свита – сланцы, филлиты, пласты кварцитов, редко линзы известняков (1000–1300 м)
РИФЕЙ	$R_{1,2}ud$	удерейская свита – сланцы, филлиты, метаалевролиты, металавокластиков (1800–3300 м)
	$R_{1,2}kd$	кординская свита – сланцы хлорит-серицитовые, металавокластиков, прослои известняков, доломитов (более 1900 м)
	$R_{1,2}pm$	панямбинская толща – сланцы серицит-хлоритовые, метаизвестняки, металавы, метатифы, туфосланцы (более 1500 м)
	$vR_{1,2}pm$	панямбинская толща; субвулканические образования – пикродолериты, метапикриты, амфиболитизированные габбро-долериты

**ЛИТОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОРОД****ФАЦИИ РЕГИОНАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА****ПОРОДЫ КОНТАКТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА****ТЕКТОНИТЫ****МЕТАСОМАТИТЫ БЕЗ РАЗДЕЛЕНИЯ ПО СТЕПЕНИ ИЗМЕНЕНИЯ****ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ГРАНИЦЫ****РАЗРЫВНЫЕ НАРУШЕНИЯ**

а — выходящие на поверхность; б — предполагаемые; в — скрытые под вышележащими образованиями

Главные**Прочие разломы**

буровые скважины опорные: слева — номер скважины, справа в числителе — индекс вскрытого в забое геологического подразделения, в знаменателе — глубина, м

участок Енисейский, площадь поисково-оценочных работ 2009–2015 гг.

Для архейских пород региона характерна мелкая интенсивная складчатость, плейчатость, гофрировка, скрывающие их первичные текстурные признаки. Высокая степень метаморфизма, многократная и интенсивная тектоническая проработка практически полностью уничтожили прямые признаки происхождения исходных пород, сделали невозможным установление последовательности напластований разреза, определение его истинной мощности и состава. Исходя из этого, породы архея отнесены к нестратифицируемым образованиям и характеризуются на петрографо-формационной основе [53, 54]. В пределах Ангаро-Канского блока выявлены метаморфические образования раннего и позднего архея.

Раннеархейские гранулитогнейсовые образования, являющиеся самыми древними на Енисейском кряже, вскрыты исключительно в Ангаро-Канском выступе. Метаморфиты этого этапа образуют *канский метаморфический комплекс*, разделенный на две метасерии — кузеевскую и атамановскую. По установившемуся мнению, кузеевская серия считается более древней, однако ряд исследователей допускают возможность их обратной последовательности, обосновывая эту точку зрения своими представлениями о геодинамике формирования протокрыши архея в целом. Кроме того, Ю. П. Бовин [55] полагал, что метаморфизм пород атамановской серии имеет более высокую ступень гранулитовой фации, нежели кузеевской.

В пределах Ангаро-Канского выступа породы канского метаморфического комплекса образуют линейную структуру моноклиального типа шириной более 20 км, ориентированную в северо-западном направлении по азимуту 300—330° с преобладающим крутым падением на северо-восток.

Кузеевская метасерия ($AR_1.kz$). В составе метаморфической серии 30—40 % объема разреза составляют мезо- или меланократовые кристаллические сланцы и плагиогнейсы (основные гранулиты), а остальная часть приходится на лейкократовые гнейсы и плагиогнейсы (кислые гранулиты), послойные мигматиты и тела метабазитов (< 5 %). Все петрографические разновидности находятся в частом чередовании, формируя гранулит-сланцевую формацию. Вдоль разломов распространены продукты динамометаморфизма (бластомилониты, бластокатаклазиты и биотит-гранатовые амфиболиты).

Основными породообразующими минералами сланцев являются плагиоклаз и темноцветные минералы, а их переменное соотношение определяет лейко- или мезократовый состав породы (в %): плагиоклаз (An_{40-65}) — 15—40, ортопироксен (энстатит, гиперстен) — 0—30, клинопироксен — 15—25, ферророговая обманка — 8—40, железистый гранат — 5—25, биотит — 0—5, кварц — 5—10. В плагиогнейсах возрастает доля среднего плагиоклаза (An_{25-35}) до 60—75 % и кварца до 15—25 %, присутствует калишпат до 5—10 %, при общем сокращении темноцветных минералов. В гнейсах возрастает роль калишпата, и породы обычно имеют гранитоидный облик. Структуры гранобластовые, часто бластокатакластические, текстуры сланцевато-полосчатые, гнейсовидные, обусловленные скоплениями и ориентировкой темноцветных минералов вдоль определенных субпараллельных плоскостей. Лейкократовые полосы и обособления содержат единичные разрозненные зерна темноцветных минералов и обладают массивной или гнейсовидной текстурой, при этом гнейсовидность строго совпадает с направлением полосчатости [53]. Вскрытая «мощность» метасерии оценивается от 2200—2400 до 3000 м, при этом основание кузеевской метасерии нигде не вскрывается.

Проведенная К. А. Заблоцким и В. В. Семеняко реконструкция первичной природы пород кузеевской метасерии по методике А. А. Предовского [56] позволила им сделать вывод об их происхождении из вулканитов толеитового ряда, лишь в верхней части разреза предполагаются метаосадочные породы. Химический состав пород

метасерии характеризуется низкими глиноземистостью и щелочностью. В эклогито-подобных породах встречаются минералы-индикаторы — корунд и шпинель, характерные для высокой стадии гранулитовой фации метаморфизма. В целом метаморфические образования кузеевской метасерии следует отнести к формации гиперстеновых (двупироксеновых) гнейсов.

Атамановская метасерия (AR_1at). Граница между кузеевской и атамановской метасериями обычно проводится по увеличению в последней кордиерита до породообразующих количеств и резким уменьшением роли гиперстеновых гнейсов. В составе серии существенную долю (20—40 %) занимают метапелиты — глиноземистые сланцы и гнейсы, а также биотитовые, биотит-гранатовые гнейсы с гиперстеном и без него (30—50 %). Двупироксен-роговообманковые кристаллосланцы и плагиогнейсы (до 8—10 %) находятся в частом «переслаивании» с метапелитами. Повсеместно распространены мигматиты с гранитной и чарнокит-эндербитовой лейкосомой (10—25 %), которые могут образовывать целые поля. Редко встречаются пластовые тела метагаббро.

Породообразующими минералами сланцев и гнейсов являются (в %): плагиоклаз (An_{32-37}) — 10—20, ортоклаз — 15—30, кварц — 5—35, кордиерит — 5—80, силлиманит — 2—10, гиперстен — 7—10, биотит — 8—20. Анализ парагенетических особенностей минерального состава пород метасерии констатирует факт высокоградиентного метаморфизма гранулитовой фации. Появление калишпатовых гнейсов, по всей вероятности, связано с процессами чарнокитизации и мигматизации, а низкотемпературных минералов — с факторами диафореза.

Реконструкция первичной природы метаморфитов по методике А. А. Предровского позволила сделать вывод о преобладании в составе метасерии первично осадочных пород, особенно среди высокоглиноземистых разностей [57].

В биотитовых гнейсах атамановской толщи на правом берегу р. Енисей размещен подземный комплекс Горно-химического комбината (ГХК), эксплуатируемый почти 60 лет. Многолетние натурные, лабораторные и аналитические исследования дали исключительно ценную информацию о состоянии и поведении блоковых гнейсовых структур под влиянием эксплуатации подземного сооружения [34].

На «мощность» атамановской метасерии у исследователей нет единой точки зрения: по оценкам одних авторов она варьируется от 2200 и до 2700 м, другие увеличивают ее до 4000 м [54].

Средний состав канского гранулитогнейсового комплекса отвечает гранодиориту и близок к среднему составу верхней континентальной коры. Метаморфические породы канского комплекса в гравитационном поле выделяются положительной зоной $\Delta G = 8-10$ мГал. Наиболее плотными породами являются метабазиты ($2,64-3,15$ г/см³), метапелиты имеют плотность $2,60-2,78$ г/см³. Магнитное поле кузеевской метасерии является наиболее интенсивным (до 1000—1200 нТл) и контрастным. Высокомагнитными породами являются пироксеновые гнейсы ($I_{cp.} = 2000 \times 10^{-6}$ ед. СГС) и кристаллические сланцы ($I_{cp.} = 1000 \times 10^{-6}$ ед. СГС), которые создают аномалии 900—1500 нТл. Породы атамановской метасерии характеризуются пониженным полем силы тяжести ($\Delta G = 2,5-8$ мГал) и менее интенсивным магнитным полем (< 1000 нТл), а сами метапелиты относятся к слабوماгнитным породам ($I_{cp.} = 1000-1500 \times 10^{-6}$ ед. СГС). Гамма-поле канского комплекса имеет спокойный ровный вид с мощностью экспозиционной дозы 6—8 мкР/ч с локальными повышениями до 10 мкР/ч, средняя оценка по общему каналу $8,1 \pm 1,6$ мкР/ч. Среднее содержание радиоактивных элементов ниже их кларков: $U = 1,7-2,1$ мг/кг, $Th = 6,8 \pm 2,0$ мг/кг, $K = 1,0 \pm 0,4\%$ [53].

Низкие концентрации естественных радионуклидов (ЕРН) служат яркими индикаторами высокой степени зрелости корового вещества Ангара-Канского блока. Принято считать, что при метаморфизме происходит деплетирование высокobarических гнейсов ураном и рубидием, а также торием и легкими редкими землями (LREE). Однако, помимо мощного влияния метаморфизма, на содержание естественных радионуклидов оказывает влияние первичная гетерогенность мантийно-корового вещества и его дальнейшая геодинамическая эволюция. В отдельных случаях содержание тория в гнейсах составляет 17–20 г/т, лантана — 50–70 г/т, церия — 100–120 г/т, а в биотитовых гнейсах дацит-риолитового или глиноземистого пелитового состава содержание тория достигает 16–60 г/т, урана — 1–6,2 г/т [58]. Гнейсы атамановской серии на Енисейском участке также характеризуются повышенным содержанием тория (в среднем 20,1 г/т) при кларковом содержании урана 2,5 г/т [59].

Раннеархейский возраст пород канского метаконгломерата принимается в основном по геологическим данным, включающим метаморфизм высокой степени гранулитовой фации, а также корреляцию с подобными образованиями на других выступах Сибирского кратона (Анабарском, Алданском), где этот возраст был установлен достаточно надежно. Кроме того, имеется определение абсолютно-го возраста пегматита ($T = 2550$ Ma, Rb-Sr), залегающего среди гнейсов атамановской «толщи», подтвержденное свинцово-изохронными датировками — 2650–2600 и 2700–2600 млн лет [54]. Полученные в разных частях Енисейского кряжа различными исследователями геохронологические датировки имеют сильный разброс: 2550 Ma Rb/Sr метод по породе, 4100 ± 200 Ma — U-Th-Pb метод по циркону, 3200 ± 100 Ma — термоизохронный по циркону [53].

В последние годы обоснование палеоархейского возраста (3221 ± 15 Ma) канского метаморфического комплекса было выполнено А. М. Сазоновым с соавт. [60]. Датировка возраста произведена по циркону, рассчитанная по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Циркон выделен из керна скважины Р-2, пробуренной на Енисейском участке и вскрывшей кордиерит-силлиманитовые гнейсы атамановской серии. В гнейсе были обнаружены цирконы мезоархейского, раннепалеопротерозойского и раннепротерозойского возрастов, характеризующие последовательные тектоно-магматические события, отразившиеся в палеометаморфите. Результаты 41 лабораторного определения абсолютного возраста указывают на начало кристаллизации циркона на рубеже 3221 ± 15 Ma назад (в палеоархее) и последующие неоднократные изменения U-Pb системы вплоть до раннего протерозоя (1832 Ma). По распределению плотности возрастов А. М. Сазонов [60] предполагает следующие главные тектоно-магматические рубежи в формировании атамановской толщи.

- Палеоархейский возраст одиночных цирконов (не моложе 3221 ± 15 Ma) в изученном гнейсе датирует проявление гранулитового плутонометаморфизма, сформировавшего канский метаморфический комплекс архейской коры Ангара-Канского блока Сибирского кратона.
- Мезоархейские (2779 ± 15 Ma) цирконы отражают интенсивный вулканизм основного состава, сформировавший осадочно-вулканогенные толщи енисейского комплекса.
- Раннепалеопротерозойский (2398 ± 32 — 2409 ± 12 Ma) возраст цирконов обязан проявлению складчатости, метаморфизму отложений енисейской серии.
- В раннепротерозойское время (1832 ± 17 — 2012 ± 13 Ma) образовались многочисленные цирконы в связи с мигматизацией гнейсов канского метаморфического комплекса, длительным ретроградным метаморфизмом преимущественно в амфиболитовой фации.

Позднеархейские метаморфические образования получили наименование *енисейского метаморфического комплекса*. Он был выделен Ю. А. Кузнецовым в 1941 г. как комплекс биотитовых плагиогнейсов и амфиболитов [61]. Комплекс объединяет кристаллические породы базитового, карбонатно-пелитового ряда, характеризующиеся минеральными парагенезисами амфиболитовой фации, образовавшиеся за счет различных по составу, генезису и возрасту исходных пород, утративших первичные признаки своего происхождения. На этом основании енисейский комплекс относится к нестратифицированным образованиям. Толщи, образованные этими породами, распространены в бассейнах рек Кантат и Есауловка, где слагают серию тектонических пластин в виде полос общей шириной до 30 км, имеющих, как и канский комплекс, северо-западное простирание. Северо-восточный контакт комплекса отделяет его от пород канского комплекса мощной (более 2 км) зоной диафторированных тектоно-сланцев. Юго-западный контакт трансгрессивно перекрыт палеозойскими и кайнозойскими отложениями. По вещественному составу внутри комплекса выделяются две метасерии — исаевская и среднянская, которые образовались во время одного тектоно-метаморфического цикла, при близких термодинамических условиях, но отличаются особенностями петрографического состава.

Исаевская метасерия (AR_2is) распространена в долине р. Кантат, ее образования фрагментами выходят в долине р. Есауловки. В северной части Ангаро-Канского блока наблюдается коллаж линейных и клиновидных блоков, сложенных породами исаевской, кузеевской либо среднянской метасерий. Последнее может свидетельствовать о чешуйчато-надвиговом характере тектонического строения.

Метасерия имеет сравнительно монотонный разрез, существенно мафитовый состав и сложена биотит-амфиболовыми кристаллическими сланцами, плагиогнейсами — 65—70 %, серыми гнейсами биотит-амфиболовыми, биотит-гранатовыми, редко с андалузитом, кордиеритом (метапелитами) — 20—30 %, мигматитами — до 15—20 %, содержит пласты темных, почти черных амфиболитов до 5—7 %. Породы находятся в частом и незакономерном чередовании и не образуют сколько-нибудь заметных по размерам тел.

Амфиболиты сложены (в %): зональным андезином (An_{31-49}) — 40—45 и магнезиально-железистой роговой обманкой — 40—60, биотитом — 0—5, гранатом — 0—5. В редких случаях среди амфиболитов устанавливаются реликтовые парагенезисы с пироксенами, основным плагиоклазом, силлиманитом. Структура пород лепидогранобластовая, текстура массивная и сланцеватая. Нередко проявлена келифитовая структура, когда роговая обманка по периферии обрастает актинолитом, зеленым биотитом, хлоритом или на границе плагиоклаза и роговой обманки образуется кайма розового альмандина.

Плагиогнейсы представляют собой средне- или крупнозернистые породы серого цвета с гранобластовой структурой и гнейсовидно-полосчатой текстурой. Минеральный состав (в %): плагиоклаз (An_{25-35}) — 30—70, кварц — 15—35, высокоглиноземистая роговая обманка — 5—25, гранат — 0—20, биотит — 0—10. В гнейсах отмечено высокое содержание микроклина, достигающее 20—30 %.

Химический состав гнейсов и плагиогнейсов отвечает или близок в основном к составу гранодиоритов с содержанием кремнезема в среднем 68—69 % и характеризуется высокой глиноземистостью и калиево-натриевой специализацией. Амфиболиты и кристаллосланцы исаевской метасерии, в отличие от metabазитов канского комплекса, обладают низкой магнезиальностью и повышенной железистостью.

Геохимический тип гнейсов и сланцев исаевской метасерии определен по кларкам концентрации (K_k) с положительной для V ($K_k = 1,6$), Ti, Fe ($K_k = 1,5$) и отрицательной для Cu, Ba, Zr, Ce, La ($= 0,5$), Cr, Yb, Ni, Y, Sr, Nb ($K_k < 0,5$) специализацией. Амфиболиты, кроме того, характеризуются повышенным содержанием Ce ($K_k = 1,4$) [53, 54].

Реконструкция исходного состава, проведенная К. А. Заблочким и В. В. Семеняко, указывает, что гнейсы исаевской метасерии образовались по вулканогенно-осадочным породам, в основном грауваккам и туффитам, содержащим примесь материала среднего и кислого состава. Химический состав гнейсов и плагиогнейсов отвечает или близок в основном к составу гранодиоритов с содержанием кремнезема в среднем 68–69 % и характеризуется высокой глиноземистостью и калиево-натриевой специализацией. Повышенное содержание калия в составе щелочей обусловлено наложенной мигматизацией.

«Мощность» метасерии оценивается в 1500–1700 м и, вероятно, значительно занижена. Возраст исаевской метасерии определен как архейский на основании построения свинцовой изохроны по цирконам, отобранных из гранито-гнейсов — 2600–2650 млн лет [54].

Средняянская метасерия (AR_{2sr}) распространена в долине речки Орла, верховьях р. Калантат и характеризуется наиболее слабой обнаженностью. Это пестрые по составу метаморфические образования, слагающие монотонную по строению полосу шириной около 2 км генерального S_3 простираения ($320\text{--}330^\circ$), ограниченную с обеих сторон тектоническими контактами. Истинный состав, строение, мощность метасерии установить не представляется возможным ввиду интенсивной дислоцированности, выраженной в изменении мощности пластичных слоев, их будинировании, проявленной внутрипластовой инфолиантной складчатости нагнетания и волочения, образовании многочисленных послойных тел милонитов. Большую часть разреза представляют биотитовые, биотит-гранатовые гнейсы и плагиогнейсы (70–80 % объема разреза), биотит-амфиболовые сланцы с послойными телами амфиболитов (10–15 %), карбонатно-силикатные и высокоглиноземистые породы (< 5 %), мигматиты (до 10–12 %).

Наиболее распространенные биотитовые гнейсы и плагиогнейсы имеют мезо- или лейкократовый облик, гранолепидобластовую структуру и тонкополосчатую, сланцеватую текстуру. Сложены кварцем (15–35 %), плагиоклазом (An_{25-35}) до 40–50 %, калишпатом (микроклин) до 25 %, переменным количеством темноцветных минералов: зеленовато-бурый биотит, розовый альмандиновый гранат, мусковит, эпидот, рудный — 20–40 %. Мусковит, микроклин и силлиманит появляются в заметных количествах в мигматизированных гнейсах.

Биотит-амфиболовые сланцы и амфиболиты обычно имеют постепенные взаимопереходы, отличаясь лишь степенью насыщенности полевыми шпатами и кварцем. Макроскопически это мелко-среднезернистые темные зеленовато-серые породы со сланцеватой, пятнисто-полосчатой текстурой, гранонематобластовой текстурой. Роговая обманка и бурый биотит являются определяющими темноцветными минералами. Плагиоклаз имеет средний состав (An_{35-50}) и довольно свежий облик. Эпидот является обычным сопутствующим минералом, хотя его содержание не превышает 10–15 %.

Массивные и слоистые карбонатные породы (кальцитовые, доломитовые мраморы, кальцифиры) образуют пластовые тела мощностью не более 2—3 м. Все мраморы содержат примесь силикатов до 10 %, представленных полевыми шпатами, биотитом, мусковитом, актинолитом, клиноцоизитом. На границе мраморов и вмещающих гнейсов развивается тонкая оторочка скарноидной ассоциации (актинолит, хлорит, эпидот, гранат, диопсид, кварц). Пласты грубозернистых кальцифилов сложены кальцитом (> 60 %) и переменным количеством клиноцоизита, актинолита, тремолита, диопсида, эденита, флогопита, скаполита, полевых шпатов. Несмотря на присутствие карбонатных горизонтов, первичных признаков парапогод практически не сохранилось, а большинство текстурных элементов имеют метаморфогенную природу.

Геохимический фон среднянских гнейсов и сланцев отвечает кларковым содержаниям по А. П. Виноградову для аналогичных пород. Повышенные содержания относительно кларка установлены для Ti, Mo, B, La ($K_k = 1,3$).

Амфиболиты и кристаллосланцы енисейского комплекса имеют плотность 2,68—2,74 г/см³, гнейсы и известково-силикатные породы — 2,59—2,65 г/см³, являются практически немагнитными и их разновидности не выделяются в спокойных гравиметрическом и магнитном полях.

Возраст енисейского метаморфического комплекса определяется временем метаморфических и ультраметаморфических преобразований. В аналогичных образованиях на севере Ангара-Канского выступа получены геохронологические определения 2520 Ма для мраморов среднянской метасерии (U-Pb метод) и 2600—2700 Ма для гранито-гнейсов, развитых по породам исаевской метасерии (термоизохронный метод по циркону) [53, 54].

Магматические породы. В формировании магматических пород Ангара-Канского блока и его ближайшей периферии могут быть выделены четыре этапа (см. рис. 3.12).

1. Раннедокембрийский этап формирования кристаллического основания платформ: кимбирский, богунайский, березовский, таракский, ярлычихинский комплексы.
2. Позднерифейский этап стадии сжатия (коллизийный): посольненский мигматит-гранитовый, нижнеканский гранитовый комплексы.
3. Ранневендский этап предрифтовой активизации: средневороговский щелочно-гранит-сиенитовый.
4. Мезозойский этап континентального рифтогенеза — катангский комплекс долеритовый (комплекс сибирских траппов) [54].

Магматические породы занимают почти 30 % площади Ангара-Канского выступа. Из многочисленных выделенных предшественниками интрузивных комплексов наиболее крупными и перспективными в качестве вместилища для размещения РАО являются таракский и нижнеканский. Меньшие по размерам комплексы интрузивных пород здесь не рассматриваются. Представления об их распространении и петрографическом составе приведены в геологической карте региона (см. рис. 3.12).

Таракский комплекс гранит-гранито-гнейсовый ($\gamma PR_1 t$) формирует одноименный крупный массив и множество мелких тел и зон мигматитов, развитых по породам канского и енисейского комплексов метаморфических. Впервые Таракский массив был изучен Ю. А. Кузнецовым, затем — при съемке масштаба 1 : 200 000 Ю. А. Парфеновым. В дальнейшем большой вклад в его изучение был внесен в работах Е. К. Ковригиной, В. М. Дадченко, Л. В. Махлаева [62, 63]. Надо отметить, что в работах этих исследователей отражены весьма противоречивые взгляды на генезис и возраст таракских гранитоидов.

Массив расположен в восточной части Ангаро-Канского блока, где он образует крупную линейно вытянутую структуру, расположенную согласно простиранию архейских гнейсов и всего Южно-Енисейскому кряжа. Протяженность массива достигает 150 км при ширине в южной части 20—22 км, в северной части до 5—6 км.

С запада массив контактирует с гнейсами атамановской метасерии, а с востока перекрыт венд-палеозойскими осадочными породами. Массив имеет сложный гетерогенный состав, при этом многие исследователи отмечали конформность внутренних структур массива (полосчатость, гнейсовидность) вмещающим гнейсам атамановской метасерии. В таракских гранитах получили широкое развитие артеритовые и венитовые мигматиты. Восточная часть массива четко отличается от западной. Считается, что частично погруженная под чехол осадочных пород восточная часть массива имеет более однородный состав, в то время как западная, наиболее обнаженная, расценивается как неоднородная по своему составу и строению. В западной части отмечены многочисленные скиалиты вмещающих пород [54].

В составе массива преобладают порфировластовые граниты, встречаются гранодиориты, граниты, пегматоидные граниты. Последние, как и порфировластовые граниты, часто образуют лейконому мигматитов за пределами массива. Основная масса гранитов состоит (%) из плагиоклаза An_{22-30} (28—30), решетчатого микроклина (35—40), кварца (30), биотита и мусковита (5—7), граната и аксессуарных — монацита, апатита, циркона. В гранодиоритах наблюдается повышение содержания биотита. Жильная фация представлена лейкократовыми пегматоидными гранитами, пегматитами и кварцевыми жилами.

Биотитовые граниты западной и центральной зон Таракского массива и вмещающие гнейсы и атамановской метасерии архея связаны между собой постепенными переходами, что наиболее отчетливо видно по р. Кан, от устья р. Казачья до Комаровского порога. Наличие среди пород западной части Таракского массива гранат- и кордиеритсодержащих разновидностей также подчеркивает их родство с породами атамановской метасерии.

Гранитоиды таракского комплекса практически немагнитны, создают слабо контрастное (0—20 нТл) магнитное поле. Гранит-порфиры слабомагнитны (-120×10^{-3} А/м). Гранодиориты более магнитны (от -250×10^{-3} до -1600×10^{-3} А/м). На гравиметрической карте область развития пород таракского массива отчетливо выделяется значениями изоаномал силы тяжести (от -20 до -34 мГал).

По радиологическим свойствам гранитоиды таракского массива подразделяются на две разновидности: в северо-западной части массива развиты в основном низкоактивные (25 мкР/ч) лейкократовые гранитоиды, в юго-восточной, отделенной меридиональным разломом, преобладают меланократовые породы с высокой мощностью экспозиционной дозы (50—60 мкР/ч). Такие различия в радиоактивности могут свидетельствовать как о различном составе, так и о различном возрасте восточной и западной частей массива.

По мнению И. И. Глико, Е. К. Ковригиной, В. В. Семеняко, Г. И. Качевской и др. основную роль в образовании гранитоидов таракского комплекса играли процессы ультраметаморфизма [54]. Протолитом пород комплекса при этом по-видимому были породы первичной мигматит-гранитовой формации в условиях амфиболитовой фации метаморфизма. Ю. А. Кузнецов [64] и В. М. Даценко [62] считали происхождение таракских гранитов магматическим и относят их к гранитовой формации орогенной стадии карельского протогеосинклинального этапа.

По гранитоидам таракского комплекса имеются датировки по свинцовой изохроне (14 определений) для аксессуарных циркона, монацита, ортита, укладывающиеся в 1900—1760 Ма. Определения абсолютного возраста рубидий-стронциевым методом (пять определений) дают более древние значения 2070—1950 Ма и, возможно, отражают начальные стадии таракской гранитизации. В массиве проявлен интенсивный динамометаморфизм с образованием катаклазитов, очковых гнейсов, зон милонитов и бластомилонитов различной мощности.

Нижнеканский комплекс гранитовый представлен одноименным массивом, расположенным на крайнем юге Енисейского кряжа в бассейнах рек Кан и Немкина. Занимаемая им площадь превышает 3000 км². Существенный вклад в изучение массива внесли Ю. А. Кузнецов [61, 64], В. М. Даценко [65], Ю. И. Парфенов, Ю. И. Гончаров, В. В. Семеняко, А. А. Середнев, Э. Н. Линд, Е. Б. Андерсон, В. Л. Миловидов, Е. К. Ковригина и др. В легенде Ангара-Енисейской серии к государственной геологической карте Российской Федерации возраст массива был принят неопротерозойским (позднерифейским) (см. рис. 3.12). По геологическим данным позднерифейский возраст нижнеканского комплекса был установлен на том основании, что граниты прорывают все метаморфические образования кристаллического фундамента, а сами секутся дайковыми телами позднерифейского шишинского комплекса. Полученные радиологические датировки изохронным Rb-Sr методом составляют для диоритов 809 ± 9 Ма, для гранитов — 803 ± 31 Ма, что оказывается несколько меньше, чем приводимые В. М. Даценко [65] значения для эталона нижнеканского комплекса (920 ± 50 Ма). По U-Pb методу возраст монацитов из нижнеканских гранитов составляет 920 ± 0 Ма, цирконов 970 ± 100 Ма, гранодиорита по Sm-Nd методу 1168—1492 Ма [51]. Нижнеканский комплекс принимается как возрастной аналог позднерифейского татарско-аяхтинского, расположенного в Заангарской части Енисейского кряжа [65].

На основании определений абсолютного возраста циркона из гранодиорита, выполненных в начале 2000-х гг. (455 ± 5 Ма), А. Е. Верниковская с соавт. [66] полагают, что гранитоиды Нижнеканского массивов были сформированы в позднем ордовике. Их образование эти исследователи считают отражением раннекаледонских аккреционно-коллизийных событий, широко проявленных в Центрально-Азиатском складчатом поясе, в том числе в пределах Алтае-Саянской складчатой области. По-видимому, такой молодой возраст, как и предполагал в свое время В. М. Даценко, отражает эпохи последующих, тектоно-магматических активизаций, произошедших в этом массиве.

На поверхности массив обнажается лишь в днищах глубоко врезаемых речных долин (рек Кан, Большой Итат) и в основаниях крутых склонов, а большая его часть перекрыта чехлом рыхлых отложений юрского и четвертичного возраста. По мнению первых исследователей, массив представлялся как батолит [64]. По результатам гравиметрических исследований массива, выполненных Гравиметрической экспедицией № 3 в 1999 г. под руководством В. П. Ключко, форма массива представляется как субвертикально залегающее, изогнутое в плане пластовое тело с крутым юго-западным и более пологим северо-восточным контактами, вертикальная мощность которого увеличивается в северо-западном направлении с 3 до 5 км [53]. По последним данным, форма массива определяется как асимметричный этмолит [65] или горизонтально залегающее интрузивное пластовое тело мощностью 1,5—1,8 км, разбитое на отдельные блоки размером 0,3—1,5 км. Массив сопровождается серией мелких тел (устье р. Тель, долины рек Тартат, Орла, Кантат и др.) площадью менее 5 км².

Нижнеканский массив сформирован двумя типами пород, образование которых связывают с двумя фазами внедрения (см. рис. 3.12). Преобладают (до 80 %) микроклиновые биотит-мусковитовые порфировидные граниты, реже присутствуют лейкограниты и их субщелочные разновидности, образованные в заключительную фазу формирования массива. В начальную фазу образовались тела гранодиоритов, плагиогранитов, диоритов. В ряде участков массива отмечаются породы щелочно-известковой и щелочной интрузивных серий сиениты, кварцевые сиениты, субщелочные граниты и лейкограниты. Породы нормального ряда характеризуются повышенными концентрациями оксидов кальция и магния, аномально высокими концентрациями стронция и бария и пониженным содержанием Rb, Zr, Y, Yb, Ta. Породы щелочного ряда отмечены высоким содержанием щелочных металлов (Na, K), повышенным содержанием Sr и Ba, а также пониженными концентрациями CaO, MgO, TiO₂, Zr, Y, Yb, Ta, Nb [51].

Для массива характерно: а) наличие в эндоконтактной части и внутри массива тел габбродиорит-диорит-плагиогранитового состава; б) обилие и разнообразие пород жильной фации; в) развитие грейзенов, березитов, метасоматитов. Жильные породы, сопутствующие нижнеканским гранитоидам, представлены пегматитами и аплитами.

Гранодиориты занимают до 60–70 % объема первой фазы внедрения. Породы имеют светлый серый цвет, неравномерно-зернистую гипидиоморфную и порфировидную структуру, массивную текстуру, при этом нередко проявлена разgneйсованность, обусловленная вытянутыми скоплениями темноцветов. Состав (в %): кварц — 10–15, плагиоклаз (An_{28–34}) — 40–50, калишпат — 10–20, зеленая роговая обманка — 0–15, биотит — 5–10, рудные (магнетит, ильменит) — до 1. Преобладающие во второй фазе внедрения биотит-мусковитовые граниты сложены в равном соотношении зеленоватым плагиоклазом, розовато-желтым микроклином, серым дымчатым кварцем. Темноцветные минералы, занимающие 5–7 % объема породы, представлены бурым биотитом, реже встречаются зеленая роговая обманка, мусковит, эпидот.

Плотность пород второй фазы составляет для гранитов 2,57–2,63 г/см³, для лейкогранитов — 2,52–2,60 г/см³, для граносиенитов — 2,62–2,70 г/см³, они слабомагнитны ($I_i < 600 \times 10^{-6}$ ед. СГС, $I_r < 150 \times 10^{-6}$ ед. СГС). Массив характеризуется спокойным слабомагнитным полем, интенсивность которого повышается в северном направлении. Открытая пористость в приповерхностных условиях составляет для гранитов 0,35–0,60 %, для лейкогранитов и граносиенитов 0,45–0,80 %, с глубиной она уменьшается и выравнивается в пределах 0,16–0,32 % [53].

Неоднородность строения массива всеми исследователями понималась различно. Ю. А. Кузнецов [61], впервые изучавший породы Нижнеканского массива, считал габбродиориты—плагиограниты гибридными разностями. Ю. А. Парфенов выделил их в самостоятельный комплекс, а Е. К. Ковригина, В. М. Даценко [62] и В. В. Семеняко тела габбро-диорит-диорит-плагиогранитового состава трактуют как первую фазу комплекса. Массив приурочен к зоне сочленения Ийско-Канского и Предивинской ветви Приенисейского глубинных разломов и расположен в зоне сочленения чарнокит-гранулитового пояса и литоплинта. Такое положение массива обусловило разнообразие зон милонитизации, грейзенизации, березитизации, развитие жил аплитов, бериллиеносных пегматитов, кварца, диорит-порфиров, лампрофиров, с которыми связаны золотоносность, редкометалльная (молибден), редкоземельная специализация жильных фаз.

Тектоника. Ангаро-Канский выступ Енисейского кряжа сформирован интенсивно дислоцированными и глубоко метаморфизованными довендскими образованиями, рассматриваемыми как выступ фундамента Сибирского кратона. К выступу прилегают стратифицированные образования двух платформ — Сибирской древней и Западно-Сибирской молодой. Границы довендских структур Ангаро-Канского выступа с венд-палеозойским чехлом Сибирской платформы по большей части тектонические. Мезозойский плитный комплекс Западно-Сибирской платформы вдоль Енисея перекрывает в основном довендские структуры Енисейского кряжа, а в отдельных случаях — структуры чехла Сибирской платформы. На юге и юго-востоке довендские породы выступа перекрываются венд-палеозойскими складчатыми структурами Алтае-Саянской области (рис. 3.13).

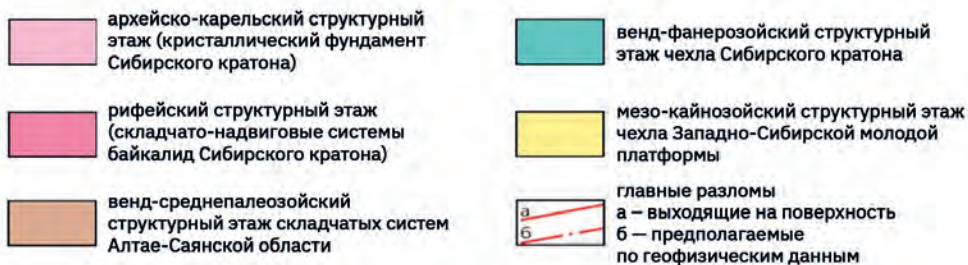
Архейско-карельский структурный этаж (комплекс) образует сложный чешуйчато-надвиговый коллаж протяженных в субмеридиональном направлении блоков, состоящих из метаморфитов раннеархейского (канская метасерия) и позднеархейского (енисейская метасерия) времени. Формирование кристаллических пород комплекса происходил в условиях гранулитовой фации регионального метаморфизма. Внутренняя структура отдельных блоков этого комплекса характеризуется сложной системой линейных, изоклинальных опрокинутых асимметричных и веерных складок многих порядков, часто с крутой (до 70°) ундуляцией осей. Последнее, вероятно, является следствием взбросо-надвиговых процессов в жестких консолидированных блоках.

Рифейский структурный этаж занимает крайние северную и южную оконечности Ангаро-Канского выступа, а его основная часть расположена в Заангарской части Енисейского кряжа. В Заангарье формирование этого этажа связывается с аккрецией осадочных, островодужных и рифтовых комплексов в результате спрединга Западно-Сибирской зоны рифтогенеза. Комплекс сформирован первично осадочными и вулканическими породами, преобразованными в разнообразные сланцевые толщи в результате регионального метаморфизма от зеленосланцевой до амфиболитовой фации.

В результате коллизионных процессов, связанных с тектогенезом в соседней Алтае-Саянской складчатой области, произошло внедрение гранитоидов Нижнеканского массива.

Границами структурных этажей в довендских комплексах Енисейского кряжа и в отдельных их фрагментах являются разломы, играющие весьма значительную роль в оценке пригодности породных массивов для захоронения РАО. Разломы широко проявлены не только на границах комплексов, но и внутри них, определяя сложный блоковый характер довендских метаморфитов и интрузивных комплексов.

Наиболее значимыми разрывными структурами в пределах территории являются глубинные разломы (Приенисейский и Предивинский) и региональные (Нижнеангарский и Курышский) (см. рис. 3.13). Все эти разломы закладывались в разное время, многократно подновлялись, часто с изменением морфологии и типа, и, по-видимому, продолжают участвовать в современных неотектонических процессах. Большинство разломов имеет северо-северо-западное простирание, а Нижнеангарский — северо-восточное.



Е – Приенисейский,
К – Курышский или Ангаро-Тасеевский,
Н – Нижнеангарский, П – Предивинский

 участок Енисейский

НК – Нижнеканский массив

Рис. 3.13. Схема тектонического районирования. По материалам [54]

Приенисейский глубинный разлом практически по всей длине скрыт под плитным комплексом молодой платформы и выделяется по данным интерпретации гравиметрических и магнитометрических полей. Он представляет собой разломную зону, состоящую из серии разломов северо-северо-западного простирания, ширина которой в отдельных местах достигает 30 км. Серия разломов имеет взбросовую и надвиговую кинематику с левосторонней сдвиговой компонентой. Вероятно, именно по данному глубинному разлому проходит граница Сибирского кратона и гетерогенного фундамента Западно-Сибирской плиты. Южнее разлом переходит в структуры комплексы Восточного Саяна. Считается, что Приенисейский разлом заложен не позднее раннего рифея, а его формирование происходило в обстановке аккреции вулканической дуги и обдукции офиолитов на окраину Сибирского кратона [54].

Предивинский разлом возник, скорее всего, в раннем архее, отделяя гранулитовые метакомплексы от амфиболитовых. С разломом связан трахит-щелочногранит-щелочносиенитовый вулканизм (порожнинский комплекс).

Курышский разлом, являющийся ответвлением Главного Саянского разлома, простирается из структур Восточного Саяна в Заангарскую часть Енисейского кряжа, где он получил наименование Ангаро-Тасеевского [67]. Разлом отделяет Ангаро-Канский выступ от платформенных образований Сибирского кратона. Предполагается, что этот разлом проявлял активность в новейшее (N-Q) время.

Нижнеангарский разлом имеет северо-восточное простирание. Он отделяет Ангаро-Канский блок от складчатых рифейских структур Заангарской части Енисейского кряжа.

Кроме перечисленных глубинных и региональных разломов, в регионе выделено значительное количество разрывных структур более высоких порядков (Муратовский, Атамановский, Правобережный, Итатский, Канско-Енисейский и др.). Более подробно они рассмотрены в гл. 5.

Глубинные и крупные региональные разломы по большей части скрыты под чехлом покровных отложений. Но в местах выходов на поверхность они характеризуются мощными зонами тектонитов. Так, Атамановский разлом наблюдается в обнажениях на р. Енисей в виде мощной тектонической зоны смятия субмеридионального простирания по границе метаморфитов докембрийских пород и отложений осадочного чехла. На поверхности он представлен катаклазитами, милонитами и диафоритами, а также проявлением тектонического меланжа. Считается, что в настоящее время Атамановский глубинный разлом является сейсмоактивной зоной [53]. Предивинский разлом также характеризуется наблюдаемыми проявлениями ультрамилонитов.

Следует отметить, что, за исключением крупнейших глубинных и региональных разломов, обширная сеть разрывных нарушений характеризуется невысокой достоверностью. Крупнейшие разломы выявлены на основании геологических и геофизических материалов, а их наличие и характеристики подтверждены наблюдениями в береговых обнажениях или, реже, бурением. Обоснованность и достоверность выделения этих крупнейших дизъюнктивных структур прошли неоднократную верификацию и апробацию как в официальных геологических органах управления недрами, так и у научной общественности.

Разломы более высоких порядков в регионе «выявлены» почти «исключительно в камеральных условиях» [68], путем дешифрирования материалов дистанционных съемок, реже они подкреплены наземными геофизическими методами. При этом любые линейные структуры в таком случае именуются «разломами», а полевое натурное подтверждение наличия разрывной тектоники почти никогда не выполняется. В «Геологическом словаре» [69] под термином «разлом» понимается «крупная дизъюнктивная (разрывная) дислокация земной коры». К рассмотрению разломов, выделенных только дистанционными методами, следует подходить критически [70]. Во всяком случае, «разломы», выявленные косвенными методами (дешифрированием, палеогеографическим анализом, морфометрическими и геоморфологическими), правильнее называть *линеаментами** — т. е. линейными структурами неясного генезиса, не имеющими выраженного геологического (разрывного) содержания.

Сопоставление схем, составленных на основе интерпретации дистанционных съемок (рис. 3.14), показывает, что три сети «линеаментов», выявленных независимыми авторами, не совпадают по месту расположения, простирацию и другим признакам, а на участке высокой изученности вокруг промплощадки ГХК их плотность и количество нарушений меньших порядков возрастает.

Кроме произвольного характера в выявлении разломов, нужно отметить также и произвол в их наименованиях. Так, Приенисейский разлом иногда именуется Байкало-Енисейским [76]. При этом проводится эта крупнейшая дизъюнктивная структура региона на разных картах по-разному. Ряд исследователей проводят линию разлома прямо по долине Енисея, другие — в 20–30 км западнее русла реки. Как уже было сказано, Курышский разлом в некоторых работах получил наименование Ангара-Тасеевского. Более того, нарисовав «сетку» разломов, не все считают необходимым условием дать их надежную топографическую фиксацию, ограничиваясь простыми рисунками [76]. Поэтому, увидев название разлома в данном регионе, очень трудно быть уверенным в его соответствии этому названию на картах, особенно — на картах, составленных разными исследователями.

Гидрогеологические условия. В современной официальной схеме гидрогеологического районирования Российской Федерации Енисейский кряж получил наименование «Енисейская гидрогеологическая складчатая область». Под термином гидрогеологической складчатой области (ГСО) понимается совокупность положительных и отрицательных тектонических структур, представляющая собой горно-складчатое сооружение определенного цикла складчатости, состоящее из гидрогеологических массивов и предгорных и межгорных артезианских бассейнов [77, 78]. Межгорные и предгорные адартезианские структуры встречаются только в Заангарской части Енисейского кряжа, а его Ангара-Канский выступ представляет собой классический гидрогеологический массив, состоящий из нестратифицированных метаморфических и интрузивных образований, водоносных по зонам экзогенной трещиноватости и тектонических нарушений.

Большой вклад в изучение гидрогеологических условий Ангара-Канского гидрогеологического массива внесли А. В. Носухин, А. В. Гончаров, Н. Н. Петрова, В. А. Трофимов, В. С. Москалишин, Л. Н. Старицына и др. В последние годы

* Линеаменты (лат. *lineamentum* — линия, контур) — линейные и дугообразные элементы рельефа планетарного масштаба, связанные с глубинными разломами [71]. Данный термин предложил использовать в 1904 г. американский геолог У. Хоббс. По своему масштабу они могут быть планетарными, региональными или локальными. Линементный анализ является одним из наиболее эффективных методов изучения глубинного строения территорий.

подземные воды в глубинной части массива были изучены на Енисейском участке В. А. Карауловым, А. Ю. Озерским, В. Г. Румыниным, А. М. Никуленковым, И. В. Токаревым (см. ниже раздел 5.2).

Тем не менее в целом гидрогеологическую изученность Ангара-Канского гидрогеологического массива следует признать неудовлетворительной, что объясняется крайне низкой водоносностью пород и отсутствием перспектив для организации водоснабжения населения и промышленных объектов, а также слабой населенностью этой территории. Запасы подземных вод в пределах всей Енисейской ГСО составляют всего около 2,5 % от утвержденных запасов подземных вод Красноярского края [79].

Вследствие слабой общей по региону изученности и нестратифицированного характера пород, слагающих гидрогеологический массив, пока нет достаточных материалов для выявления связи между водоносностью комплексов и пород и их петрографическим составом и обоснования достоверной гидрогеологической стратификации. В соответствии с общими представлениями, первой от поверхности в массиве находится водоносная зона экзогенной трещиноватости, в которой циркулируют грунтово-трещинные воды, распространенные до глубины 70–80 м. В зоне разломов формируются трещинно-жильные воды, проникающие до глубин в несколько сотен метров [80]. Подземные воды в большинстве случаев имеют свободную поверхность, лишь под чехлом слабопроницаемых покровных отложений они приобретают небольшой местный напор, а в тальвегах эрозионных врезок скважины иногда слабо изливаются.

Водоносность зоны экзогенной трещиноватости неравномерная и, как правило, низкая, поэтому руководитель государственной гидрогеологической съемки масштаба 1:200 000 Н. Н. Петрова [81] назвала зоны экзогенной трещиноватости в архейско-протерозойских породах «относительно водоносными». Под этим термином с 1999 г. рекомендовано понимать слабопроницаемые гидрогеологические тела [82]. Слабопроницаемая экзогенная трещиноватость проявляется во всех породах региона, но, по-видимому, дайки, сложенные породами основного состава, обладают несколько пониженной проницаемостью. Дебиты редких буровых скважин изменяются от 0,006 до 0,8 л/с при понижениях до 36,7 м. Коэффициенты фильтрации изменяются от тысячных долей до 0,02 м/сут, что формально позволяет считать породы слабопроницаемыми, так как нижний предел для слабопроницаемых пород принят равным 0,005 м/сут [83]. Лишь в локальных зонах разрывных нарушений коэффициенты фильтрации достигают первых единиц м/сут. Глубина залегания уровня подземных вод в скважинах по региону колеблется от 0 до 60 м. По литологическим и тектоническим контактам наблюдаются многочисленные нисходящие родники и мочажины, дебиты их чаще всего составляют 0,2–0,5 л/с, реже они достигают 1,5–3,8 л/с.

С глубиной фильтрационные свойства зоны трещиноватости затухают. Подземные сооружения Горно-химического комбината расположены ниже зоны экзогенной трещиноватости (см. раздел 4.3). По наблюдениям ВНИПИпромтехнологии, здесь приток в подземные выработки происходил по трещинам с шириной раскрытия от 0,1 до 0,5 мм и более. Расстояние между трещинами в системах колеблется от 0,2 до 1,5 м, при этом наблюдаются трещины открытого и закрытого типа, заполненные хлоритом, карбонатами, гидроокислами железа, глинистыми минералами. Коэффициент фильтрации среднетрещиноватых гнейсов составил 0,00003–0,00006 м/сут, что соответствует водонепроницаемым породам [83]. В зонах дробления коэффициент фильтрации достигает 0,003 м/сут. Покровные рыхлые отложения территории имеют коэффициент фильтрации 0,1–1,8 м/сут.

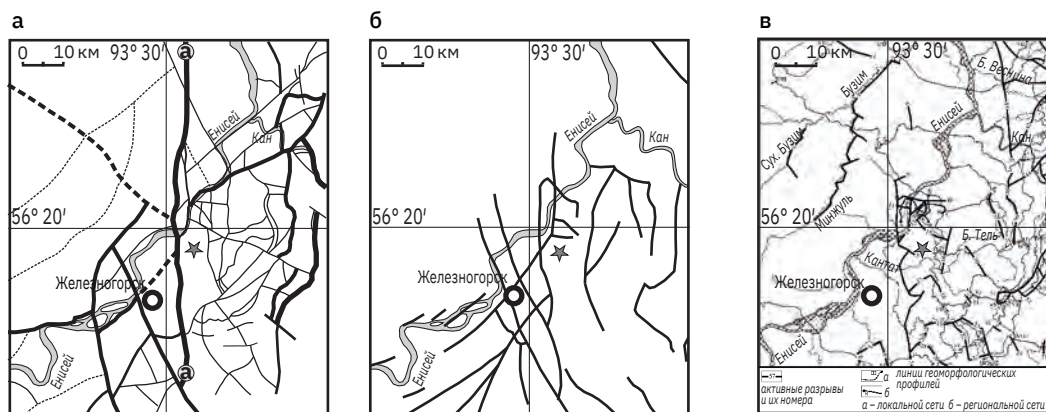


Рис. 3.14. Разломы Нижнеканского массива и прилегающей территории по материалам различных исследователей [72]
 а — карта разломов Нижнеканского массива и сопредельных территорий по Р. М. Лобацкой [73];
 б — карта активных разломов Енисейско-Канского междуречья по Н. В. Лукиной [74]; в — карта активных разломов по [75]
 Все карты приведены в [68] (с. 194, 190, 197 соответственно)

Низкогорный рельеф этой части кряжа predetermined разобшение грунтово-трещинных вод на систему бассейнов стока, совпадающих с водосборными площадями рек и ручьев. Питание подземных вод осуществляется за счет атмосферных осадков в условиях ежегодного восполнения ресурсов. Ведущую роль в формировании запасов играют жидкие осадки в летнее время, тогда как твердые осадки в основном формируют поверхностный сток. Запасы подземных вод в этом районе невелики, перспективны лишь зоны разломов в эрозионных врезах или в условиях гидравлической связи с водотоками. Отрицательную роль на перспективы использования подземных вод оказывает также уязвимость зоны экзогенной трещиноватости для проникновения загрязнения. В некоторых случаях вблизи населенных пунктов отмечено загрязнение подземных вод нитратами и другими компонентами хозяйственно-бытового происхождения.

Разгрузка подземных вод осуществляется в местную гидрографическую сеть, каждый разобщенный бассейн стока имеет собственную долину, куда разгружаются его воды. Для Ангаро-Канского гидрогеологического массива в целом региональной областью разгрузки является р. Енисей, к ней непосредственно движется сток с западной части массива. Восточная и северная части массива разгружаются в притоки Енисея: Кан и Ангару. Для всей водной системы Ангаро-Канского гидрогеологического массива региональным базисом дренирования является абсолютная отметка слияния Ангары и Енисея — 75 м н. у. м. Для водных систем, дренирующих территории периферии Горно-химического комбината и Енисейского участка, местный базис дренирования определяется средним уровнем воды в Енисее — около 120 м.

По величине минерализации подземные воды относятся к пресным, с минерализацией 0,1–0,4 г/дм³, по химическому составу преобладают гидрокарбонатные магниевые-кальциевые воды, обычные для зоны гипергенеза гумидных территорий. Здесь и далее наименования химических типов воды даются от меньших к большим, по принципу «оттенок — цвет», начиная с 20 %-экв. Воды родников

на привершинных водораздельных участках иногда ультрапресные (0,05—0,1 г/дм³), хлоридно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые. По величине водородного показателя воды относятся к нейтральным или слабощелочным, их pH меняется в пределах 7,4—8,5. Общая жесткость обычно варьируется от 4 до 5° Ж, при загрязнении она возрастает до 8° Ж. В таежной зоне воды родников содержат повышенное количество органического вещества, характеризующееся величиной перманганатной окисляемости 5—6 мгО/дм³. Органическое вещество поступает в воду за счет разложения опада таежных растений. Из числа микрокомпонентов повышенными концентрациями в воде характеризуются барий и титан, для которых установлена одинаковая питьевая предельно допустимая концентрация (ПДК), равная 0,1 мг/дм³. Содержание бария во всех пробах превышает ПДК и варьируется от 0,11 до 0,36 г/дм³. Содержание титана превысило ПДК в 60 % проб, в которых оно составило 0,19—1,74 мг/дм³.

Закономерности размещения полезных ископаемых. Енисейская минерагеническая провинция, пространственно совпадающая с территорией Енисейского кряжа, является известным и богатым регионом в отношении эндогенного металлического оруденения. Однако наибольшая продуктивность этой минерагенической провинции приурочена к ее Заангарской части, сформировавшейся в рифейскую (байкальскую) минерагеническую эпоху и характеризующейся большим разнообразием типов рудных полезных ископаемых.

Что касается наиболее древней, Ангаро-Канской, части Енисейской провинции, то при длительных и сложных процессах ее метаморфизма произошло ее деплетирование многими рудными элементами [47]. Поэтому наиболее древняя, архейско-раннепротерозойская эпоха, относительно бедна в минерагеническом отношении. Кроме этого, следует отметить недостаточную геологическую изученность правобережной части р. Енисей в районе Нижнеканского массива, которая многие годы закрыта для поисковых геологических работ, в том числе на рудные полезные ископаемые.

На периферии Нижнеканского массива с комплексом древних пород может быть связано (по аналогии с соседними территориями) золотое, редкометалльное, редкоземельное и радиоактивное оруденение.

Характерным для региона является титановое оруденение (ильменитовые руды), связанное с интрузиями, распространенными среди пород кузеевской метасерии (AR₁). Эндогенное оруденение является бедным, а его масштабы незначительны. Некоторый интерес в отношении титанового сырья представляют лишь современные аллювиальные россыпи с промышленными содержаниями ильменита, образовавшиеся в областях распространения ильменитоносных базитов и ильменитосодержащих кварц-полевошпатовых метасоматитов.

С архейско-раннепротерозойскими ультраметаморфическими гранитоидами и сопровождающими их мигматитами, пегматитами и метасоматитами также связана бедная редкометалльно-редкоземельная минерализация с невысокими концентрациями радиоактивных элементов. В породах названных типов минерализация имеет акцессорный характер (монацит, ортит, сфен, ксенотим, циркон), а радиоактивные элементы находятся в виде примесей в акцессорных минералах. Не образуя рудных концентраций, эти породы являются источником формирования кайнозойских аллювиальных россыпей в Ангаро-Канской части Енисейской провинции с содержаниями редкоземельных минералов, иногда достигающих промышленных значений.

Эндогенное золотое оруденение в пределах Ангаро-Канского блока проявляет связь с массивами гранитоидов, приуроченных к линейным зонам северо-западного направления (Приенисейским, Предивинским и Посольненско-Кузеевским разломами). Мигматит-гранитовая формация этих интрузий характеризуется халько- и литофильной ассоциацией элементов со специализацией на Th, Sn, Pb, Mo. В парагенетической связи с этими гранитоидами и сопровождающими их метасоматитами устанавливается оруденение Au, Mo, Cu, Th, TR. С образованиями гранитовой формации, халькофильной ассоциации и широким спектром сопровождающих их гидротермально-метасоматических образований устанавливается парагенетическая связь рудных концентраций Au, Fe, U, Sb, Sn, TR, Mo, W, Be.

На сочленении гранитоидов Таракского массива с осадочными отложениями Канско-Тасеевской впадины выявлены меденосные формации, получившие наименование медно-урановорудной минерагенической зоны [54].

Помимо рудных месторождений, на территории выявлен ряд нерудных полезных ископаемых. Так, ресурсы керамического пегматита по категориям $P_2 + P_3$ составляют около 1,2 млн т. Они связаны с формацией гранитных пегматитов нижнеканского комплекса.

Выявленные, разведанные и эксплуатируемые месторождения кирпичных глин, песчано-гравийного материала, торфа и подземных вод приурочены к четвертичным отложениям долины Енисея.

Древние магматические и метаморфические формации в южной части Енисейского кряжа слагают Ангаро-Канский выступ кристаллического основания Сибирской платформы и представлены гранитоидами, пронизывающими докембрийские метаморфиты. Крупнейшие гранитоидные массивы Таракский и Нижнеканский считались наиболее привлекательными в качестве перспективной среды для глубинного захоронения РАО. Раннеархейские гранулитогнейсовые образования слагают канский метаморфический комплекс, являющийся самым древним на Енисейском кряже с возрастом метаморфизма около 3221 ± 15 Ма.

Наиболее значимыми разрывными структурами в пределах территории являются глубинные разломы (Приенисейский и Предивинский) и региональные (Нижнеангарский и Курышский), а также значительное количество разрывных структур более высоких порядков. Все эти разломы закладывались в разное время, многократно подновлялись и, по-видимому, продолжают участвовать в современных неотектонических процессах. Разломы высоких порядков «выявлены» преимущественно путем дешифрирования материалов дистанционных съемок и не заверены геологическими методами.

Гидрогеологические условия региона представляют собой классический образец гидрогеологического массива среди нестратифицированных метаморфических и интрузивных образований, водоносных по зонам экзогенной трещиноватости и тектоническим нарушениям. Для Ангаро-Канского гидрогеологического массива в целом региональной областью разгрузки является Енисей.

3.4.2. Новейшая и современная тектоническая активность региона*

Новейшие и современные движения земной коры интегрально отражают эндогенные и экзогенные геодинамические процессы в регионе и являются важными аргументами для обоснования длительной безопасности захоронения высокоактивных РАО в геологических формациях.

Термин «новейшая тектоника» [84], впервые использованный С. С. Шульцем в 1932 г., относится к тектоническим процессам, которые происходили на рубеже среднего и позднего олигоцена или миоцена и привели к формированию форм современного рельефа. Под современной тектонической активностью понимаются движения, происходящие в верхней части земной коры в последние сотни лет. Существует следующая градация возраста движений: современные (до 200 лет), исторические (10^2 – 6×10^3 лет), молодые (до 12×10^3 лет), четвертичные (до $1,6 \times 10^6$ лет) и новейшие — до ~25 млн лет [85, 86].

Судя по распространению миоценовых отложений (кирнаевской свиты, по К. В. Боголепову), вероятнее всего, что тектоническая активизация и воздымание Енисейского кряжа началось с начала миоцена. В то же время юго-западные отроги Енисейского кряжа и сам Нижнеканский массив, по-видимому, были вовлечены в поднятие значительно позднее [34, 68].

На неотектонической схеме района (рис. 3.15) приведены амплитуды градиентов вертикальных скоростей движений, установленных по геологическим данным [87]**. Из нее видно, что территория делится на две части — по направленности вертикальных неотектонических движений, границей которых является р. Енисей: западная — имеет общую тенденцию к погружению, а восточная — наоборот, к поднятию. Данные геодезических наблюдений (см. раздел 5.4) показывают, что в настоящее время эта тенденция сохраняется.

Направленность неотектонических движений хорошо прослеживается и в структуре террас р. Енисей. Установление возраста ярусов рельефа позволяет перейти к количественной оценке новейших тектонических движений и выявления тенденции — нарастание или снижение темпов поднятий во времени. По данным Н. В. Лукиной [74, 88, 89]**, время начала последней тектонической активизации (1,8 млн лет) фиксируется аллювиальными отложениями высоких (VII и VI) надпойменных террас Енисея и его притоков. Эти террасы врезаны в более древние поверхности выравнивания (ПВ-1—ПВ-3 на рис. 3.16).

Разломная сеть территории сформировалась на стыке краевых структур древней и молодой платформ. Наиболее существенную роль в их разграничении сыграла система структур краевого шва Сибирской платформы в южной части Енисейского кряжа, выделяемая в качестве субмеридионального глубинного Приенисейского разлома (см. подраздел 3.4.1). Начиная с триаса, западное крыло шва по серии тектонических ступеней неизменно погружается, а над ним вплоть до голоцена формируются чехольные образования молодой Западно-Сибирской плиты. Восточное крыло, напротив, с позднего докембрия до кайнозоя стабильно находится в поднятом состоянии.

* Раздел является несколько измененным фрагментом книги «Подземная изоляция радиоактивных отходов» [68], ссылки на некоторые отчеты приводятся по ней.

** Ссылки приведены по [68].

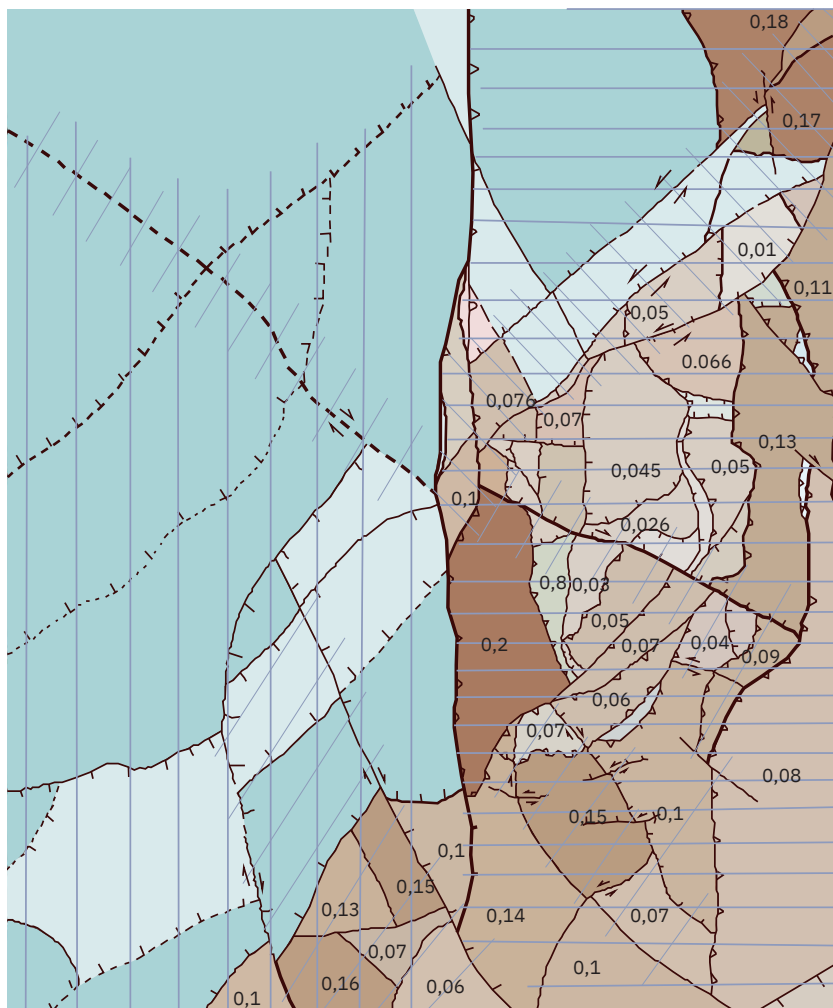


Рис. 3.15. Неотектоническая схема интрасруктуры Байкало-Енисейского разлома в зоне сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в нижнем течении р. Кан [76]

Числами 0,01–0,21 показаны скорости вертикальных тектонических движений за плейстоцен, мм/год, вертикальная штриховка соответствует областям преобладания близгоризонтального растяжения, горизонтальная — областям близгоризонтального сжатия, косая штриховка соответствует локальным областям левосдвиговых и правосдвиговых тангенциальных напряжений

ГНСС-наблюдения, выполненные в 2012–2019 гг., показали, что скорость сближения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты в зоне взаимодействия южной части Енисейского кряжа можно оценить величиной 2–4 мм/год. Причем скорость современных движений Западно-Сибирской плиты ниже на 1–2 мм/год, чем Сибирской платформы [90]. Возможно, с этим связано воздымание Атамановского отрога, когда произошло гипсометрическое разобщение древней Сибирской платформы и молодой Западно-Сибирской плиты. Сибирская платформа оказалась поднятой до абсолютных отметок ~700–800 м, а Западно-Сибирская плита — относительно опущенной, на 120–200 м.

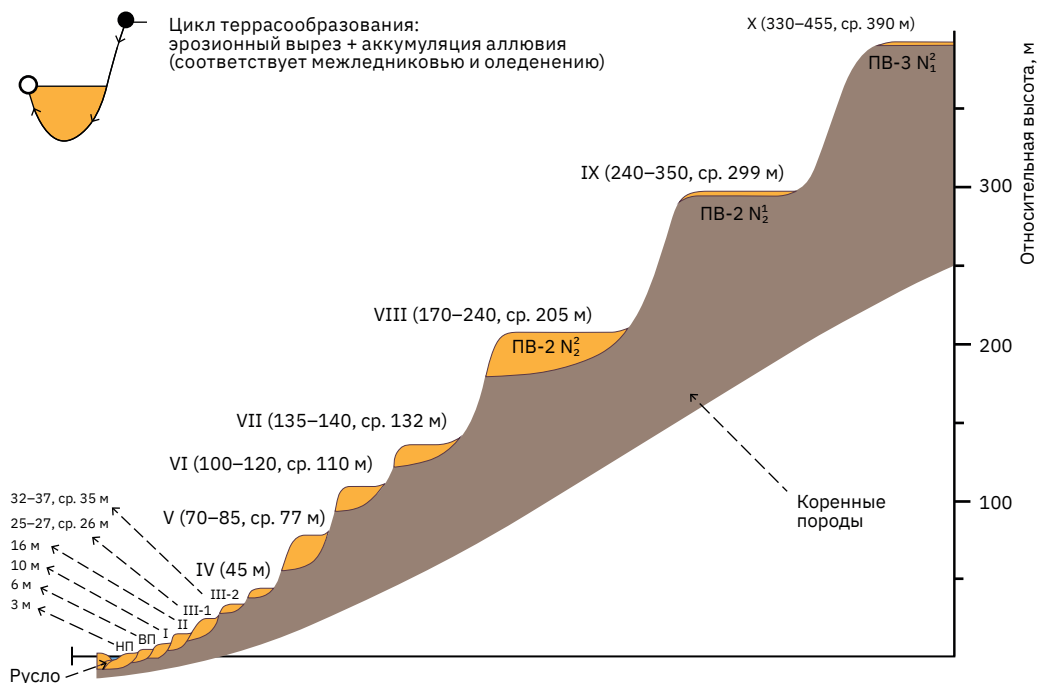


Рис. 3.16. Ярусы рельефа от р. Енисей до Нижнеканского массива [74]

Новейшие вертикальные движения

Анализ ярусности рельефа [88, 91]* свидетельствует о положительных тектонических движениях в позднелицен-четвертичное время. Зависимость относительных высот террас и поверхностей выравнивания района от абсолютного возраста (рис. 3.17) характеризует темпы эрозионного расчленения района, которые могут быть отождествлены со скоростями положительных тектонических движений (чем круче наклон кривой, тем выше скорости тектонических движений).

Видно, что ранне- и позднелиценная поверхности выравнивания (ПВ-2 и ПВ-1) формировались в условиях спокойного тектонического режима, когда новейшее воздымание территории в среднем на 190 м произошло в течение 3360 тыс. лет, с 5000 до 1640 тыс. лет. Средняя скорость новейшего поднятия региона в этот период равнялась 0,055 мм/год.

Незначительное увеличение скорости произошло на рубеже плейстоцена и эоплейстоцена, когда формирование поверхностей выравнивания сменилось террасообразованием. Средняя скорость неотектонического поднятия региона в эоплейстоцене, равная средней величине эрозионного врез в 73 м, деленной на время его формирования с 1640 до 730 тыс. лет, составляла 0,08 мм/год.

В начале плейстоцена скорость поднятия незначительно увеличилась и на протяжении раннего, среднего и первой трети позднего плейстоцена, от 730 до 52 тыс. лет, когда формировались врез в VII террасу и поверхности VI-III-1 террас Енисея на относительных высотах в среднем от 132 до 26 м, сохранялась постоянной. Скорость новейшего поднятия региона равнялась в среднем 0,15 мм/год.

* Ссылки приведены по [68].

На рубеже второй трети позднего плейстоцена, т. е. с 52 тыс. лет, скорость неотектонического поднятия региона увеличилась и до 9,7 тыс. лет, в период формирования II и I террас от 26 до 10 м высоты над руслом Енисея, сохранялась неизменной. Расчет показал, что средняя скорость новейшего поднятия в это время равнялась 0,38 мм/год. В начале голоцена, 9,7 тыс. лет назад, отмечается еще одно увеличение скорости современного тектонического поднятия до 1 мм/год [34, 92]*.

Необходимо подчеркнуть, что приведены скорости, которые получены по геологическим данным. Их сравнение со скоростями современных движений по данным ГНСС-наблюдений необходимо проводить с учетом масштабного эффекта. Приведенная тенденция увеличения скоростей движений с уменьшением интервала осреднения, отмеченная Н. И. Николаевым [85] и др., является фундаментальной закономерностью, связанной с масштабным эффектом. Поэтому значения средних скоростей новейшего и современного поднятия региона за разные отрезки времени нельзя рассматривать как тенденцию бесконечного увеличения этих скоростей в будущем.

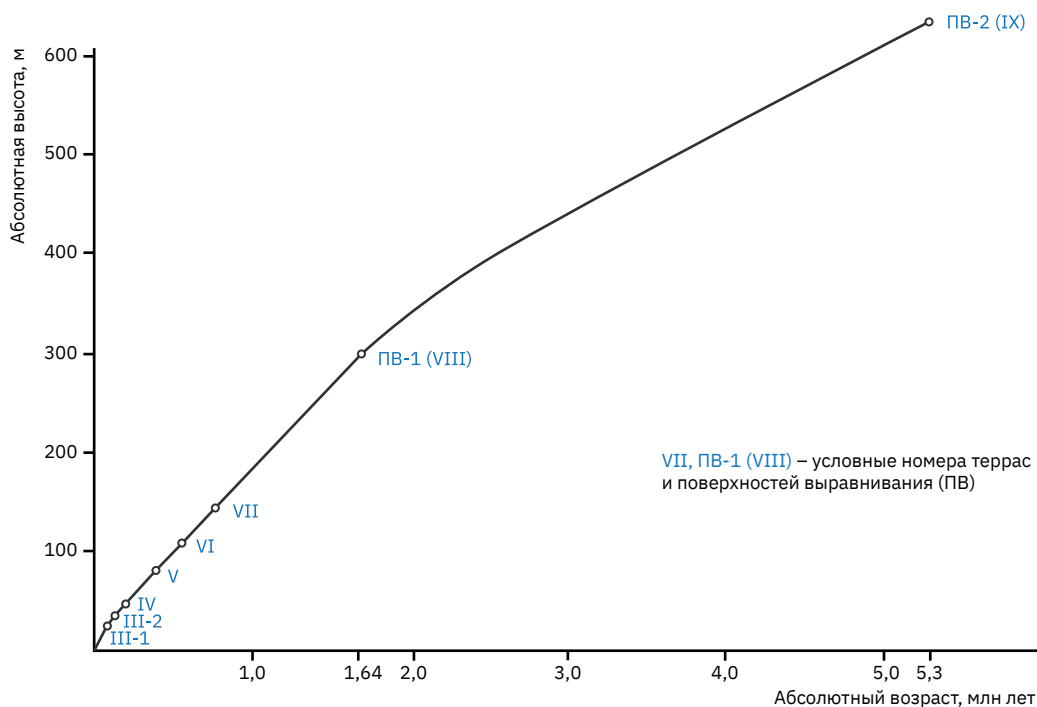


Рис. 3.17. График зависимости гипсометрии поверхностей выравнивания от их абсолютного возраста [68, 91]

* Ссылки приведены по [68].

Как видно из табл. 3.3 [93]*, средние скорости новейших тектонических поднятий отдельных тектонических блоков с 1640 до 730 тыс. лет, т. е. за 910 тыс. лет, колеблются от 0,051 до 0,093 мм/год. У восточных блоков эти скорости выше по сравнению с западными.

Таблица 3.3. Средние скорости новейших поднятий блоков северной части Нижнеканского массива за период с 1640 до 730 тыс. лет [68, 93]*

№ п/п	Местоположение блока между разломами	Ярусы рельефа	Разница высот, м	Скорость, мм/год
1	Долины Черского и Большетельским	VIII-VII	136–91=46	0,051
2	Большетельским и Малотельским	VIII-VII	163–103=60	0,066
3	Малотельским и Большим Итатским	VIII-VII	188–124=64	0,070
4	Большим Итатским и Малым Итатским	VIII-VII	241–172=69	0,075
5	Малым Итатским и Канско-Енисейским	VIII-VII	257–172=85	0,093

Сеть новейших разломов

Одним из главных показателей новейшей и современной тектонической активности регионов является наличие и густота разломов, активных на последнем этапе тектонического развития, т. е., как правило, в позднем плейстоцене и голоцене или, во всяком случае, в четвертичный период. В [88] приведены результаты морфоструктурного анализа активности разломов и тектонической мегатрещиноватости в северной части Нижнеканского массива в масштабе 1:50 000. Активизировавшиеся на новейшем этапе древние и новообразованные разломы, как правило, оказываются выраженными в рельефе в виде одиночных или ступенчатых тектонических уступов, смещающих поверхности выравнивания, уровни речных террас или другие формы рельефа.

Скорости новейших тектонических смещений по активным разломам северной части Нижнеканского массива рассчитаны по разнице высот одновозрастных ярусов рельефа на разных крыльях этих разломов (табл. 3.4). Эти скорости не превышают тысячных и сотых долей миллиметра в год. При этом скорости смещения по разломам на востоке района выше, чем на западе.

Эпоха новейшей активности наложила сильный отпечаток на тектоническую структуру района. Она не только увеличила амплитуду у обновленных древних разломов, но и создала новые разломы, новообразованные тектонические швы [73, 93]*. На рис. 3.18 приведена карта 1993 г. крупных разломов Енисейско-Канского междуречья, составленная Н. В. Лукиной [74]. Современная тектоническая активность древних разломов подтверждается высокоточными геодезическими измерениями. Активные разломы: Малый Итатский, Большой Итатский, Малотельский, Большетельский, Правобережный, Атамановский, Муратовский, Саманский, Красноярский-I, Красноярский-II и Сосноборский имеют амплитуду вертикальных смещений от первых десятков до нескольких сотен метров. Среднее расстояние между ними довольно выдержано и составляет примерно 5–6 км.

* Ссылки приведены по [68].

Таблица 3.4. Скорости новейших тектонических смещений по активным разломам северной части Нижнеканского массива [68, 93]

№	Активные разломы	Ярусы рельефа	Разница высот крыльев, м	Возраст, тыс. лет	Скорость, мм/год
1	Правобережный	VIII	30	1640	0,018
2	Долины Черского	VIII	10	1640	0,005
3	Большетельский	V	20	380	0,005
4	Малотельский	VI	10	550	0,002
5	Большой Итатский	VIII	40	1640	0,024
		VII	20	730	0,027
6	Малый Итатский	VII	20	730	0,027

Наибольшая вертикальная амплитуда кайнозойских смещений у Муратовского разлома — 600–750 м. Он разграничивает блоки, выполненные архейскими и раннепротерозойскими образованиями. Глубина проникновения Муратовского разлома достаточно большая и оценивается [87]* на севере до 7,5 км, а на юге — до 25–30 км. По кинематическому типу Муратовский разлом представляет собой взброс, взбросо-надвиг. Кинематика смещений по нему оставалась неизменной в течение всего периода его существования. В кайнозое вдоль него сформировался крутой тектонический уступ высотой 150–250 м с характерным «взбросо-надвиговым» рельефом, основными чертами которого являются отсутствие эскарпа, наличие зеркал скольжения, обращенных внутрь вдоль поверхности сместителя.

Другие разломы, омоложенные на новейшем этапе: Красноярский-II, Малотельский, Правобережный и, видимо, Канско-Енисейский имеют вертикальную амплитуду смещения 130–350 м. Они располагаются примерно на равном расстоянии друг от друга — 10–11 км. Новообразованные разломы — Малый Итатский, Большой Итатский, Большетельский, Атамановский, Саманский, Красноярский-I и Сосновоборский — имеют амплитуду вертикального смещения — от 20 до 100 м.

Расчленение западной части района и прогноз блоковых движений представлены в работах Р. М. Лобацкой [73, 76] (рис. 3.19)**. Внутреннее строение зоны западной части Нижнеканского массива, прилегающей к Байкало-Енисейскому глубинному разлому, определяется густой сетью локальных близмеридиональных и северо-северо-восточных надвиговых и сбросовых структур, имеющих, как правило, восточное падение.

Углы падения плоскостей сместителей этих разломов варьируют от 20–250° у надвигов до 65–250° у взбросов и сбросов. Система упомянутых разломов образует серию микроблоков, вытянутых в близмеридиональном или северо-восточном направлении. Ширина блоков — от 2 до 6–8 км. Часто по ним выработаны долины водотоков высоких порядков. Характерной чертой этих водотоков является асимметрия бортов, один из которых обычно крутой даже в случае не слишком глубокого эрозионного вреза долины [76]. Расстояние между разломами составляет 4–5 км между региональными

* Приводится по [68].

** В подразделе 3.4.1 (рис. 3.14) были сопоставлены между собой разломы на картах, составленных по дистанционным данным разными авторами на эту же территорию.

структурами и около 2 км между локальными. Сеть локальных разломов сгущается вблизи диагональных разломных структур, рассекающих и смещающих близмеридиональную систему. Построенная автором цитируемой работы сеть неотектонических разломов разных порядков имеет сложную структуру макро- и микроблоков. Каждый из них характеризуется различными темпами неотектонических движений, отразившимися в ряде их морфотектонических особенностей. Имеется взаимосвязь между уровнем раздробленности макроблоков и характером поля тектонических напряжений. Участки максимальной раздробленности макроблоков соответствуют местам перекрытия регионального поля сжатия локальными сдвиговыми полями напряжений вдоль право- и левосдвиговых разломных структур.

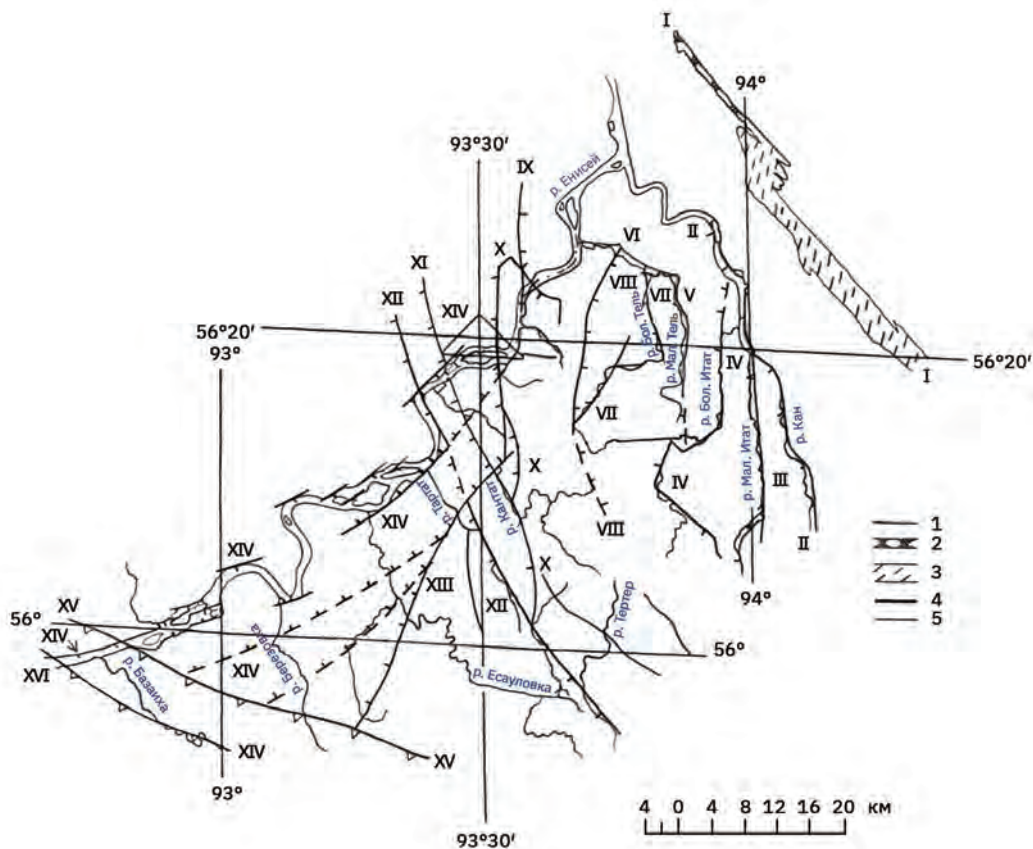


Рис. 3.18. Карта активных разломов Енисейско-Канского междуречья [74]:

1–3 — древние разломы, неомоложенные на современном этапе;

4–5 — древние разломы, омоложенные и образованные на современном этапе.

Разломы:

I — Приенисейский;
 II — Канско-Енисейский;
 III — Малый Итатский;
 IV — Большой Итатский;
 V — Малотельский;
 VI — Тельского Быка;
 VII — Большетельский;
 VIII — Правобережный;

IX — Атамановский;
 X — Муратовский;
 XI — Красноярский 1;
 XII — Красноярский 2;
 XIII — Сосновоборский;
 XIV — Енисейский;
 XV — Ийско-Канский;
 XVI — Базахинский

В 2007 г. в результате полевых наблюдений, выполненных С. В. Беловым [68] в среднем течении р. Кан, удалось уточнить особенности трещинной тектоники района. Полевые исследования включали в себя как изучение береговых скальных обнажений, так и небольшие поперечные маршруты вверх по притокам реки.

В ходе изучения трещинной тектоники было установлено, что в гранитах Нижнеканского массива развиты два генетических типа трещин:

- контракционные, эндокинетические, связанные с внутренними напряжениями в массиве, возникшими при его остывании и уменьшении объема (рис. 3.20, 3.21);
- тектонические, наложенные, возникшие при воздействии внешних тектонических усилий (рис. 3.22).

Для контракционных трещин в гранитах массива характерна классическая трещиноватость, типичная для многих гранитных плутонов. В теле гранитов развиты прежде всего две крутые и одна пологая субгоризонтальные системы, которые формируют матрацевидную отдельность, типичную для многих гранитных плутонов. Ориентировка крутопадающих систем связана с формой массива. Как правило, они параллельны или перпендикулярны контактам массива, поэтому их простирание меняется в соответствии с направлением контакта.

Активные разломы в районе Нижнеканского массива подразделяются на три группы [87, 91]*:

- активные в настоящее время, смещения по которым установлены вторым высокоточным геодезическим нивелированием или по деформациям коренного ложа русла р. Енисея;
- активные в позднем плейстоцене и голоцене, подтвержденные деформациями разновозрастных форм рельефа;
- активные в четвертичное время, подтвержденные смещениями позднеплиоценовой поверхности выравнивания, более поздняя активность которых не доказана.

Современное региональное поле напряжений

На рис. 3.23 приведены фрагменты из базы данных World Stress Map [94], которая представляет собой глобальный сборник информации о современном поле напряжений в земной коре. Из данных по характеризующему региону следует, что при задании граничных условий моделирования полей напряжений следует ориентироваться на направление действия главных напряжений в районе с азимутами в интервале от 0 до 35 градусов. Это в принципе согласуется с основными тектоническими структурами в регионе.

Геотермические условия

На территории Сибири тепловой поток изменяется в широких пределах: от 12 до 160 мВт/м², однако преобладающим является уровень поля 40–60 мВт/м² [95]. Среднее значение теплового потока в Сибири составляет примерно 50 мВт/м², что заметно ниже среднеконтинентальной его величины — 62 мВт/м². На рис. 3.24 приведен фрагмент карты интенсивности теплового потока [96], из которой видно, что рассматриваемый район Нижнеканского массива не имеет каких-то аномальных значений (средний фон — около 50 мВт/м²).

* Ссылки приведены по [68].

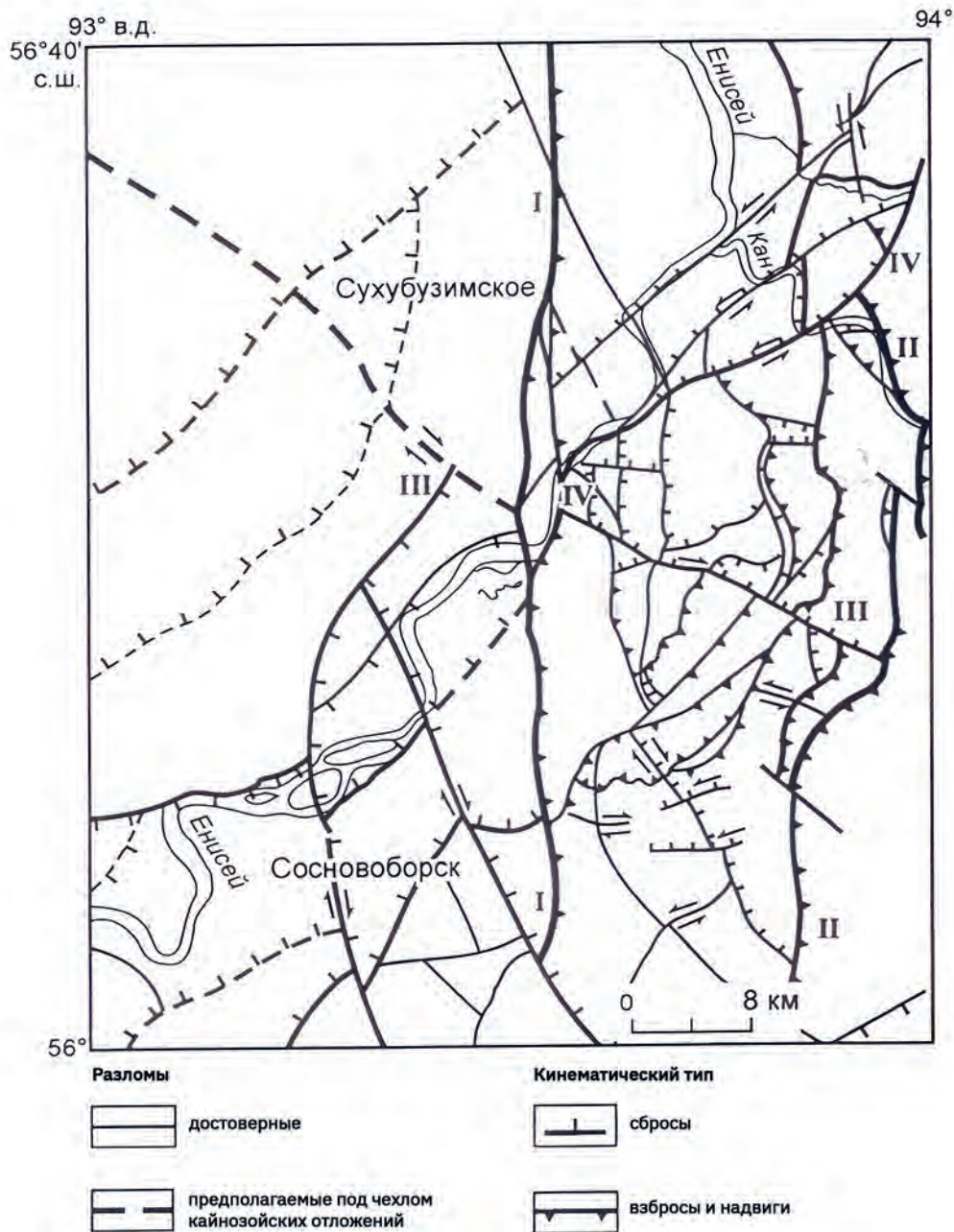


Рис. 3.19. Карта разломов по данным [73]:

- I — Муратовский;
- II — Канско-Енисейский;
- III — Итатский;
- IV — Нижнеканский.

Толщина линий соответствует рангу разлома, выделяются генеральные, региональные, локальные разломы



Рис. 3.20. Контракционная трещиноватость в гранитах Нижнеканского массива (берег р. Кан)



Рис. 3.21. Контракционная трещиноватость в верхней части разреза Нижнеканского массива



Рис. 3.22. Линейная трещинная зона, возникшая в результате наложенных тектонических процессов

По данным [95, 96], район Нижнеканского массива находится близ изотермы 1100°C на глубине 90 км. В связи с этим геотермическая ступень может быть принята равной 80–85 м. Следует отметить, что этот район в целом благоприятен для захоронения РАО по температурным условиям: практически до глубины 6–8 км температура в земной коре ниже 100°C .

Следует признать, что до сих пор масштабы и интенсивность современной активности разломов, выявленных в регионе, как и достоверность их выделения, остаются неоднородными. Для некоторых крупных разломов утверждение об активности практически абсолютно, для других доказательств недостаточно, и есть третья группа — в основном мелких линеаментов, для которых таких сведений практически нет. Эта неопределенность в информации проявится в более крупных масштабах — районном и локальном (см. раздел 5.4).

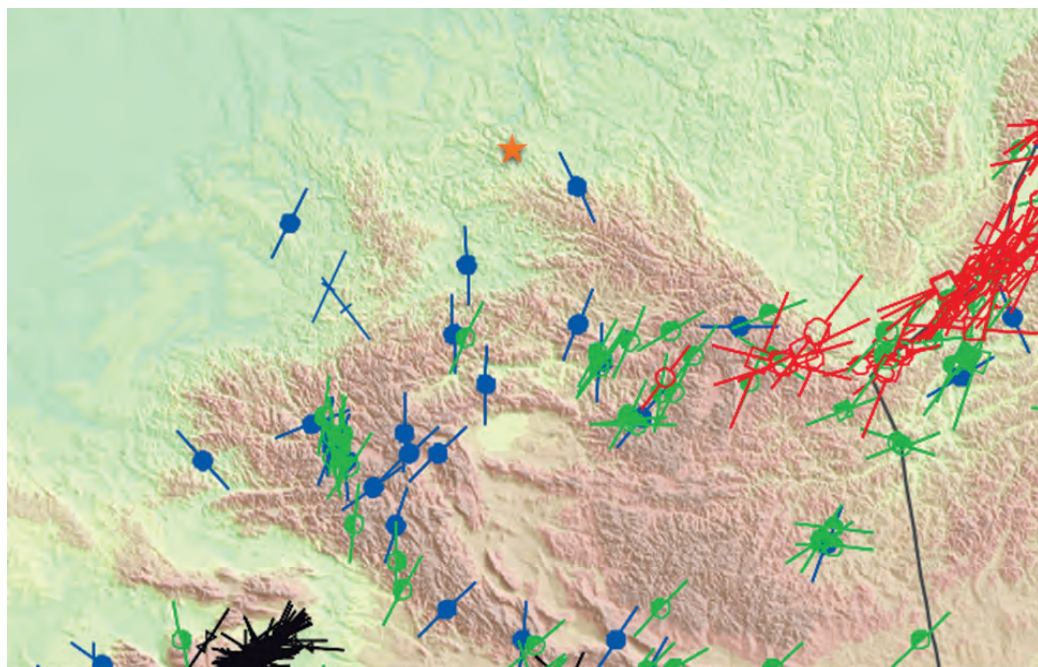


Рис. 3.23. Фрагменты из базы данных World Stress Map [94] с направлениями действия главных напряжений в регионе. Звездой показано место расположения Нижнеканского массива

3.4.3. Оценка сейсмической опасности*

Район Нижнеканского массива принадлежит к активному в сейсмическом отношении внутриконтинентальному Алтай-Саян-Байкальскому региону Северной Евразии (регион 3.1, по карте ОСР [97], рис. 3.25).

На территории России достаточно сильными местными землетрясениями в этом регионе характеризуется Восточный Саян, где известны землетрясения с магнитудой около $M = 7,0$ и сейсмическим эффектом в эпицентральных областях I_0 около 9 баллов (1800, 1829, 1839, 1950 гг.). Также обнаружены древние геологические следы (палеосейсмодислокации) еще более крупных сейсмических событий.

Крупнейшие сейсмические катастрофы в начале прошлого века имели место в Монгольском Алтае. К их числу относятся Хангайские землетрясения 9 и 23 июля 1905 г. Первое из них, по-видимому, имело магнитуду $M = 8,4$, а сейсмический эффект в эпицентральной области составил $I_0 = 11\text{--}12$ баллов. Магнитуда и сейсмический эффект второго землетрясения, по-видимому, близки к предельным величинам магнитуд и сейсмического эффекта — $M = 8,7$, $I_0 = 11\text{--}12$ баллов. Оба землетрясения ощущались на расстояниях до 2000 км от эпицентра. В Иркутской, Томской, Енисейской губерниях и по всему Забайкалью интенсивность сотрясений достигала $I_0 = 6\text{--}7$ баллов. Другими сильными землетрясениями на сопредельной с Россией территории Монголии были Монголо-Алтайское (1931 г., $M = 8,0$, $I_0 = 10$ баллов), Гоби-Алтайское (1957 г., $M = 8,2$, $I_0 = 11$ баллов) и Моготское (1967 г., $M = 7,8$, $I_0 = 10\text{--}11$ баллов).

* Подраздел подготовлен на основе оригинальных материалов В. И. Уломова (2008—2010 гг.) [97—100].

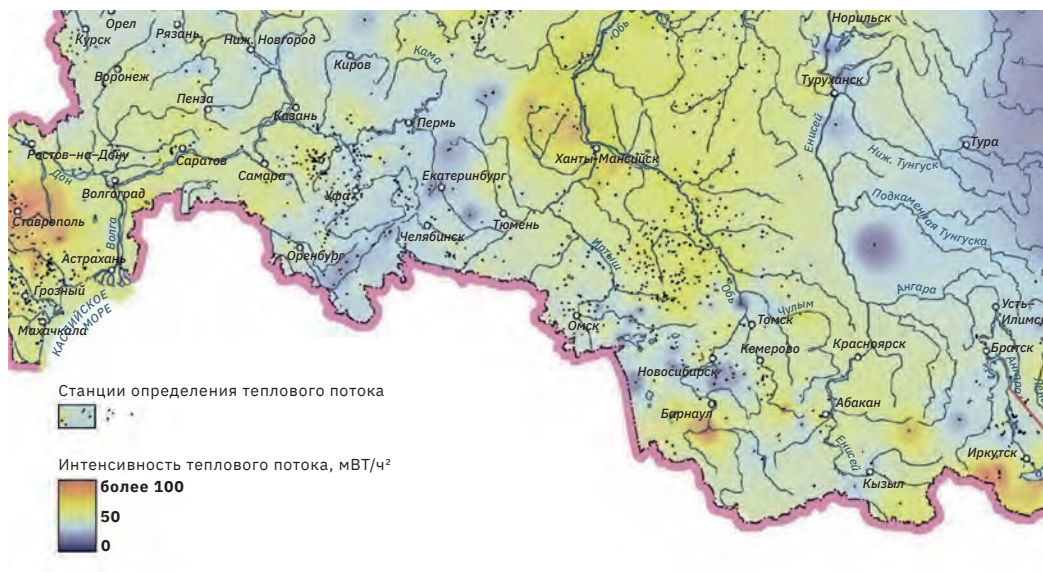


Рис. 3.24. Интенсивность теплового потока в регионе [96]

Согласно карте ОСП-97-D, район расположен в зоне возможных 7–8-балльных сотрясений, повторяющихся здесь в среднем один раз в 10 000 лет, что соответствует среднегодовому риску опасного природного явления 10^{-4} .

Для объектов, расположенных в пределах зон интенсивности землетрясений более 6 баллов по ОСП-97-B, уточнение сейсмической опасности должно выполняться с учетом многочисленных специализированных и строительных требований (для ПГЗРО из них в первую очередь актуальны [101–105]). На карте ОСП-97-D участок Енисейский располагается [106]* в 8-балльной зоне (рис. 3.26, 3.27). Кроме того, непригодными являются районы, сейсмичность которых характеризуется интенсивностью $MP3 > 8$ баллов [105].

Для исключения подобной критической ситуации, складывающейся в региональном масштабе, на рекомендуемой площадке необходимо проводить дополнительные крупномасштабные исследования для составления карт:

- очаговой сейсмичности, современной геодинамики и детального сейсмического районирования (ДСР) района;
- сейсмического микрорайонирования (СМР) площадки для естественных и техногенно-измененных условий и данные о параметрах проектных землетрясений (ПЗ) и максимальных расчетных землетрясений (МРЗ) с учетом техногенно-измененных условий площадки и т. д.

* Приводится по [68].

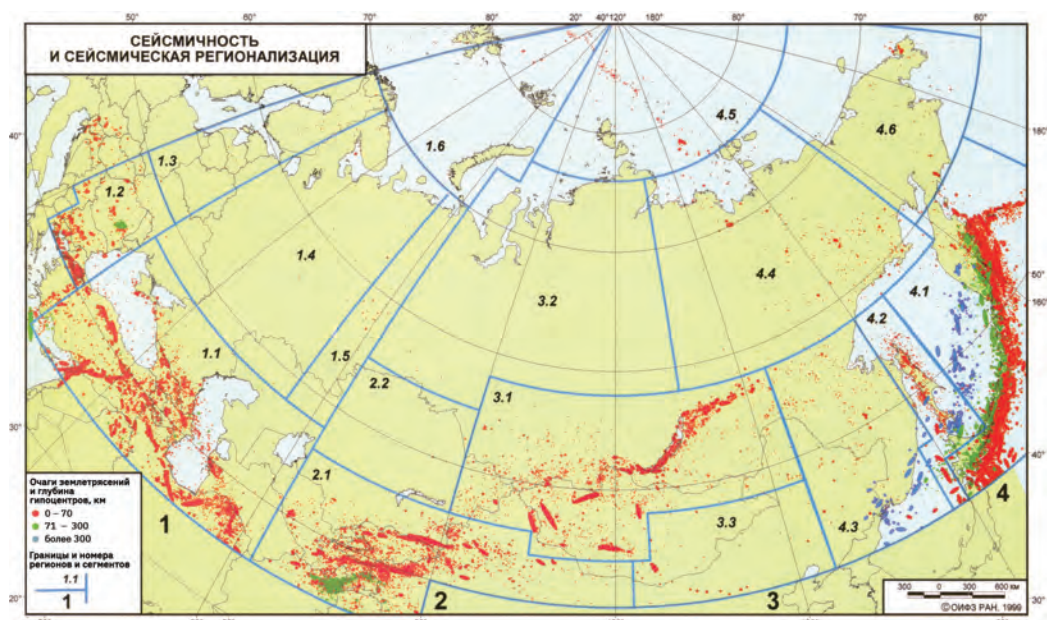


Рис. 3.25. Сейсмичность и сейсмическая регионализация Северной Евразии
Очаги землетрясений [97] показаны лишь в пределах внешнего контура регионов и в соответствии с их размерами, ориентацией и интервалом глубин гипоцентров
Секторы: 1 — Восточно-Европейский; 2 — Центрально-Азиатский; 3 — Центрально-Сибирский; 4 — Восточно-Азиатский
Регионы: 1.1 — Иран-Кавказ-Анатолийский; 1.2 — Карпато-Балканский;
1.3 — Прибалтийский; 1.4 — Восточно-Европейский; 1.5 — Уральский; 1.6 — Новоземельский;
2.1 — Памиро-Тянь-Шаньский; 2.2 — Центрально-Казахстанский; 3.1 — Алтай-Саяно-Байкальский;
3.2 — Западно-Сибирский; 3.3 — Восточно-Монгольский; 4.1 — Курило-Камчатский;
4.2 — Сахалино-Японский; 4.3 — Приамуро-Приморский; 4.4 — Верхоянский; 4.5 — Североземельский; 4.6 — Чукотский

В 2001 г. КРАСНИИГиМС выполнил комплексные геолого-геофизические исследования с целью уточнения сейсмической опасности в Красноярск-Железнодорожной промышленной агломерации [107]*. В итоге исследований была выделена протяженная сейсмоактивная структура, проходящая вдоль Восточного Саяна, которая ранее не была учтена при разработке комплекта карт ОСР-97. На рис. 3.28 показаны линеаменты и домены, которые потенциально способны вызвать в районе ПИЛ сотрясения в 5,5 и более баллов из модели зон ВОЗ ОСР-97 Алтае-Саянского региона. Необходимо подчеркнуть, что региональные геофизические исследования (МОВ, МТЗ, АМТЗ), проводимые в рамках федеральных программ, не выявили структур, которые можно было бы интерпретировать как новые (неучтенные в модели зон ВОЗ ОСР-97) активные разломы, способные сгенерировать землетрясение $M > 6$.

Определенные, хотя и незначительные, изменения претерпел домен D-300 (рис. 3.28). На востоке домен D-300 граничит с доменами, входящими в Байкальскую рифтовую зону, а с севера — со слабоактивными областями, у которых $M_{\max} \leq 4,5$. Южная граница этого домена, примерно до меридиана 100°N , практически совпадает с Кандатским разломом и расположена между параллелями 53°E и 54°E . Эти и другие обстоятельства, касающиеся конфигурации домена D-300, допускают возможность уточнения его северной границы в районе Красноярск-Железнодорожной агломерации.

* Приводится по [108].

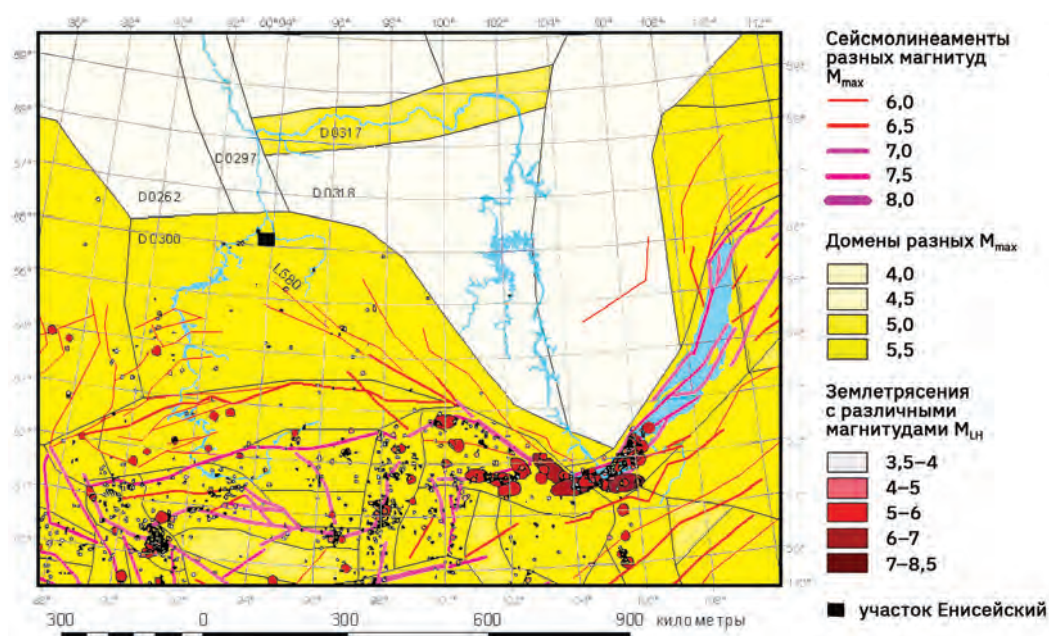


Рис. 3.26. Фрагмент линеаментно-доменно-фокальной модели зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), использованной при создании карт ОСР-97 Красноярск–Железногорск–Дивногорской агломерации [68, 106]

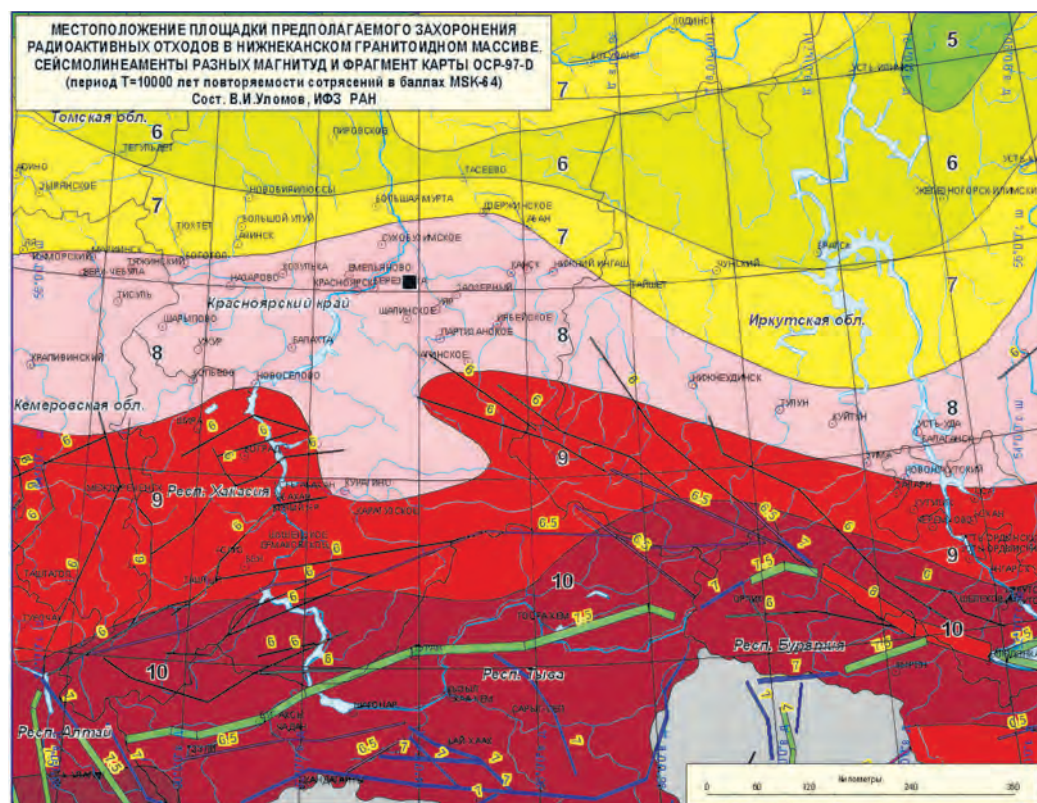


Рис. 3.27. Карта ОСР-97-D района [68, 106]

Была также получена дополнительная информация о сейсмичности в районе линеамента L580. В относящейся к нему зоне вблизи эпицентра землетрясения 1938 г. (координаты эпицентра 55,2°N, 94,6°E, магнитуда $M=5,0$) была обнаружена крупная палеосейсмодислокация, названная по ближайшему населенному пункту Малиновской. Ее возраст около 9600 лет. По смещению краев разлома интенсивность сотрясения в ее эпицентре оценена в 9 баллов. Если пользоваться традиционной формулой связи интенсивности сотрясений I с магнитудой M и эпицентральной дистанцией R землетрясения $I = 1,5M - 3,5 \lg R + 3,0$ (по Н. В. Шебалину), то для магнитуды $M = 7,0$ и при удалении от эпицентра на $R = 5$ км можно получить очень высокую величину — $I = 11$ баллов. Если же пользоваться более реалистичным нелинейным соотношением «магнитуда—расстояние—интенсивность», при котором наблюдается «насыщение» сейсмического эффекта вблизи эпицентра, то эффект несколько снижается до $I = 10$. При магнитуде $M = 5,7$, как по первому, так и по второму варианту, оценка сейсмический эффект составит $I = 9$. Таким образом, с учетом соотношения «магнитуда—расстояние—интенсивность», а также возраста и расположения данной дислокации исполнители признают вполне разумным повышение максимальной возможной магнитуды на линеаменте L580 до величины $M = 7,0$.

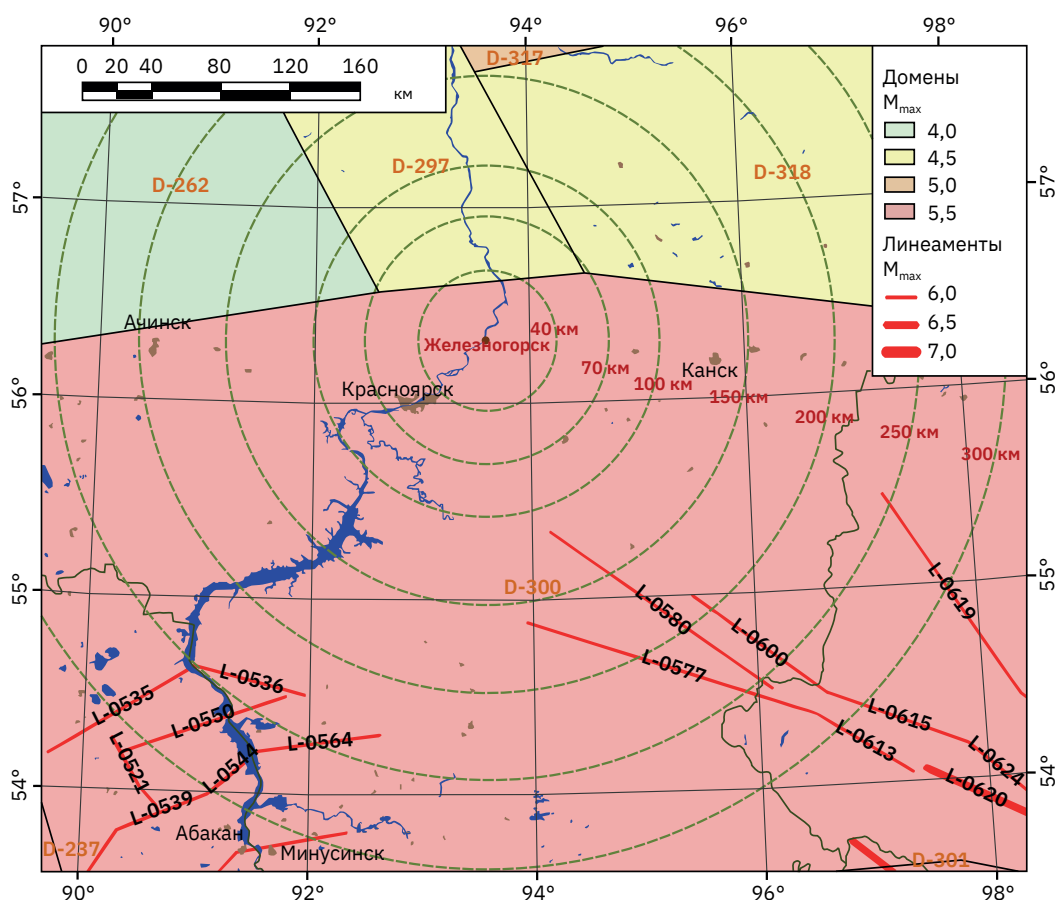


Рис. 3.28. Схема расположения доменов и линеаментов в 300-километровой зоне вокруг площадки [107]

Таким образом, для учета Малиновской палеосейсмодислокации в линейном элементе L580 максимальная магнитуда была увеличена до 7,0 (до этого потенциал указанного линейного элемента был $M = 6,0$).

В результате выполненных исследований по уточнению модели зон ВОЗ для рассматриваемой территории на основе использования технологии и базы данных ОСР-97, предоставленных ИФЗ, в КНИИГиМС были получены следующие оценки сейсмической опасности (в баллах шкалы MSK-64, для средних грунтовых условий) (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Оценки сейсмической опасности для средних грунтовых условий

Города	ОСР-97-А T = 500 лет	ОСР-97-В T = 1000 лет	ОСР-97-С T = 5000 лет	ОСР-97-Д T = 10000 лет
По данным ОСР-97				
Красноярск	6	6	8	8
Железногорск	6	6	7	8
После уточнения модели зон ВОЗ				
Красноярск	6	6	8	8
Железногорск	6	6	7	7

Точность выполненных в КНИИГиМС расчетов и построений недостаточна для предлагаемой корректировки карты ОСР-97-Д и снижения на один балл величины сейсмической интенсивности для г. Железногорска на рис. 3.29. При погрешности проведения изолиний балльности, составляющей ± 30 км и свойственной погрешностям в исходных и других данных базы ОСР-97, удаление г. Железногорска на расстояние менее 10 км от границы 8-балльной зоны поглощается всеми исходными погрешностями. Об этом свидетельствует и нестабильность («волнообразность») границы между зонами балльности и многое другое (неточность формул, коэффициентов и т. п.).

Для района Нижнеканского массива в [109] рекомендовано следующее.

1. Корректировка исходной сейсмичности района.
2. Составление схемы сеймотектонических условий площадки масштаба 1:50 000.
3. Составление карты-схемы уточнения общего сейсмического районирования района размещения ПГЗРО, включающей зоны ВОЗ и их параметры — зоны возможного возникновения первичных и вторичных остаточных деформаций грунта и пояснительной записки, включающей характеристику спадания балльности с удалением от очаговых зон и параметры ПЗ и МРЗ для средних грунтов.
4. Составление карты-схемы геодинамических зон, активных разломов и пояснительной записки к ним, содержащей результаты определения параметров ПЗ и МРЗ с учетом локальных зон ВОЗ.

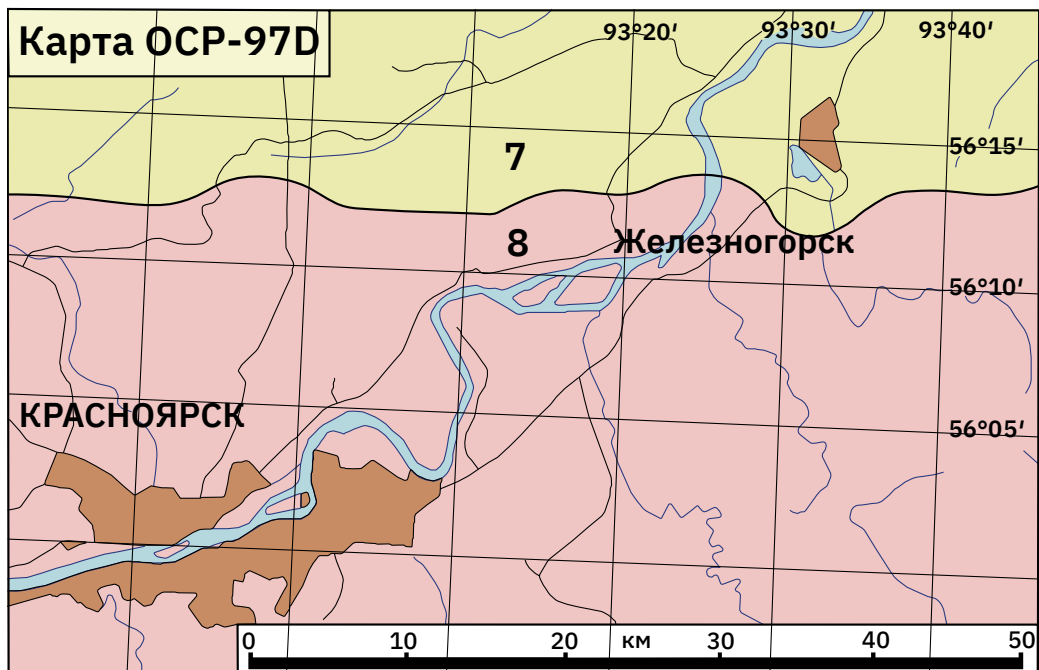


Рис. 3.29. Новое местоположение границы между 7- и 8-балльной зонами карты ОСР-97-D по данным КНИИГиМС

Представленный обзор сейсмической опасности региона носит неполный характер. Значительные неопределенности сейсмотектонических условий встретятся при оценке сейсмической опасности площадки, рекомендуемой для строительства ПИЛ и ПГЗРО.

Заключение

Разработка технологии и поиск площадок, пригодных для подземного захоронения твердых (отвержденных) РАО, начались в СССР в конце 1980-х гг. Нормативно установленные принципы выбора мест для безопасной изоляции ВАО и ОЯТ в то время в СССР отсутствовали, и разработчикам проектов приходилось ориентироваться на рекомендации МАГАТЭ.

Геологические изыскания с целью захоронения твердых и отвержденных отходов среднего и низкого уровней активности в многолетнемерзлых породах архипелага Новая Земля начались в 1996 г. на двух участках. Несмотря на то что к 2000 г. эти работы были доведены до проекта, они были прекращены в связи с отсутствием требуемого объема финансирования и опасений в сохранности «вечной мерзлоты» в условиях глобального потепления климата.

Кольский полуостров послужил регионом для выбора места под захоронение отвержденных РАО в кристаллических породах Балтийского щита, который отличается спокойной тектонической обстановкой. На этой территории были изучены 16 районов, сложенных различными типами перспективных пород. Геологические исследования сопровождались разработкой теоретических моделей оценки безопасности подземного захоронения РАО и продолжались вплоть до начала 2000-х гг.

Территория в районе ПО «Маяк» на восточном склоне Уральского горного хребта стала местом глубоких комплексных геологических и гидрогеологических исследований, направленных на оценку пригодности местной формации вулканических пород основного состава и выбор в ней стабильного блока для создания подземной исследовательской лаборатории и объекта для захоронения отвержденных ВАО. Эти работы были прекращены в конце 1990-х гг. в связи с изменением общих подходов к выбору региона для создания пункта глубинного захоронения РАО.

Обширный регион на юге Красноярского края, на территории которого расположен Горно-химический комбинат, начал изучаться с целью выбора места для ПГЗРО с начала 1990-х гг. Геологические исследования начались с обзора территории площадью около 22 000 км². В 1993 г. была рекомендована территория Южно-Енисейского кряжа, в пределах которого ожидалось обнаружение перспективных блоков, сложенных формациями малопроницаемых магматических или метаморфических пород.

Наиболее значимые глубинные и региональные разломы делят эту территорию на крупные блоки. Одним из таких блоков стал Нижнеканский массив со своим метаморфическим обрамлением. Оба эти типа кристаллических пород отличаются высокой прочностью.

В гидрогеологическом отношении территория представляет собой гидрогеологический массив с неудовлетворительной изученностью и крайне низкой водоносностью пород.

К положительным факторам территории можно отнести ее сравнительно низкую продуктивность в отношении эндогенного металлического оруденения.

Новейшие и современные движения земной коры интегрально отражены в рельефе территории ярусами поверхностей выравнивания и линеamentами, тектоническая природа большинства из которых геологическими данными не подтверждена. Скорости новейших тектонических смещений сопоставимы с таковыми, характерными для платформенных областей. Территория принадлежит к активной в сейсмическом отношении зоне возможных 7–8-балльных сотрясений.

Литература

1. Программа исследовательских работ по окончательному захоронению высокоактивных отходов в глубокие слабопроницаемые геологические формации / О. Л. Кедровский, Е. А. Леонов, Н. М. Ромадин, И. Ю. Шишиц // *Underground Disposal of Radioactive Wastes. Vol. I: Proceedings of a symposium jointly organized by IAEA and NEA (OECD) (Otaniemi, 2–6.07.1979).* — Vienna, Austria: IAEA, 1980. — P. 31–40.
2. Кедровский О. Л. Использование подземного пространства для вечного захоронения радиоактивных отходов / О. Л. Кедровский // *Подземное и шахтное строительство.* — 1992. — № 2. — С. 2–7.
3. Тенденция интеграции и потенциал Севера в проблеме изоляции радиоактивных отходов / В. Н. Комлев, Н. И. Бичук, В. Г. Зайцев и др. // *Уральский геологический журнал.* — 2001. — № 1 (19). — С. 157–174.
4. Казаков А. Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов в многолетнемерзлых горных породах / А. Н. Казаков // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1996. — № 6. — С. 70–73.
5. Принципы безопасности и технические критерии для подземного захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности: Серия изданий по безопасности: No. 99. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 1990. — 32 с.
6. Казаков А. Н. Теплофизические аспекты подземной локализации РАО в многолетнемерзлых горных породах / А. Н. Казаков, Н. Ф. Лобанов // *Радиоактивные отходы — проблемы и решения: II ежегодная конференция ядерного общества России (24–28 июня 1991): Доклады и выступления. Часть 2.* — М.: ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1991. — С. 406–411.
7. Ершов Э. Д. Проблемы захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне / Э. Д. Ершов, С. Ю. Пармузин, О. М. Лисицына // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1995. — № 5. — С. 20–36.
8. Лопатин В. В. Подземная изоляция радиоактивных отходов на архипелаге Новая Земля / В. В. Лопатин, А. Н. Казаков // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1996. — № 6. — С. 74–76.
9. Татарчук Ю. С. Инженерно-геологические условия захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне Новой Земли / Ю. С. Татарчук, Ю. К. Шипулин, Н. Я. Слободской и др. // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1996. — № 6. — С. 77–82.
10. Шполянская Н. А. Прогноз эволюции криолитозоны в целях обоснования возможности использования ее для подземной изоляции радиоактивных отходов (на примере архипелага Новая Земля) / Н. А. Шполянская, А. Н. Казаков // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1997. — № 2. — С. 41–50.
11. Кондратьева К. А. Геокриологическое картирование и его роль в изучении Новой Земли для целей захоронения радиоактивных отходов / К. А. Кондратьева, С. Ю. Пармузин, И. И. Петрожицкий // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология.* — 1996. — № 6. — С. 83–92.
12. Лобанов Н. Ф. О состоянии работ по созданию опытно-промышленного объекта на архипелаге Новая Земля для захоронения твердых и отвержденных отходов среднего и низкого уровней активности, образующихся в Мурманской и Архангельской областях России / Н. Ф. Лобанов // *Вопросы радиационной безопасности.* — 2001. — № 4 (25). — С. 3–8.
13. Мельников Н. Н. Подземное захоронение радиоактивных отходов / Н. Н. Мельников, В. П. Конухин, В. Н. Комлев. — Апатиты: Кольский научный центр РАН, Горный институт, 1994. — 214 с.
14. Экологические аспекты безопасности подземных объектов изоляции радиационно опасных материалов / П. В. Амосов, А. В. Наумов, В. Г. Николаев, Н. В. Новожилова. — Апатиты: Кольский научный центр РАН, Горный институт, 2011. — 168 с.
15. Науки о Земле. Геология, геофизика, геохимия и горные науки // *Отчет о деятельности Российской Академии Наук в 2000 году: Основные результаты в области естественных, технических, гуманитарных и общественных наук.* — М.: Наука, 2001.
16. Site selection for radioactive waste disposal: Results of a screening process in North-West Russia / B. Come, J. F. Heitz, M. Vandenbeusch et al. // 9th International Society for Rock Mechanics Congress. — P., France, 1999. — P. 37–42.
17. № 24. — Постановление СНК СССР № 3007-892сс «О заводе № 817». 1 декабря 1945 г. // *Атомный проект СССР: документы и материалы: в 3-х томах / под ред. Л. Д. Рябева.* — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2000. — Т. 2. Атомная бомба. 1945–1954.

18. Прозоров Л. Б. Перспективы использования хранилищ с вертикальным размещением РАО / Л. Б. Прозоров, Н. Ф. Лобанов, А. С. Баринков // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. — 2012. — № 3. — С. 121–135.
19. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. Т. 5 / Н. П. Лаверов, В. И. Величкин, Б. И. Омеляненко и др.. — М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. — 280 с.
20. Appraisal of the physical and dynamic state of the Mayak / V. I. Velichkin, V. A. Petrov, N. N. Tarasov et al. // Proceedings of the 5th international conference on radioactive waste management and environmental remediation ICM'95 (Berlin, Germany, 3–9 September 1995). — N. Y., USA: ASME, 1995. — P. 823–826.
21. Сигов А. П. Геоморфологическое районирование Урала / А. П. Сигов, В. С. Шуб // Материалы по геоморфологии и новейшей тектонике Урала и Поволжья. Выпуск 3. — Уфа: БФАН СССР, 1972. — С. 44–51.
22. Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз денудации при захоронении радиоактивных отходов (на примере Южного Урала России) / Б. Т. Кочкин, Н. Г. Патык-Кара, И. И. Спасская // Геология рудных месторождений. — 1997. — Т. 39. — № 2. — С. 193–205.
23. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / под ред. Н. В. Кондорской, Н. В. Шебалина. — М.: Наука, 1977. — 536 с.
24. Ковальчук А. И. Формирование химического состава подземных вод Зауралья / А. И. Ковальчук, Ю. П. Вдовин, А. В. Козлов. — М.: Наука, 1980. — 184 с.
25. Мальковский В. И. Перенос радионуклидов из могильника ВАО региональным потоком подземных вод / В. И. Мальковский, А. А. Пэк, В. И. Величкин // Вопросы радиационной безопасности. — 1997. — № 4. — С. 9–15.
26. Geomorphological and tectonophysical approach to the identification of sites for radioactive waste disposal at the PA Mayak territory, Russia / A. N. Sysoev, V. A. Petrov, I. A. Ivanov, A. B. Volkov // Proceedings of 7th international conference on radioactive waste management and environmental remediation ICM'99 (Nagoya, Japan, 26–30 September, 1999). — N. Y., USA: ASME, 1999.
27. Новейшая тектоника Урала / под ред. А. П. Сигова, В. А. Сигова. — Саратов: Издательство Саратовского университета, 1975. — 106 с.
28. On the issue of methodology of geologic site characterization on different scales for radioactive waste disposal / V. A. Petrov, A. N. Sysoev, V. I. Starostin, A. B. Volkov // Proceedings of the 1996 international conference on deep geological disposal of radioactive waste (Winnipeg, Manitoba, Canada, 16–19 September, 1996). — Toronto, Ontario, Canada: Canadian Nuclear Society, 1996. — P. 153–162.
29. Петрофизические и минерально-химические аспекты выбора участков для изоляции ВАО в метавулканитах района ПО «Маяк», Южный Урал / Н. П. Лаверов, В. А. Петров, В. И. Величкин и др. // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2003. — № 1. — С. 5–22.
30. Петров В. А. Исследования петрофизических свойств и напряженно-деформированного состояния пород в районах ПО «Маяк» и ГХК в связи с выбором полигонов для изоляции ВАО / В. А. Петров // Геология рудных месторождений. — 2001. — Т. 43. — № 6. — С. 478–494.
31. Петров В. А. Тектонодинамические условия изоляции радиоактивных отходов в кристаллических породах: дис. ... докт. геол.-мин. наук / В. А. Петров. — М.: ИГЕМ РАН, 2006. — 475 с.
32. The petrographic criteria of selection of geological environments for building high-level waste repository / B. I. Omelyanenko, V. A. Petrov, S. V. Yudin et al. // Proceedings of the 1993 International conference on radioactive waste management and environmental remediation ICM'93 (Prague, Czech Republic, 5–11 September, 1993). — N. Y., USA: ASME, 1993. — Vol. 1. — P. 697–702.
33. Интегральные защитные геохимические свойства геологической среды в верховьях реки Течи / А. К. Лисицин, В. И. Мышкин, Н. И. Ганина и др. // Геохимия. — 1996. — № 10. — С. 995–1004.
34. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) / Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, Е. Ф. Любцева и др. // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. — 2006. — Т. XI. — С. 8–64.

35. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Е. Б. Андерсон, В. М. Даценко, В. И. Кирко и др. // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 16–20 марта 1998) / под ред. Е. Ф. Любцевой. — СПб.: Горно-химический комбинат, НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. — С. 14–23.
36. Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations: Technical Report Series: No 177. — Vienna, Austria: IAEA, 1977. — 64 p.
37. Site investigations for repositories for solid radioactive wastes in deep continental geological formations: Technical Report Series: No 215. — Vienna, Austria: IAEA, 1982. — 109 p.
38. Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes: Safety series: Recommendations No 60. — Vienna, Austria: IAEA, 1983. — 46 p.
39. Смирнов В. И. Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений / В. И. Смирнов. — М.: Издательство Московского университета, 1954. — 547 с.
40. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-85): СанПиН 42-129-11-3938-85: [утв. 01.10.1985 Главным государственным санитарным врачом СССР]. — М.: Министерство здравоохранения СССР, 1986.
41. Андерсон Е. Б. Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО / Е. Б. Андерсон, Е. Ф. Любцева, А. В. Оганезов и др. // Разведка и охрана недр. — 1999. — № 9–10. — С. 61–63.
42. Андерсон Е. Б. Разработка геологической концепции и геологических критериев захоронения радиоактивных отходов в гранитоидных формациях (на примере Нижнеканского массива Енисейского кряжа): Препринт Радиового института им. В. Г. Хлопина: РИ-255 / Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, С. И. Шабалев. — М.: ЦНИИатоминформ, 2000. — 28 с.
43. Закономерности строения соленосных отложений кембрия юга Сибирской платформы / Э. И. Чечель, Я. Г. Машович, Ю. Г. Жарков, М. А. Жарков. — М.: Недра, 1977. — 144 с.
44. Жарков М. А. Взаимоотношение соленосной и перекрывающей ее красноцветной формаций кембрия на юге Сибирской платформы: Академия наук СССР Сибирское отделение. Труды института геологии и геофизики: Выпуск 536 / М. А. Жарков, Я. Г. Машович, Э. И. Чечель. — М.: Наука, 1982. — 128 с.
45. Зверев А. Б. Результаты натурных исследований устойчивости камерных сооружений подземной атомной станции / А. Б. Зверев // Материалы Международной конференции «Использование подземного пространства страны для повышения безопасности ядерной энергетики». Часть 2. — Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1992. — С. 150–163.
46. Гупало Т. А. Использование комплекса подземных сооружений Красноярского горно-химического комбината в качестве действующей лаборатории для обоснования безопасности хранилища РАО на Нижнеканском массиве / Т. А. Гупало, С. Л. Спешилов, А. А. Третьяков и др. // Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива в новой концепции завода РТ-2: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 20–24 мая 2002). — СПб.: Горно-химический комбинат, НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2004. — С. 130–145.
47. Ножкин А. Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирского кратона / А. Д. Ножкин // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 314. — № 1. — С. 5–16.
48. Лиханов И. И. Приразломные тектониты Енисейского кряжа. Статья 1: геолого-структурные, минералогические и геохронологические свидетельства полиметаморфизма / И. И. Лиханов, А. А. Крылов, Ж.-Л. Ренье // Вестник Воронежского Государственного Университета. Серия: Геология. — 2018. — № 2. — С. 56–71.
49. Эволюция южной части Сибирского кратона в докембрии: Интеграционные проекты СО РАН: Вып. 11 / под ред. А. М. Мазукабзова, Е. В. Скларова. — Новосибирск: Издательство Сибирского отделения Российской академии наук, 2006. — 363 с.
50. Новые U-Pb данные возраста формирования палеоостроводужного комплекса Предивинского террейна Енисейского кряжа / В. А. Верниковский, А. Е. Верниковская, Е. Б. Сальникова и др. // Геология и геофизика. — 1999. — Т. 40. — № 2. — С. 255–259.

51. Ясенев А. М. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Южно-Енисейского края: На примере Нижнеканского и Посольненского массивов: дис. ... канд. геол.-мин. наук / А. М. Ясенев. — Новосибирск: Институт геологии и минералогии СО РАН, 2006. — 236 с.
52. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). Объяснительная записка / Л. П. Никулов, А. Н. Бабкин, В. М. Колямкин и др.; под ред. Л. К. Качевского. — 2-е издание. — М.; СПб.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Государственное предприятие “Красноярскгеолсъемка”, 2001.
53. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). Объяснительная записка / Л. П. Никулов, А. Н. Бабкин, В. М. Колямкин и др.; под ред. Л. К. Качевского. — 2-е издание — М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
54. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангара-Енисейская. Лист О-46 — Красноярск. Объяснительная записка / В. К. Зуев, Л. К. Качевский, Г. И. Качевская и др.; под ред. Ю. С. Глухова. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. — 500 с.
55. Бовин Ю. П. Особенности состава породообразующих минералов метаморфических пород как признаки метаморфизма / Ю. П. Бовин // Доклады Академии Наук СССР. — 1981. — Т. 259. — № 5. — С. 1195—1197.
56. Предовский А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия: Международная программа геологической корреляции: Проект 91 «Металлогения докембрия» / А. А. Предовский. — Л.: Наука, 1980. — 152 с.
57. Заблоцкий К. А. Реконструкция первичного состава раннедокембрийских метаморфических пород юга Енисейского края / К. А. Заблоцкий, Б. Р. Сопрончук // Проблемы геологии и металлогении Красноярского края: сборник научных трудов. — Новосибирск: Наука, 1989. — С. 100—109.
58. Ножкин А. Д. Раннедокембрийские гнейсовые комплексы Енисейского края и их геохимические особенности / А. Д. Ножкин // Геология и геофизика. — 1983. — № 9. — С. 3—11.
59. Озерский А. Ю. Естественная радиоактивность раннеархейских пород на участке для глубинного захоронения радиоактивных отходов в южной части Енисейского края / А. Ю. Озерский // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека (4—8 июня 2013): материалы IV Международной конференции. — Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2013. — С. 394—398.
60. Геохронология силлиманит-кордиеритовых гнейсов атамановской серии Южно-Енисейского края (Россия) / А. М. Сазонов, К. А. Заблоцкий, У. Линнеманн и др. // Литосфера. — 2017. — Т. 17. — № 2. — С. 49—59.
61. Кузнецов Ю. А. Петрология докембрия Южно-Енисейского края. Материалы по геологии Западной Сибири: Вып. 15 (57) / Ю. А. Кузнецов. — Томск: ЗСГУ, 1941. — 250 с.
62. Даденко В. М. Гранитоидный магматизм юго-западного обрамления Сибирской платформы / В. М. Даденко; под ред. Н. Н. Амшинского. — Новосибирск: Наука, 1984. — 120 с.
63. Даденко В. М. Проблемы петрологии гранитоидов складчатых областей юга Сибири / В. М. Даденко // Геология и полезные ископаемые центральной Сибири: Сборник научных трудов, посвященный 40-летию КНИИГиМС (1957—1997 гг.). — Красноярск: КНИИГиМС, 1997. — С. 311—347.
64. Кузнецов Ю. А. Избранные труды. Т. 1. Петрология докембрия Южно-Енисейского края / Ю. А. Кузнецов. — Новосибирск: Наука: Сибирское отделение, 1988. — 221 с.
65. Даденко В. М. Нижнеканский массив — эталон нижнеканского гранитоидного комплекса (Енисейский край) / В. М. Даденко. — Новосибирск: СНИИГиМС, 1995. — 123 с.
66. О проявлении раннепалеозойского магматизма в Южно-Енисейском крае / А. Е. Верниковская, В. А. Берниковский, В. М. Даденко и др. // Доклады Академии Наук. — 2004. — Т. 397. — № 3. — С. 374—379.
67. К оценке рудоносности Саяно-Енисейской зоны разломов / А. Г. Еханин, А. Н. Смагин, В. П. Парначев, Л. И. Буторин // Вестник Томского государственного университета. — 2009. — № 325. — С. 200—202.
68. Подземная изоляция радиоактивных отходов: Атомная энергетика / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев и др.; под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. — 592 с.
69. Геологический словарь: в 3 томах. Геологический словарь / под ред. О. В. Петрова. — 3-е издание, переработанное и дополненное. — СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2010.

70. Цыганов В. А. Некоторые психологические аспекты визуального восприятия простой и многофакторной картографической информации / В. А. Цыганов // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. — Воронеж, 2003. — С. 597—602.
71. Полетаев А. И. Линеамент / А. И. Полетаев // Большая российская энциклопедия (БРЭ). — М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 2010. — Т. 17. — С. 497.
72. Озерский А. Ю. Оценка существующих требований к захоронению радиоактивных отходов в глубокие геологические формации — взгляд геолога / А. Ю. Озерский // Материалы международной научно-практической конференции «Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий»: сборник научных трудов. — М.: ООО «Винпресс», 2016. — С. 121—137.
73. Лобацкая Р. М. Неотектоническая разломно-блоковая структура зоны сочленения Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты / Р. М. Лобацкая // Геология и геофизика. — 2005. — Т. 46. — № 2. — С. 141—150.
74. Лукина Н. В. Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области / Н. В. Лукина // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. — 1996. — Т. 71. — № 5. — С. 25—32.
75. Несмеянов С. А. Активные разрывы в зоне сочленения юга Сибирской платформы и Западно-Сибирской плиты и их значимость для строительства / С. А. Несмеянов, О. А. Воейкова // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2008. — № 3. — С. 197—213.
76. Лобацкая Р. М. Разломно-блоковая структура Байкало-Енисейского разлома в районе эксплуатации объектов ядерной энергетики / Р. М. Лобацкая // Геодинамика и тектонофизика. — 2014. — Т. 5. — № 2. — С. 547—562. — DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0140
77. Методические рекомендации по составлению карт гидрогеологического районирования масштаба 1:2 500 000, схем гидрогеологической стратификации и классификаторов объектов гидрогеологического районирования и стратификации / Л. А. Островский, В. В. Куренной, А. А. Шпак и др. — М.: МПР России (ВСЕГИНГЕО), 2003. — 40 с.
78. Общее гидрогеологическое районирование как основа системного картографирования, изучения, использования и оценки состояния подземных вод России / Ю. Б. Челидзе, В. А. Барон, С. Л. Пугач, С. В. Кокорева // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 5. — С. 41—49.
79. Иванова Т. П. Месторождения питьевых подземных вод Красноярского края / Т. П. Иванова, А. Ю. Озерский, Т. А. Фагина // Фундаментальные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием, 22—28 июня 2015). — Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2015. — С. 464—468.
80. Гидрогеология СССР. Т. 18. Красноярский край и Тувинская АССР. / под ред. И. К. Зайцева, Е. А. Баскова, Е. Е. Беляковой и др. — М.: Недра, 1972. — 479 с.
81. Петрова Н. Н. Гидрогеологическое и инженерно-геологическое изучение с геоэкологическим картированием масштаба 1:200000 Атамановской площади за 1997—2000 гг. Лист О-46-XXXIV: Росгеолфонд: Геологический отчет: инв. № 477756 / Н. Н. Петрова, В. П. Новицкий, Т. Е. Игнатенко и др. — Минино: ООО «Красноярскгидрогеология», 2001. — 667 с.
82. Методическое письмо по подготовке схем гидрогеологической стратификации / М. В. Кочетков, Л. В. Леоненко, Л. А. Островский, С. Л. Пугач. — М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 1999. — 17 с.
83. Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2020: [введен 01.01.2021г.]. — М.: Стандартинформ, 2020. — 37 с.
84. Тевелев А. В. Неотектоника / А. В. Тевелев // Большая российская энциклопедия (БРЭ). — М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 2013. — Т. 22. — С. 445—446.
85. Николаев Н. И. Новейшая тектоника и геодинамика литосферы / Н. И. Николаев. — М.: Недра, 1988. — 490 с.
86. Никонов А. А. Активные разломы: определение и проблемы выделения / А. А. Никонов // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 1995. — Т. 4. — С. 16—27.

87. Андерсон Е. Б. Геолого-геофизическое изучение северной части Нижнеканского массива с целью поиска блоков моноклиновых гранитоидов, перспективных для захоронения отвержденных высокоактивных отходов завода РТ-2: Сводный отчет о НИР: Инв. № 2533-И / Е. Б. Андерсон, В. И. Величкин, В. М. Дадченко и др. — СПб.: НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 1996.
88. Лукина Н. В. Четвертичные движения по разломам юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны / Н. В. Лукина // Геотектоника. — 1989. — № 2. — С. 89—100.
89. Лукина Н. В. Новейшая и современная тектоническая активность разрывных нарушений Нижнеканского гранитоидного массива и прилегающих территорий / Н. В. Лукина. — М.: ГИН РАН, 1993.
90. Скорости современных горизонтальных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа по результатам ГНСС-измерений / А. Д. Гвишиани, В. Н. Татаринов, В. И. Кафтан и др. // Доклады академии наук. Науки о Земле. — 2020. — Т. 493. — № 1. — С. 73—77. — DOI: 10.31857/S2686739720070075
91. Андерсон Е. Б. Геологические и геофизические исследования на территории южной части Енисейского кряжа для обоснования возможности безопасного захоронения отвержденных высокоактивных отходов завода РТ-2 в глубокие геологические формации (обобщение и анализ литературных и фондовых материалов и результатов рекогносцировочных полевых работ): Сводный отчет о НИР: Инв. № 2240-И-93 / Е. Б. Андерсон, В. М. Дадченко, О. Л. Кедровский и др. — СПб.: НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 1993.
92. Андерсон Е. Б. Результаты комплексных геолого-геофизических и специализированных исследований на участке Каменный и прилегающей территории (Нижнеканский массив) : Сводный отчет о НИР: Инв. № 2896-И. Книга 1. / Е. Б. Андерсон, Р. И. Любцев и др. — СПб.: НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 2001.
93. Лопатин А. П. Вопросы картографирования современных вертикальных движений земной коры с использованием космической информации / А. П. Лопатин // Отчет о НИР: Научно-техническое обеспечение изучения и картографирования динамики природной среды районов первоочередного освоения Красноярского края на основе АКИ. — Красноярск, 1990.
94. Zoback M. L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project / M. L. Zoback // Journal of geophysical research. — 1992. — Vol. 97. — № B8. — P. 11703. — DOI: 10.1029/92JB00132
95. Тепловое поле недр Сибири / В. Т. Балобаев, В. А. Голубев, В. Н. Девяткин и др.; ред. Э. Э. Фотиади. — Новосибирск: Наука, 1987. — 200 с.
96. Тепловой поток. Масштаб 1:30 000 000. // Национальный атлас России: в 4-х томах / ред. В. М. Котляков. — М.: Федеральное агентство геодезии и картографии (Роскартография), 2007. — Том 2. Природа. Экология.
97. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. 4 листа. / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина, А. А. Гусев и др.; ред.: В. Н. Страхов, В. И. Уломов. — М.: Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1999.
98. Уломов В. И. О роли горизонтальных тектонических движений в сейсмогеодинамике и прогнозе сейсмической опасности / В. И. Уломов // Физика Земли. — 2004. — № 9. — С. 14—30.
99. Уломов В. И. Сейсмичность / В. И. Уломов // Большая российская энциклопедия (БРЭ). — М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 2004. — Т. 1. — С. 34—39.
100. Уломов В. И. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб: 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина. — М.: Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1999. — 57 с.
101. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-064-17: [утв. приказом Ростехнадзора № 217 от 23.06.2017]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2017.

102. Оценка исходной сейсмичности района и площадки размещения объекта использования атомной энергии при инженерных изысканиях и исследованиях: Руководство по безопасности при использовании атомной энергии № РБ-019-18: [в ред. приказа Ростехнадзора № 208 от 11.05.2018]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2018.
103. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-100-17: [утв. приказом Ростехнадзора № 218 от 23.06.2017]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2017.
104. Строительство в сейсмических районах: Свод правил № СП 14.13330.2018: [утв. приказом Минстроя России № 309/пр от 24.05.2018]: [в ред. приказов № 59/прб от 31.01.2022, № 434/прот 31.05.2022]. — М.: Российский институт стандартизации, 2022.
105. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-14: [утв. приказом Ростехнадзора № 379 от 22.08.2014]: [в ред. приказов Ростехнадзора № 582 от 22.11.2018, № 163 от 18.05.2022]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2022.
106. Отчет по проекту МНТЦ 2764. Разработка информационной технологии оценки устойчивости геологической среды при длительном хранении и захоронении радиоактивных отходов в геологических формациях. — М.: МНТЦ, 2008. — 263 с.
107. Ружич В. В. Уточнение исходного балла сейсмической опасности для объектов ГХК (дополнения и уточнения к отчету ИЗК СО РАН): Отчет о НИР / В. В. Ружич, Э. Н. Линд [и др.]. — Красноярск: КНИИГиМС, 2002. — 133 с.
108. Герман В. И. Выделение активной сейсмогенерирующей структуры на территории Красноярского края / В. И. Герман // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодежной школы-семинара (21–24.09.2009). — М.: ИФЗ РАН, 2009. — С. 29–33.
109. Экспертное заключение об обосновании деятельности федерального государственного унитарного предприятия «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» (ФГУП «НО РАО») по размещению пункта хранения радиоактивных отходов. — М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. — 212 с.

Глава 4

Геологические исследования в пределах Нижнеканского массива* и его обрамления с целью выбора участка (выбор окончательного места 1993—2008 гг.)**

4.1. История исследований

Географическая позиция района исследований определяется его размещением между возвышенными гористыми территориями Восточного Саяна и Енисейского кряжа и равнинной областью Западно-Сибирской низменности (рис. 4.1). Гидрографическая сеть представлена реками Енисей и Кан и их притоками. Крупнейшими городами являются г. Красноярск с населением около 1,2 млн человек, и ЗАТО г. Железногорск — около 90 000 человек. Красноярск — административный центр одноименного края — расположен на берегах р. Енисей при впадении в него р. Кача и находится примерно в 60 км от ГХК.

* Ввиду того, что практически с 1993 г. начались изыскания в пределах Нижнеканского гранитоидного массива, название «Нижнеканский» первоначально закрепилось именно за изверженными гранитными породами, обрамление которых сложено преимущественно метаморфическими гнейсами, вместе с которыми граниты образуют обширный кристаллический массив — гранито-гнейсовый купол (Омельяненко Б. И. в [11], см. ниже).

** В гл. 4 и далее приводятся ссылки на важные в контексте понимания истории выбора площадки документы, которые в свое время по разным причинам (главным образом — по режимным соображениям) не были открыто опубликованы. С формальной точки зрения авторы считают некорректным отражать их в списке литературы, в связи с чем соответствующая доступная библиографическая информация дается в виде ссылок другого вида (нумерация латинскими буквами в квадратных скобках, сквозная в пределах каждой главы).

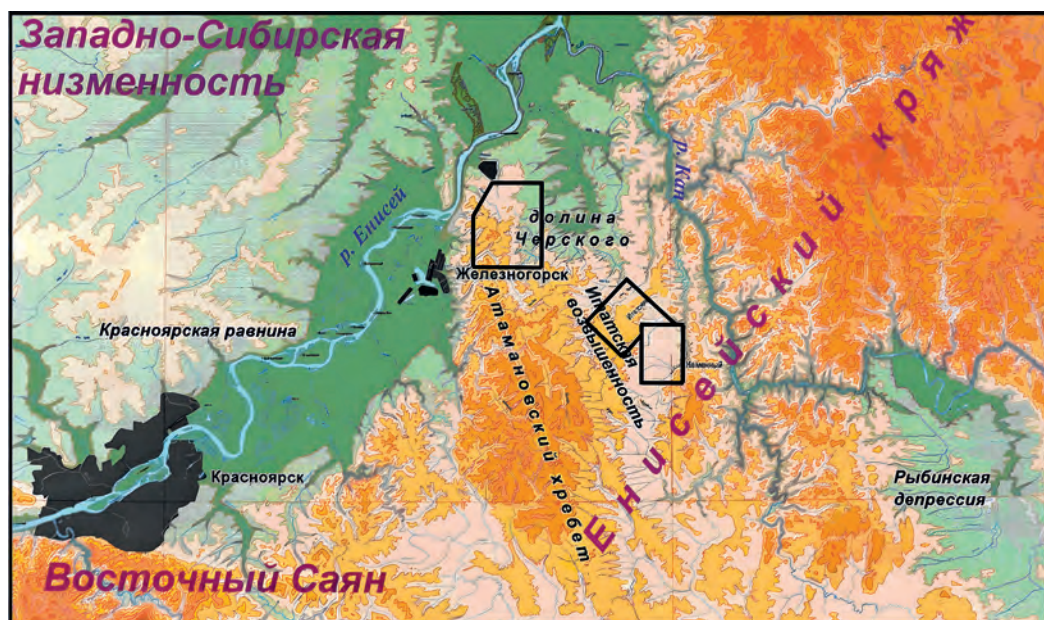


Рис. 4.1. Физическая карта Нижнеканского массива и его обрамления. Участки, детально изучавшиеся с целью выбора места для ПГЗРО, помечены черными контурами

4.1.1. Этап изучения Южно-Енисейского края

В пределах Южно-Енисейского края по критерию условно-однородных блоков на площади около 9 000 км² в масштабе 1:200 000 — 1:100 000 было выделено 18 перспективных для дальнейшего анализа площадей [2, 3] (рис. 4.2). Сравнительная оценка площадей проводилась по специально составленному перечню критериев, в который вошли не только геолого-структурные условия, но и территориальное положение, особенности социальной структуры, расстояния от ГХК. Завод РТ-2 по переработке ОЯТ на этом предприятии на тот момент рассматривался как основной источник РАО на захоронение.

Более детальный анализ показал, что значительная часть из 18 выделенных площадей далеко не полностью удовлетворяет требованиям геолого-структурного и тектонического критериев (близость глубинных разломов, повышенная трещиноватость и анизотропия пород, ограниченная мощность сравнительно однородных площадей и пр.). Эксперты, сопоставляя результаты аналитического поиска, полученные различными методами и различными организациями (Радиовый институт им. В. Г. Хлопина, НИИ земной коры СПбГУ, ГХК, ВНИПИпромтехнологии, Геологический институт РАН), отдали предпочтение площадям, выделенным в северной части Нижнеканского массива, расположенного в непосредственной близости от ГХК (восточнее и юго-восточнее). На начальных этапах поисковых работ наиболее оперативную информацию о строении массива давали специализированные геофизические исследования [2]. Через 13 лет после начала работ (к 2006 г.) была принципиально обоснована перспективность участков Итатский и Каменный, расположенных в пределах Нижнеканского гранитного массива [4].

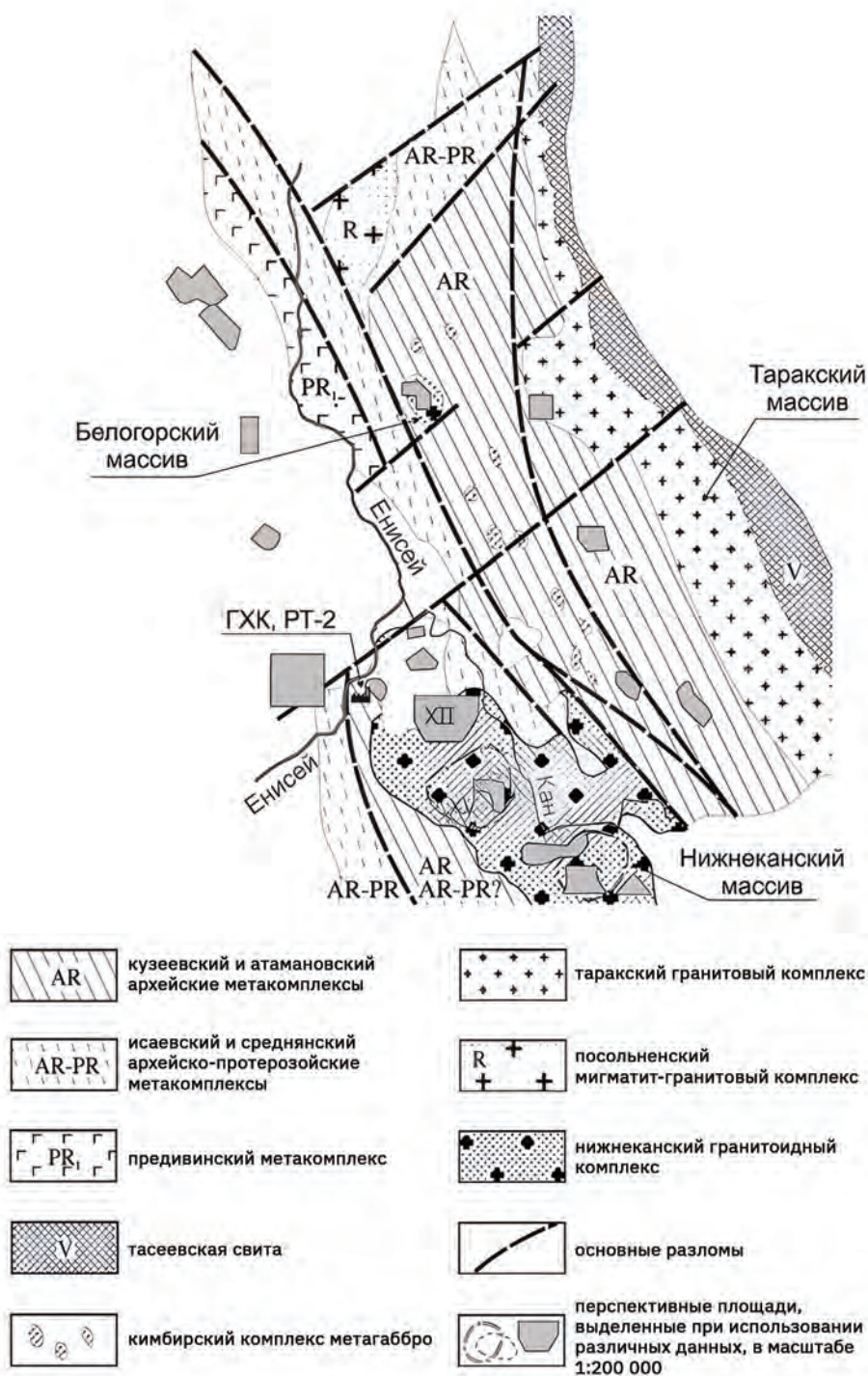


Рис. 4.2. Докембрийские формации южной части Енисейского кряжа. Масштаб 1:1 000 000 и предварительная (1993 г.) схема размещения перспективных площадей [2]

4.1.2. Этап изучения участков Итатский и Каменный

Уже в 1993 г. на территории двух (из 18) площадей, представлявших наиболее перспективными на территории Нижнеканского массива, были проведены рекогносцировочные полевые работы: оценка геоморфологических особенностей района, заверка тектонических построений, отбор проб для лабораторных исследований, а также маршрутные электроразведочные работы методом аудиомагнитотеллурического зондирования (АМТЗ) и радиоэлектромагнитного профилирования (РЭМП).

В 1994–1995 гг. работы велись в масштабе 1:100 000 — 1:50 000 (до 1:25 000). На основе переоценки имевшихся данных о геологическом строении, тектонической нарушенности, включая новейшую, и других, были вновь намечены 13 потенциальных участков, 8 из которых располагались в пределах выделенных ранее 18 перспективных площадей.

По сумме критериев самую высокую оценку из 13 получила перспективная площадь, называемая *Верхнеитатский* участок (или также «участок XV») в междуречье Большого и Малого Итатов. В ее пределах два участка, названных впоследствии Итатский и Каменный (рис. 4.3), были определены как наиболее перспективные. Участки имели площадь порядка 7 км² каждый.

В 1996–1999 гг. в масштабе 1:50 000 — 1:25 000 на этих двух перспективных участках проводились комплексные изыскания с целью выбора наиболее пригодного:

- определение геологического строения;
- анализ тектонической нарушенности;
- анализ трещиноватости;
- анализ внутренней структуры участка.

В 1996 г. основным объектом исследований стал участок Итатский, в 1997 г. работы были сконцентрированы на участке Каменный. Результаты электроразведочных и других работ подтвердили наличие на этих участках блоков монолитных слабопроницаемых гранитоидов.

В 1998–1999 гг. было осуществлено бурение структурно-параметрических колонковых скважин 1-И (участок Итатский) и 1-К и 2-К (участок Каменный), двух опорных скважин С-1 (участок Каменный) и С-2 (южнее участка Итатский), а также серии неглубоких картировочных скважин (до 50 м). Также были проведены геофизические исследования, рекогносцировочные гидрогеологические и опытно-методические исследования, площадная гидрогеологическая и геохимическая съемки поверхностных водотоков [2, 5]. Итоговый отчет по работам на этих участках [6] был рассмотрен Управлением по недропользованию по Красноярскому краю.

4.1.3. Этап изучения участка Енисейский

В период 2000–2001 гг. начались изменения в политике и планах Минатома России в отношении обращения с ОЯТ и РАО и актуализация Концепции по обращению со всеми видами отработавшего ядерного топлива, накапливаемого в Российской Федерации.

Изменение стратегии развития завершающих этапов ядерного топливного цикла в России [7] нашло отражение в соответствующих постановлениях правительства и Концепции по обращению с ОЯТ и РАО [8, 9]. Была изменена задача поиска территорий для окончательной изоляции уже общего количества нарабатываемых ВАО, а не только образующихся на ГХК.

Так, обновленной концепцией Минатома России предусматривалось, среди прочего, строительство комплекса по подземной изоляции ВАО от переработки ОЯТ [8]. Также были изменены основные направления работ по реализации концепции геологической изоляции ОЯТ и РАО, которые включали:

- создание подземной лаборатории (ПИЛ) для отработки технологии геологической изоляции ОЯТ и РАО;
- создание опытно-промышленного объекта для геологической изоляции ОЯТ и РАО (т. е. ПГЗРО), первый этап которого включал строительство ПИЛ.

В 2001 г. была разработана и согласована в Красноярском крае «Декларация о намерениях на строительство подземной лаборатории в районе Нижнеканского массива» (ДОН). Этот документ, утвержденный в 2002 г., давал возможность финансировать получение исходных данных на альтернативных площадках для следующей стадии проектирования — ОБИН (Обоснование инвестиций) для строительства ПИЛ (оба документа приведены в [10]). В ДОН в качестве основного был заявлен относительно изученный участок Верхнеитатский (включающий участки Итатский и Каменный), в качестве альтернативного — участок *Енисейский*, геологическая изученность которого была на более низком уровне.

В 2002—2004 гг. в соответствии с договором между Минатомом России и ФГУП «ВНИПИпромтехнологии» на участке Енисейский проводились геолого-геофизические, гидрогеологические и научно-исследовательские работы. Для них был разработан специальный план, который рассматривался на НТС Минатома и международных совещаниях и конференциях [10, 11]. Основанием для проведения работ послужила необходимость уравнивать изученность перспективных альтернативных участков в рамках проекта по выбору места для ПИЛ. Исследования на территории участка были направлены на оценку соответствия его геологического строения, степени тектонической нарушенности и гидрогеологических условий требованиям к размещению объекта подземной изоляции ВАО.

Участок Енисейский площадью 70 км² был выделен еще в середине 1990-х гг. (рис. 4.3) на северо-западной окраине Нижнеканского массива, на водораздельной части верховьев р. Шумихи и левых притоков р. Большая Тель, примерно в 7,0 км от ГХК.

Учитывая слабую на тот момент геолого-гидрогеологическую и геофизическую изученность территории участка, была разработана программа инженерно-геологических исследований, включающая дешифрирование космических снимков, геологические, геофизические, гидрологические, буровые и специальные научно-исследовательские работы. Программой предусматривалось опережающее проведение геофизических работ еще до бурения скважин.

Наземные геофизические работы, проводившиеся с 2002 по 2004 г. ФГУП «ВНИПИпромтехнологии» (Москва), ГПКК «КНИИГМС» (Красноярск), ФГУП КГПИ ВНИПИЭТ (Железногорск) и рядом других организаций, включали в себя:

- магниторазведочные работы;
- электроразведочные работы методами переходных процессов (МПП), аудиоманнителлурического зондирования (АМТЗ), вертикального электрического зондирования (ВЭЗ);
- сейсморазведочные работы методами отраженных (МОВ) и преломленных (МПВ) волн, общей глубинной точки (МОГТ).

Кроме геофизического комплекса, на участке Енисейский были выполнены:

- дешифрирование космических снимков;
- неотектоническое картирование;
- режимные гидрологические и метеорологические наблюдения;
- площадная гелиевая съемка;
- эманационные исследования территории;
- маршрутные наблюдения с геологическим описанием выявленных обнажений, основных параметров зон трещиноватости и отдельных трещин (их морфологии, характера и степени заполнения трещин и материала заполнителя и т. д), как на территории участка, так и за его пределами (до 3 км);
- бурение трех картировочных и одной разведочной скважины;
- гидрогеохимические и изотопные исследования;
- лабораторные исследования свойств горных пород и подземных вод;
- петрографическое изучение состава кернового материала.

Результаты комплексных исследований 2002–2004 гг. обобщены в отчетах ФГУП «ВНИПИпромтехнологии», ФГУП КНИГМС и КГПИ ВНИПИЭТ за 2002–2004 гг. [a–c].

По результатам работ 2002 г. в юго-западной части участка Енисейский была выделена территория площадью 25 км², впоследствии названная Байкало-Шумихинской площадью. В 2003 г. на Байкало-Шумихинской площади выполнено бурение трех картировочных скважин глубиной 100 м (Е-1, Е-2, Е-3) [d]. В 2004 г. началось бурение скважины (1-Е) проектной глубиной 600 м на целевой горизонт. Бурение всех скважин проводилось с полным отбором керна, комплексом геофизических исследований и опытно-фильтрационными работами [e, f].

В целом за 2003–2004 гг. по данным геолого-геофизических исследований на участке Енисейский было уточнено положение вещественных геологических комплексов, зон разрывных нарушений, построены геологические разрезы, геологическая и гидрогеологическая карты в масштабе 1:50 000 и 1:25 000, геолого-геофизическая модель участка Енисейский и Байкало-Шумихинской площади в масштабах 1:50 000 и 1:25 000 [g]. Геолого-геофизическая модель Байкало-Шумихинской площади включала Байкальский массив основных пород (метагббро, метадиабазы, амфиболиты), который стал рассматриваться в качестве перспективной вмещающей толщи, и в его контуре была намечена потенциально перспективная площадь под ПИЛ.

В 2005–2007 гг. сотрудники ВНИПИпромтехнологии, КГПИ «ВНИПИЭТ» и ГПК «КНИГМС» выполнили обобщение и комплексный анализ всех результатов, полученных для участка Енисейский, и уточнили позицию площадки для дальнейших изысканий с целью создания ПИЛ и объекта подземного захоронения РАО. Площадка размером 0,6 км с запада на восток и 1,5 км с юга на север располагалась на водоразделе ручьев Байкал и Безымянный и р. Шумихи. В ее пределах не было выявленных тектонических нарушений (рис. 4.4).

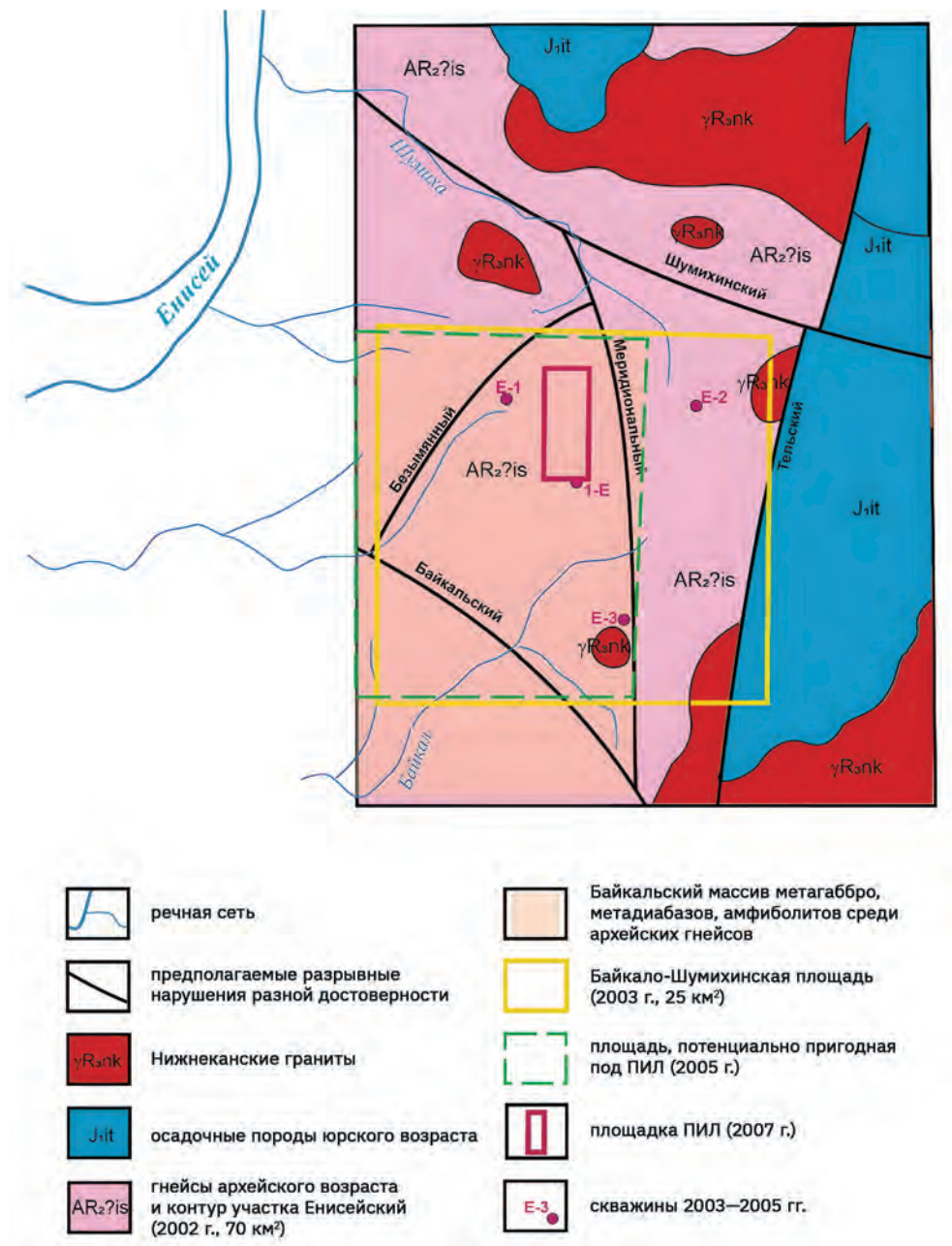


Рис. 4.4. Схема последовательного сокращения территории участка Енисейский в ходе предварительных исследований (по разным источникам)

Таким образом, по мере детального изучения участка Енисейский, который изначально захватывал гранитоиды и гнейсовые толщи, перспективная площадь была выбрана за пределами пород гранитоидного массива в области распространения метаморфических пород его обрамления. Последние вместе с гранитоидами относятся к *Нижнеканскому гранито-гнейсовому куполу*. Такие геологические структуры, согласно распространенным представлениям (например, Омеляненко Б. И. в [11]), формируются длительное время на большой глубине в условиях высоких давлений и температур, вплоть до переплавления части исходных пород в граниты, а другой части — до превращения в гнейсы.

4.1.4. Этап сравнительной оценки альтернатив и окончательного выбора места

Таким образом, к 2007 г. геологическая изученность альтернативных вариантов (Верхнеитатский и Енисейский) по объему геофизических работ и глубокого бурения стала сравнимой и достаточной для разработки Декларации о намерениях. Были подготовлены условия для завершения процедуры окончательного выбора участка под строительство ПИЛ на Нижнеканском массиве. Такое сравнение было выполнено в 2007 г. [12].

Оба участка были признаны пригодными на том основании, что соответствовали нормативным требованиям Ростехнадзора к размещению подземных объектов захоронения РАО, действовавших на тот момент [13]. Участки отличались составом слагающих пород. Верхнеитатский участок сложен *гранитоидами*. В интервале 100—700 м породы крепкие, слаботрещиноватые, за исключением интервала 380—480 м. Участок Енисейский сложен *метаморфическими гнейсами*. На глубине размещения в обоих случаях породы крепкие, слаботрещиноватые. Гнейсы участка Енисейский более неоднородны по строению толщи, чем гранитоиды в пределах участка Верхнеитатский. Большая неоднородность гнейсов была связана с частой перемежаемостью плагиогнейсов, их гранитизированных разностей и секущих дайково-жильных образований. В породах обоих участков широко представлены околотрещинные низкотемпературные метасоматические преобразования, хотя на участке Енисейский они уступают по интенсивности аналогичным образованиям в гранитах участка Верхнеитатский. Оба эти участка оценены как пригодные по гидрогеологическим характеристикам.

Следует признать, что на фоне сопоставимых показателей геологической пригодности рассматриваемых участков решающим фактором в выборе Енисейского участка оказалась его близость к развитой инфраструктуре ГХК (4 км против 24 км у участка Верхнеитатский) [h], что позволило прогнозировать снижение затрат на строительство и доставку РАО [14—17].

После завершения процесса выбора места потребовалась актуализация ДОН на строительство первоочередных объектов окончательной изоляции ВАО, т. е. ПГЗРО, включающего ПИЛ, на уже окончательно утвержденном месте-кандидате — участке Енисейский. Разработка и согласование актуализированной ДОН [i] была закончена к 2008 г. В ней участок Енисейский был согласован как окончательное место размещения ПИЛ (и в конечном счете ПГЗРО). Этот документ вместе с ОБИН позволили начать проектирование объекта (2009 г.) и выполнять более детальные геологические исследования и инженерные изыскания на площадке будущего строительства. Основными критериями привязки будущего объекта к местности послужили отсутствие признаков значительных разрывных нарушений и относительно выровненный рельеф водораздела.

4.2. Участок Верхнеитатский (участки Итатский и Каменный)

Участки Итатский и Каменный расположены на территории Итатской возвышенности между притоками р. Кан — реками Большой и Малый Итат. Они были выделены и определены в качестве перспективных в пределах Верхнеитатской площади в 1994 г. (рис. 4.5). После этого они изучались отдельно. Участок Каменный изначально имел площадь около 38 км², Итатский — несколько меньшую [4]. Вновь в объединенном виде как Верхнеитатский участок они предстали в качестве одного из альтернативных мест для размещения ПИЛ в 2001 г.

Рельеф Итатской возвышенности характеризуется сочетанием выположенных водоразделов шириной до 3—5 км и крутоврезанных речных долин. Долины рек узкие — шириной 30—35 м, реке до 150 м. Участок Итатский расположен в пределах абсолютных отметок рельефа 380—440 м, а на участке Каменный выделены два гипсометрических уровня рельефа [j]: 300—350 и 375—400 м.

Обнаженность территории невысока, коренные породы (обычно гранитоиды) обнаружены лишь по берегам р. Малый Итат и нижнего течения руч. Каменный.

4.2.1. Виды, методы и эффективность выполненных работ

Участок Верхнеитатский приурочен к гранитоидной части Нижнеканского массива. Его геологическое строение в значительной степени определяется позицией в блоковой структуре, характерной для северной части этого массива [k]. Основными задачами исследований, решавшимися геолого-структурными и наземными геофизическими методами, являлись изучение состава и физических свойств пород в разрезе гранитоидного массива, выяснение степени его неоднородности, трещиноватости, обнаруженных дистанционными методами.

Как принято на территориях, перекрытых рыхлыми отложениями, тектонические структуры (разрывные нарушения) первоначально выявлялись дистанционными методами. Территория Итатской возвышенности была охвачена структурно-геоморфологической картой масштаба 1:25 000, составленной А. П. Лопатиным в 1997 г. [l]. Для северной части Нижнеканского гранитоидного массива имела карта активных разломов и мегатрещин, составленная Н. В. Лукиной в 1996 г. по данным анализа деформаций поверхностей выравнивания [18].



Линеаментами трассируются прежде всего долины главных водотоков, положение которых, вероятно, предопределено разрывными нарушениями. В районе выделены шесть попарно перпендикулярных систем линеаментов. Две из них ортогональные, остальные диагональные. Высокой плотностью линеаментов характеризуется зона разломов, трассируемая долиной р. Большой Итат. Также выделяется зона, расположенная в восточной части участка Итатский и трассируемая тектонически предопределенным уступом рельефа. Пониженной плотностью линеаментов, незначительными амплитудами смещений поверхностей выравнивания (порядка 10 м) и отсутствием активных, хорошо выраженных разломов характеризуется выположенный водораздел в районе горы Большой Итат в пределах исследуемого участка [j]. Площадь участка Каменный разбита серией преимущественно ортогональных линеаментов, выявленных по данным дешифрирования аэро- и космоснимков, менее развиты диагональные нарушения северо-восточного и северо-западного простирания. Зоны милонитизации, встреченные на северо-западе участка в истоках ручьев Осиновый, Лимонитовый и Проходной, вероятно, связаны с субширотными линеаментами ортогональной системы [k].

В 1997 г. КНИИГиМС было пробурено 37 картировочных скважин, из них 15 — на участке Итатский и 22 — на участке Каменный. На участке Итатский был извлечен керн в двенадцати из пятнадцати скважин. Установлено, что мощность рыхлых отложений увеличивается до 35 м и более в северо-восточном направлении. Спектр вскрытых коренных пород — от типичных гранитов (лейкократовых, биотитовых) до биотит-амфиболовых диоритов и кварц-карбонатных пород. Встречены ксенолиты гнейсов и поздние внедрения диоритов. На участке Каменный вскрыты преимущественно гранитоиды. Они рассекаются дайковыми телами основного состава. Диоритовые породы представлены [l] в нижней части разреза на глубине 497 м.

Для глубинных исследований было пробурено две колонковые скважины с полным отбором керна: скв. 1-К глубиной 703 м на участке Каменный и скв. 1-И глубиной 505 м на участке Итатский. В 1999 г. к ним добавилась скважина С-1 (308 м). Во всех скважинах был выполнен комплекс геофизических исследований.

Скважиной 1-К вскрыты сравнительно мощная (75 м) толща рыхлых отложений и до глубины 497 м преимущественно гранитоиды второй фазы внедрения. Нижняя часть разреза представлена породами первой фазы, а также дайками диабазов, микрогаббро, лампрофиров. До глубины 150 м породы трещиноваты, затронуты процессами выветривания. По данным каротажа, выделяется несколько зон трещиноватых ослабленных пород в интервалах: 87,5—146,5 м; 212,0—213,0 м; 252,5—253,5 м; 466,0—482,5 м. Методом резистивиметрии выделены водоносные горизонты в интервалах: 538,0—549,0 м; 559,0—562,0 м; 686,0—690,0 м.

В разрезе скв. 1-И вскрыты преимущественно кварцевые диориты и гранодиориты первой интрузивной фазы внедрения с редкими ксенолитами гнейсов, прорванные лейкократовыми гранитами второй фазы.

Структурные исследования на участках Каменный и Итатский были поддержаны магнитной съемкой. Она была проведена в масштабе 1:25 000 по сети 250×25 м и 200×25 м [5] [l—n]. На детальных участках она была выполнена в масштабе 1:5000 по сети 50×20 м. В случае резких изменений магнитного поля шаг наблюдений уменьшался до 5—10 м. Анализ магнитного поля показал, что узкие субмеридиональные участки пониженных значений магнитного поля могут быть связаны с зонами катаклаза и милонитизации. Так, субмеридиональная зона относительно пониженных значений магнитного поля в западной части участка Каменный, вероятнее всего, отражает Большой Итатский разлом, разделяющий участки Итатский и Каменный.

4.2.2. Основные черты геологического строения

Выявленные особенности геологического строения участков отражены на предварительной геологической карте дочетвертичных образований масштаба 1:25 000, составленной сотрудниками КНИИГиМС В. М. Даценко, В. А. Ключевым и Э. Н. Линдом (рис. 4.6).

В ее основу положены результаты съемочных полевых работ масштаба 1:25 000, проведенных КНИИГиМС в 1996—1999 гг., данные анализа кернового материала картировочных и структурных скважин [5].

Малое количество обнажений коренных пород из-за большой мощности четвертичных отложений (до 80 м) и локального развития кор выветривания делает геологическую карту в значительной мере схематичной. Тем не менее она дает адекватное представление о геологическом строении участков Каменный и Итатский, а проведенный комплекс геофизических и петрографических работ позволил вполне успешно решить главную задачу исследований — выявление наиболее однородных монолитных блоков горных пород, пригодных для надежной изоляции ВАО.

Кристаллические породы, встреченные на обоих участках, принадлежат к разным фазам магматической деятельности (см. рис. 4.6) и различаются степенью вторичных преобразований [j]. Судя по данным бурения скважины 1-К, контакты между породами обеих фаз согласные, с плоскопараллельной текстурой диоритоидов и ориентировкой шлиров темноцветных минералов. Те и другие имеют склонение к горизонту около 70°, азимут падения в настоящее время выясняется.

Первая фаза Нижнеканского магматического комплекса включает гранодиориты, тоналиты и кварцевые диориты, слагающие серию останцов среди гранитоидов второй (главной) интрузивной фазы. Макроскопически это серые и светло-серые среднезернистые породы, отличающиеся повышенным количеством темноцветных минералов (кварцевые диориты), присутствием калишпата (гранодиориты) или полным его отсутствием (тоналиты). На контакте с более молодыми гранитами второй интрузивной фазы в диоритоидах и гранитоидах постоянно наблюдаются локальные мелкомасштабные процессы сульфидизации.

Для второй (основной) фазы наиболее характерны лейкократовые граниты, биотитовые граниты, порфиридные граниты [19].

Среди гранитов встречаются милонитизированные разности, в которых под микроскопом хорошо различимы тонкие ленты перекристаллизованного кварца [j].

Жильная фаза представлена дайками диабазов, диабазовых порфиритов, лампрофиров и микродиоритов мощностью от 0,1 до 10 м, а также редкими маломощными (0,1—0,3 м) жилами аплитов, приуроченных чаще к останцам пород первой фазы. В единичных случаях отмечаются жилы гранит-порфиров. В структурной скважине 1-К на протяжении 700 пог. м встречено 11 даек основных пород и 8 — кислых. Среди лампрофиров преобладают роговообманковые разности — спессартиты [j].

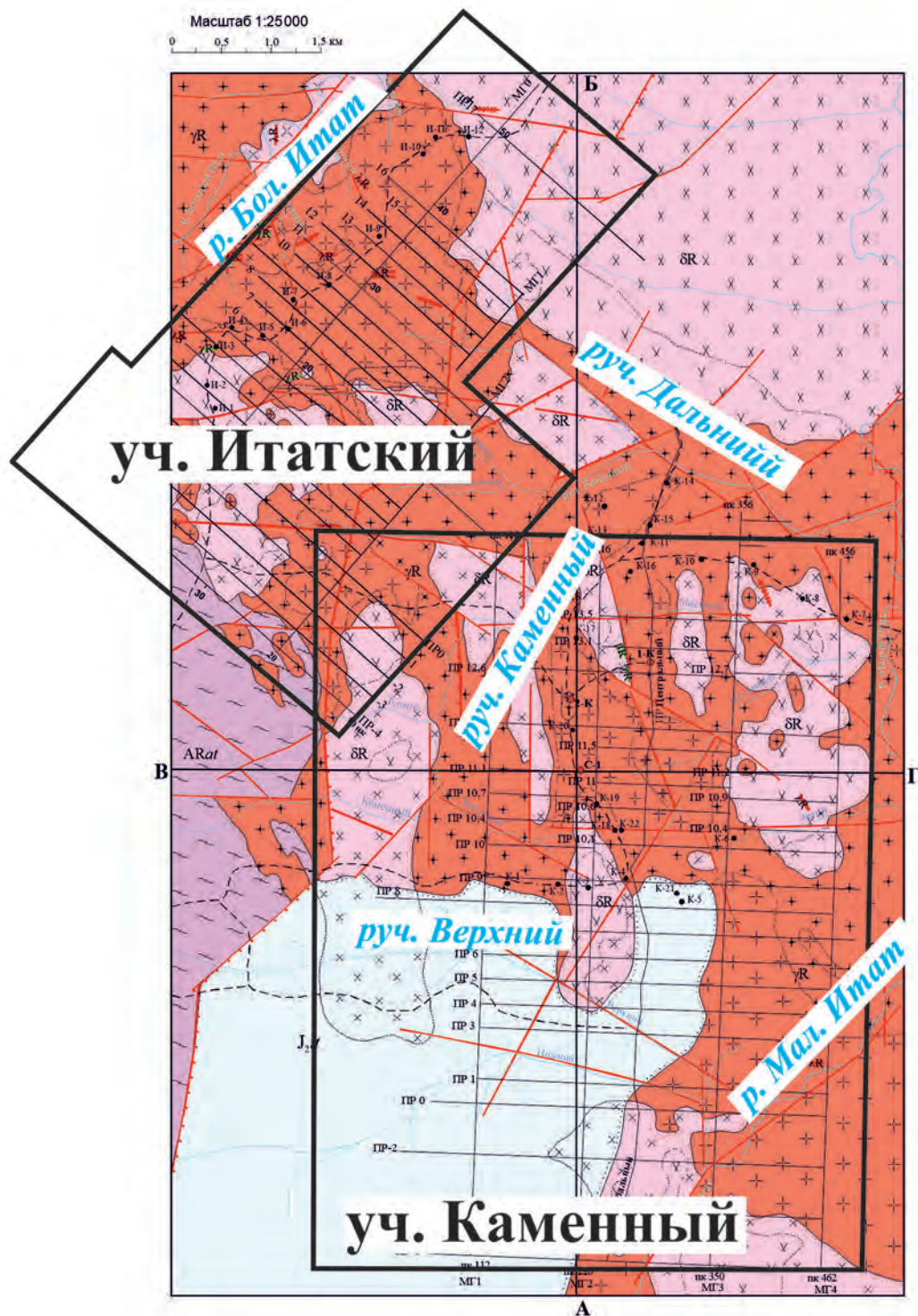
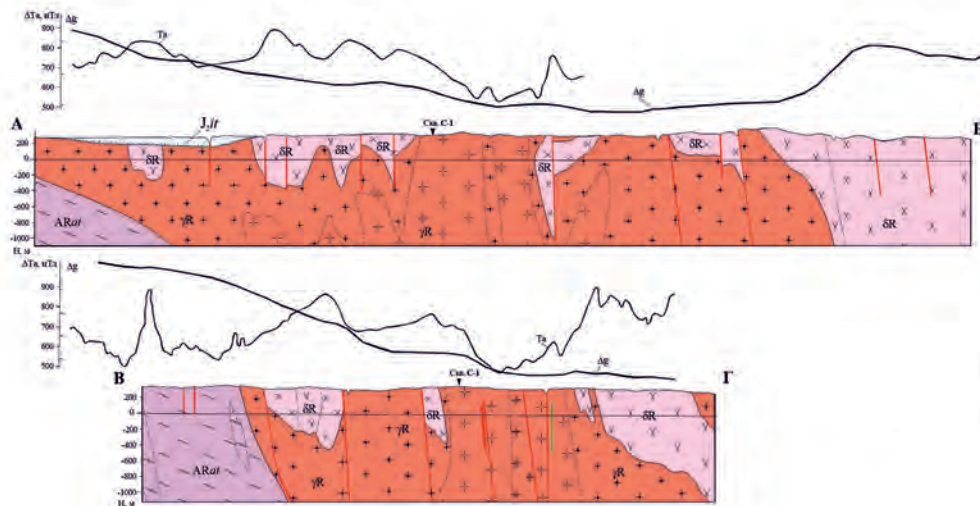


Рис. 4.6. Предварительная геологическая карта дочетвертичных образований участков Итатский и Каменный масштаба 1:25 000 (составили В. М. Даценко, В. А. Ключев и Э. Н. Линд, 2000 г.) [5]



Перекрывающий комплекс

J₂it юрская система; итатская свита; песчаники, алевролиты, аргилиты с редкими прослоями углистых пород

Нижнеканский магматический комплекс

- γR** 2 фаза: граниты, лейкограниты, аляскиты
- δR** 1 фаза: гранодиориты, тоналиты, кварцевые диориты, диориты
- βR-γR** жильная фаза: аплиты, пегматиты, диабазы, лампрофиры

Комплекс вмещающих пород

ARal архейско-протерозойская группа; атамановский метаморфический комплекс: биотитовые, амфибол- и гранат-биотитовые гнейсы, кордиерит-силлиманитовые сланцы, амфиболиты

Петрографические и специальные обозначения

	диориты		милониты по гранитоидам		нормальные стратиграфические и интрузивные фазовые границы, выделенные с учетом магнито- и гравиметрических данных (а), стратиграфические трансгрессивные границы (б)
	кварцевые диориты		аплиты		фациальные (б) границы магматических пород
	гранодиориты		пегматиты		контактово-измененные породы
	тоналиты		диабазы		диэюктивы, выделенные по данным дешифрирования аэроснимков (а), то же, с установлением плоскости сместителя (б)
	граниты биотитовые крупнозернистые-среднезернистые, розово-желтые		лампрофиры		контуры «слепых» интрузий повышенной основности
	граниты биотитовые крупнозернистые-среднезернистые, красно-розовые		кварц		картировочные скважины (глубины 13–50,5 м)
	граниты биотитовые крупнозернистые-среднезернистые, желто-розовые		гнейсы		колонковые скважины: 1-К (глубина 700 м), 2-К (проектная глубина 500 м), 1-1 (глубина 500 м), С-1 (глубина 308 м)
	алаяскиты крупнозернистые-среднезернистые, желтоватые		амфиболиты		профили и магистрали АМТЗ
					лесовозные дороги

Минералого-петрографические исследования керновых проб позволили выделить следующий ряд особенностей гранитоидов массива, характеризующих их как среду для изоляции радионуклидов [4].

- Различие фазовых разновидностей, неоднородности структуры и текстуры не отражаются на общей монолитности и массивности гранитоидов, поскольку все фациальные переходы крайне постепенные. Открытая пористость пород носит обычно незерновой характер, и ее величина варьируется в пределах 0,28—0,82 %, в среднем — 0,5 %. Значительно выше открытая пористость дайковой фазы: в диабазовых порфиритах до 3 %, в микросиенитах до 9,4 %. В основном это округлые или уплощенные газовые пустоты, частично заполненные карбонатами, серицитом и кварцем. Оценить возможности дайковых образований как миграционных каналов радионуклидов могут лишь натурные крупномасштабные испытания в подземной лаборатории.
- Для гранитоидов массива характерно явление протоклаза — деформации кристаллов до консолидации расплава. Протоклаз неинтенсивный, с высоким уровнем залеченности нарушений, о чем свидетельствует сравнение физико-механических свойств в различной степени деформированных пород. Тем не менее дефектные структуры в кристаллах минералов могут существенно увеличить величину удержания микропримесей, присутствующих в мигрирующих растворах.
- Полевые шпаты в гранитоидах массива пелитизированы. На границах кристаллов, по трещинам спайности или по контурам зональности развивается микродисперсная масса вторичных глинисто-слюдистых минералов. Объемная лабиринтная система межзерновой пористости пород, через которую может происходить водная фильтрация радионуклидов, содержит природные сорбенты с большой свободной поверхностью. Именно этой особенностью гранитоидов можно объяснить их высокие удерживающие свойства относительно радионуклидов.

4.2.3. Гидрологические и гидрогеологические условия*

Исследования поверхностных и подземных вод были нацелены на оценку условий миграции радионуклидов из пункта подземной изоляции в биосферу. Блок малопроницаемых гранитоидов вне зон трещиноватости на глубине 500 м вполне способен обеспечить безопасность изоляции за счет минимизацию притока подземных вод в пункт захоронения.

Территория Верхнеитатского участка характеризуется умеренным климатом с годовым количеством осадков 540—560 мм. Аккумуляция атмосферных осадков происходит на плоских водоразделах, сложенных элювиальными суглинками и глинами. Характер рельефа дает общее представление об областях с различным гидродинамическим режимом приповерхностных вод трещинно-грунтового стока. Области питания — на возвышенной части водоразделов, область транзита и разгрузки — по понижениям и долинам рек и области разгрузки — по руслам и прибрежным частям рек Большой и Малый Итат.

* Подраздел подготовлен по материалам [4].

Водоносная зона экзогенной трещиноватости Нижнеканских гранитоидов была охарактеризована как водообильная, с максимальным наполнением в начале лета и наименьшим — зимой. Ее максимальная мощность достигает 50—70 м. В среднем глубина залегания зеркала грунтовых вод под осевыми линиями водоразделов составляет 20—30 м. Гидрохимические исследования, проведенные в районе, показали следующее.

- По величине общей минерализации воды поверхностных водотоков и источников являются исключительно пресными. Значения общей минерализации лежат в интервале 50—450 мг/л, при типичных количествах — 150—300 мг/л.
- По составу главных водорастворенных солей воды гидрокарбонатно-кальциевые. Молярная доля HCO_3 обычно близка к 95 %, а молярная доля Ca^{2+} в сумме катионов — 75 % при резко подчиненном положении магния, натрия и калия.
- По величине pH — воды преимущественно слабощелочные и нейтральные (значения 6,7—8,1).
- При средней величине Eh около +125 мВ почти для 95 % проб вод из ручьев и источников это значение не опускается ниже нуля, а в 85 % проб оно выше +50 мВ.

Анализ полученной информации позволил сделать следующие заключения.

- Гидрохимические характеристики дают основания для вывода об инфильтрационном происхождении подземных вод и о преимущественно подземном питании поверхностной гидросети. Все типы наземных водопроявлений существенно отличаются от атмосферных осадков.
- Существующие значения Eh типичны для зон интенсивного водообмена и могут свидетельствовать о том, что на изучаемой территории в восходящую разгрузку вовлечены лишь подземные воды неглубоких горизонтов [4].

Гидрогеологические исследования массива базируются на данных опробования поверхностных вод и единичных скважин. Известные источники приурочены к зонам разломов и склонам долин рек и ручьев вне зон разрывных нарушений. По характеру рельефа и связи источников с зонами разломов различного порядка можно предполагать существование линейных резервуаров трещинных вод, разгружающихся в крупные реки района. По характеру рельефа глубина циркуляции атмосферных вод по зонам разломов оценивается величиной до 500 м. В скважине 1-К (участок Каменный) зафиксированы водопроявления в интервале глубин: 538—549, 559—562 и 686—690 м. Прямые гидрогеологические исследования показали, что коэффициент фильтрации в зонах трещиноватости на глубине 500 м не превышает 10^{-4} — 10^{-5} м/сут [20].

4.2.4. Особенности участков Итатский и Каменный

Сравнительная характеристика магнитного поля на участках Итатский и Каменный позволила сделать вывод о различии структур магнитных полей и, следовательно, о некотором различии в геологическом строении этих участков. На участке Итатский состав пород более «пестрый». Под покровными отложениями, вероятно, находится прикровельная часть Нижнеканского гранитоидного массива, возможно, с ксенолитами вмещающих пород атамановского метакомплекса, а также широко развиты процессы милонитизации и катаклаза. На участке Каменный под покровные отложения четвертичной системы и под останцы юрских отложений выходит более глубоко эродированная часть массива и поэтому более однородная по вещественному составу пород [j].

Результаты комплексной интерпретации электроразведочных материалов по участку Каменный дали возможность сократить перспективную площадь. Южная часть участка оказалась неперспективна в связи с тем, что характеризовалась значительной неоднородностью и трещиноватостью гранитоидов, обусловленной широко развитой сетью разрывных нарушений. В пределах северной части участка Каменный был выделен блок размерами $3,6 \times 3,6$ км слабопроницаемых пород (удельное сопротивление от 5000 до 30 000 Ом·м). За границы блока были приняты субмеридиональные и субширотные разрывные нарушения. Глубина залегания кровли слабопроницаемых гранитоидов в пределах выделенного блока изменяется от 20 до 700 м, в основном составляя 70–250 м. В пределах выделенного блока наиболее перспективными для подземного хранилища были признаны западная и восточная части [l], где слаботрещиноватые и монолитные гранитоиды наиболее близко подходят к дневной поверхности и имеют удельное сопротивление 5000–30 000 Ом·м.

О количественном соотношении различных разновидностей пород в районе участков Каменный и Итатский можно судить по обобщенным разрезам, составленным В. М. Даценко [20] по керну скв. 1-К и 1-И и приведенным в табл. 4.1, 4.2.

Нижнеканские гранитоиды на участке Каменный обладают целым рядом особенностей. Однако в целом, несмотря на различия в структуре и текстуре, гранитоиды являются массивными, монолитными, поскольку все переходы между фациальными разновидностями малозаметны, а открытая пористость в них значительно меньше 1 %. Небольшие колебания в вещественном составе и структурах в фациальных разновидностях гранитоидов обеих фаз почти не отражаются на их физических характеристиках — плотности, пористости, упругих параметрах, удельном электрическом сопротивлении, т. е. параметрах, показывающих монолитность гранитоидов. Особенность гранитоидов участка Каменный состоит в том, что полевые шпаты в них не полностью, но в значительной степени пелитизированы (глинизированы). Явление пелитизации специально подчеркивается потому, что в свете решения задач захоронения РАО наличие ее не ухудшает монолитности пород, хотя может незначительно снизить их упругие характеристики. С другой стороны, наличие высокодисперсных глинистых частиц способствует увеличению сорбции радионуклидов при фильтрации их через гранитоиды.

Таблица 4.1. Обобщенный разрез по колонковой скважине 1-К (участок Каменный)

Интервал, м	Литологический состав
0,0—75,0	Рыхлые четвертичные образования с корой выветривания и переотложенными юрскими отложениями
75,0—110,0	Главная (вторая) фаза. Лейкократовые граниты (78 %) с ксенолитами гранодиоритов, мелкозернистых гранитов. Вверху дезинтегрированные граниты, песок и дресва гранитов
110,0—145,0	Ксенолит первой фазы — гранодиориты (80 %), прорванные жилками лейкократовых гранитов, биотитовых гранитов, аплитов
145,0—497,0	Главная (вторая) фаза — граниты, лейкократовые граниты (преобладают), аляскисты. Дайки аплитов, микрогранитов, диабазов, лампрофиров
497,0—703,0	Останец гранодиоритов, кварцевых диоритов и тоналитов первой фазы, инъецированный жилками гранитов, лейкогранитов второй фазы, дайками диабазов, микрогаббро, лампрофиров. Состав пород первой фазы (80 % разреза): гранодиориты — 26, тоналиты — 6, кварцевые диориты — 48. Породы содержат ксенолиты гнейсов и шлиры темно-цветных минералов

Таблица 4.2. Обобщенный разрез по колонковой скважине 1-И (участок Итатский)

Интервал, м	Литологический состав
0,0—23,0	Глинисто-песчано-дресвяные образования коры выветривания
23,0—141,4	Гранодиориты серые, среднезернистые, участками прорванные лейкократовыми гранитами. В верхней части порода выветрелая, в нижней — значительно трещиноватая
141,4—173,7	Граниты лейкократовые милонитизированные
173,7—305,0	Гранодиориты с редкими ксенолитами гнейсов
305,0—325,0	Граниты лейкократовые мелкозернистые
325,0—435,0	Гранодиориты с редкими ксенолитами гнейсов. В верхней части прорваны лейкократовыми гранитами
435,0—478,0	Граниты с редкими ксенолитами гранодиоритов
478,0—505,0	Гранодиориты с жилами лейкократовых гранитов

Гранитоиды участка Каменный как первой, так и второй фаз прорываются дайками диабазовых порфиритов, лампрофиров, микросиенитов, аплитов, а также кварцевыми жилами. Большинство даек приурочено к гранитоидам первой фазы.

На участке Итатский встречаются вмещающие породы, представленные гнейсами, залегающими в виде ксенолитов различного размера, несущих следы активного воздействия гранодиоритов. По внешнему виду гнейсы — это плотные мелкозернистые породы серовато-зеленого цвета, иногда с четкими признаками кристаллизационной сланцеватости. В гнейсах нередко наблюдаются жилки гранодиорита или пойкилобласты полевого шпата. Контакты прочные, «сварные». По составу гнейсы относятся к биотитовым и амфибол-биотитовым разновидностям и имеют гранолепидобластовую и лепидонематогранобластовую структуры и гнейсовидную текстуру.

По таким важным условиям, как гидродинамические характеристики массива, отличий между участками не выявлено, вероятно, по причине малого числа измерений.

Проведенные оценки потенциальной рудоносности участков Каменный и Итатский показали отсутствие перспектив для промышленного оруденения [21].

В заключение обзора характеристик участков Итатский и Каменный можно утверждать, что, несмотря на определенные различия в геологическом строении и составе горных пород, оба участка можно считать сходными. Это послужило в конечном счете их объединению в единый потенциально пригодный участок — Верхнеитатский.

4.3. Участок Енисейский. Исследования 2002–2005 гг.

Участок Енисейский в качестве перспективного был выделен еще в 1994 г. (см. рис. 4.3 в разделе 4.1) в результате обзорных (масштаб 1:100 000 — 1:50 000) исследований северной части Нижнеканского массива гранитоидов, однако затем длительное время более детальных геологических работ на нем не проводилось. Участок привлек к себе внимание в качестве альтернативы Верхнеитатскому участку только в 2001 г. при подготовке Декларации о намерениях на строительство подземной лаборатории [10].

Участок расположен на северо-западной окраине Нижнеканского массива, на водораздельной части верховьев реки Шумихи и левых притоков реки Большая Тель, примерно в 7,0 км от ГХК. Начальная площадь исследуемой территории была принята 70 км².

Территория участка характеризуется крайне низкой обнаженностью коренных пород по причине существенных мощностей рыхлых отложений, перекрывающих кристаллический фундамент, а также практически полной залесенности.

К 2002 г. геолого-геофизическая и гидрогеологическая изученность участка была невысокой, преимущественно в мелком масштабе (рис. 4.7, 4.8).

4.3.1. Задачи и методы выполненных работ

Целью исследований, проводимых с привлечением научных и изыскательских организаций Красноярского края с 2002 г., была характеристика тектонической структуры, геологического строения, состояния и параметров физических процессов массива горных пород участка Енисейский для оценки возможности безопасного размещения в его пределах отвержденных и твердых высокоактивных отходов.

Для этого были поставлены следующие задачи:

- изучение с поверхности структурно-тектонических условий участка, выделение наименее проницаемых блоков монолитных пород различными геофизическими и специальными методами;
- определение пространственного положения поверхностей раздела между различными по проницаемости комплексами породного массива;
- бурение трех картировочных и одной глубокой скважины;
- оценка гидрогеологических и гидродинамических условий участка на основе особенностей формирования химического состава подземных вод, картирования проницаемых тектонических нарушений.

Для достижения цели, согласования и оценки эффективности подходов, а также получения исходных данных для ОБИН была разработана комплексная программа исследований [11], которая неоднократно докладывалась на международных и российских совещаниях и научных конференциях, посвященных захоронению высокоактивных отвержденных отходов в глубоких геологических формациях [10, 22, 23].

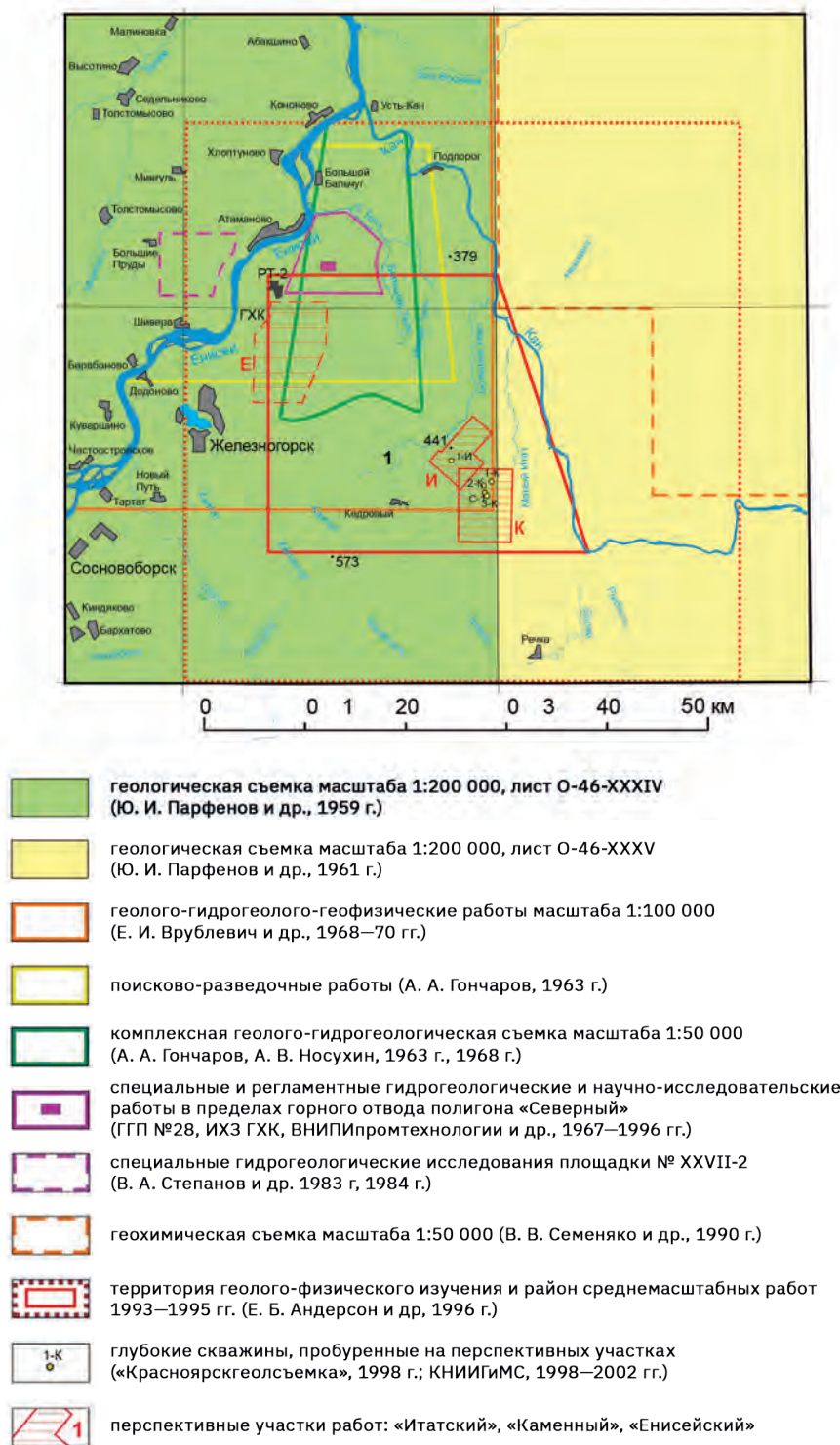


Рис. 4.7. Картограмма геолого-гидрогеологической изученности территорий, прилегающих к северу Нижнеканского массива гранитоидов. Масштаб 1:500 000 [о]



Рис. 4.8. Картограмма геофизической изученности территорий, прилегающих к северу Нижнеканского массива гранитоидов. Масштаб 1:500 000 [о]

Одним из основных приемов изучения массива кристаллических пород, слагающих участок Енисейский, явилось опережающее проведение геофизических работ. Комплекс и последовательность геофизических и специальных методов изучения участка Енисейский подбирался таким образом, чтобы, используя преимущества каждого метода, можно было в максимально сжатые сроки получить представление о структурно-тектонических, гидрогеологических и других, важных для подземной изоляции ВАО особенностях участка Енисейский [10, 11].

Комплекс геолого-геофизических исследований, проведенных на участке Енисейский в 2002—2004 гг., включал [а, с, р]:

- гидрологические наблюдения;
- гидрогеохимические исследования;
- обобщение результатов дешифрирования космических снимков и морфоструктурного анализа топографических карт;
- гелиевую и эманионную съемки;
- геофизические работы;
- бурение скважин и исследования в них.

Гидрологические и гидрогеохимические исследования. Комплекс гидрологических и гидрогеохимических исследований в целом был ориентирован на оценку общих гидрогеологических условий участка, изучение особенностей формирования химического состава подземных вод, составление гидрогеологической и гидрогеохимических карт участка в масштабе 1:50 000 и выявление показателей, информативных в отношении картирования проницаемых тектонических нарушений и оценки гидродинамической структуры геологического разреза.

В методическом отношении полевые гидрогеологические и геохимические исследования учли опыт при аналогичных изысканиях участков Итатский и Каменный [q]. По всей площади участка Енисейский в 72 пунктах опробования на протяжении 150 пог. км поисковых маршрутов были проведены режимные гидрологические, метеорологические наблюдения, изучение химического состава атмосферных осадков, природных вод, отбор проб и их консервация для лабораторного определения микрокомпонентного химического состава в лабораториях ГХК (85 проб). Кроме того, пункты гелиевого опробования совмещали с 72 пунктами дополнительного отбора проб водорастворенного гелия в условиях стационарной лаборатории ГХК [q].

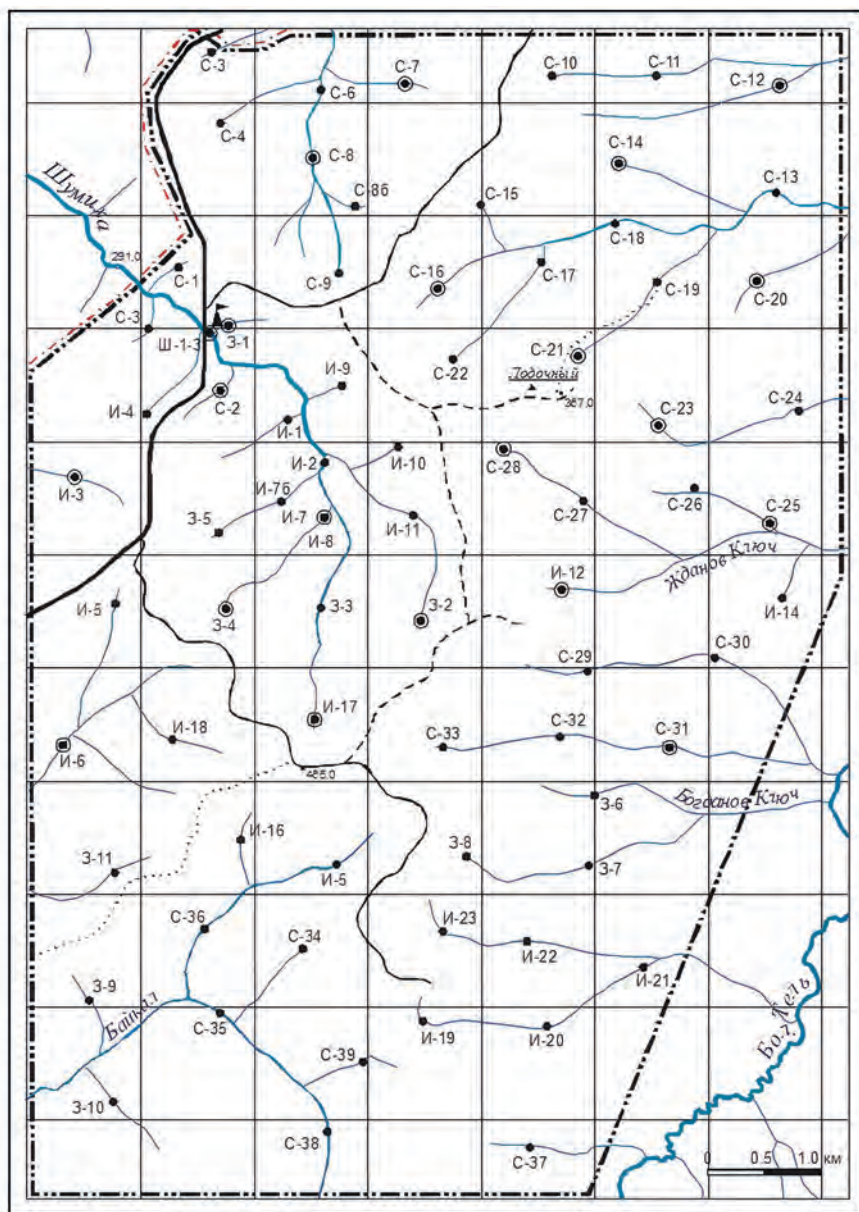
Для оценки периода водообмена и условий аккумуляции подземных вод изучалось распределение трития, дейтерия и кислорода в атмосферных осадках, поверхностных и подземных водах, что позволило проследить эволюцию водных масс во времени и пространстве.

На рис. 4.9 показаны поисковые гидрогеологические маршруты и места гидрогеохимического опробования подземных вод для общего химического анализа и микрокомпонентного химического состава.

Дешифрирование космоснимков и топокарт по рассматриваемой территории проводилось неоднократно в разных масштабах и разными авторами, в частности А. П. Лопатыным [r] и Н. В. Лукиной [24]. При анализе линеamentной сети участка было проведено изучение:

- глубины эрозионных врезов как показателя интенсивности тектонических движений;
- площади изолированных блоков как показателя раздробленности территории;
- данных о скорости тектонических движений.

Полученная схемалинеamentов послужила основой для выполнения и структурного анализа полевых гидрогеологических и геолого-геофизических материалов.

**Точка опробования и ее номер**

- И-1 с базовым комплексом проб
- ⊙ С-2 с расширенным комплексом проб

Границы

- - - закрытой зоны ГХК и РТ-2
- исследуемой территории (участок Енисейский)
- ▲ полевой лагерь отряда

Дороги

- бетонная автотрасса
- грунтово-гравийные
- лесные
- охотничьи тропы

Рис. 4.9. Карта фактического материала (гидрогеохимическое опробование) [q]

Гелиевая и эманационная съемки. На участке Енисейский были проведены гелиевая и эманационная съемки, как методы обнаружения и картирования прогнозируемых глубинных разломов на закрытых территориях. Методика и применяемое оборудование изложены в работах [р, q].

Геофизические исследования включали:

- гравиметрические и магнитные методы;
- методы электроразведки (МПП — метод переходных процессов, ВЭЗ — вертикального электрического зондирования, АМТЗ — аудиоманнитотеллурического зондирования);
- сейсмические методы.

Они проводились по профилям, показанным на рис. 4.10, и были одними из основных методов, применяемых для изучения структурно-тектонических условий участка Енисейский, выделения в его границах блоков однородных и монокристаллических пород, пригодных для размещения подземного сооружения, определения пространственного положения поверхностей раздела между комплексами горных пород, изучения свойств и состояния горных пород. Полевые геофизические исследования и первичная обработка полученных материалов проводились специалистами ГПК «КНИИГиМС», комплексная интерпретация — специалистами ФГУП «ВНИПИпромтехнологии» и ФГУП «Центр ГЕОН им. В. В. Федынского». Методика и применяемое оборудование изложены в соответствующих отчетах [а, с].

Наземная магнитная съемка территории участка Енисейский выполнялась для определения пространственного положения интрузивных тел и метаморфических комплексов, выявления тектонических нарушений различного порядка и зон повышенной трещиноватости.

Гравиметрические исследования проводились для изучения тектонических и литолого-петрографических особенностей района, выявления однородных монокристаллических блоков горных пород.

Электроразведочные работы, проведенные на участке Енисейский, были представлены тремя модификациями: методом переходных процессов (МПП), вертикальным электрическим зондированием (ВЭЗ) и аудиоманнитотеллурическим зондированием (АМТЗ).

Метод МПП был нацелен на установление зон трещиноватых пород и других неоднородностей в породном массиве и позволил провести картирование верхней части разреза (четвертичных и юрских отложений, коры выветривания). Выявление и прослеживание разрывных нарушений и обводненных зон выполнялось методом ВЭЗ. Электроразведочные работы методом АМТЗ проводились для изучения внутренних неоднородностей глубинных частей разреза и позволили установить структурное положение кровли интрузивного массива. Метод ВЭЗ был ориентирован на расчленение верхней части разреза, выделение четвертичных отложений и их мощности, прослеживание рельефа поверхности высокоомного монокристаллического основания и выделение трещинных и ослабленных зон пониженного сопротивления.

Сейсмические исследования в комплексе с другими геофизическими методами проводились для изучения внутренней структуры коренных пород, обнаружения и прослеживания зон тектонических нарушений, выявления зон трещиноватости и т. д.

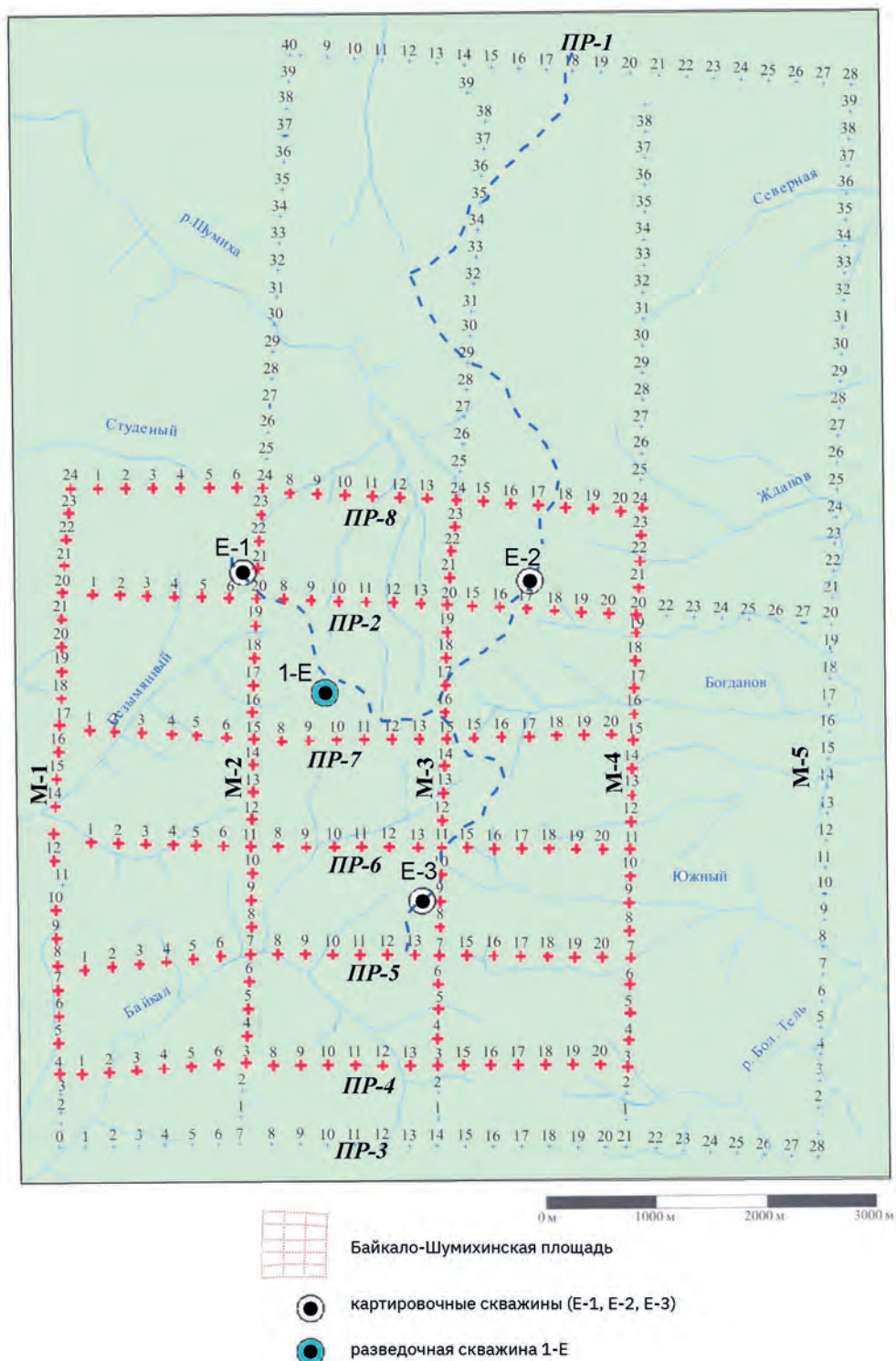


Рис. 4.10. Схема расположения геофизических профилей (красные крестики — Байкало-Шумихинская площадь) и буровых скважин на участке Енисейский (2002–2004 гг.) [с]

Бурение скважин и исследования в них осуществлялись для изучения геологического разреза и гидрогеологических условий Байкало-Шумихинской площади. Места расположения скважин были определены по результатам геолого-геофизических и других исследований с учетом имеющихся подъездных дорог. Были пробурены три картировочные скважины (Е-1, Е-2, Е-3) глубиной 100 м и глубокая разведочная скважина (1-Е) глубиной около 600 м, все с отбором керна.

Бурение проводилось без добавления глины, с использованием специальных добавок в буровой раствор для предотвращения колюматации скважин. В пробуренных скважинах проведен комплекс геофизических исследований (ГИС) и опытно-фильтрационных работы (ОФР) [d, e].

Для определения фильтрационных свойств пород в опробуемых интервалах по мере их проходки проводились опытные откачки и наливы. Поинтервальные откачки выполнялись в нижней части всех разрезов среди трещиноватых и слаботрещиноватых пород [g].

Перед проведением опытно-фильтрационных работ скважина прокачивалась до полного осветления воды. Во время проведения откачек отбирались пробы воды и непосредственно на месте проведения работ определялись быстроменяющиеся гидрогеохимические показатели воды (E_h , pH, температура и минерализация). Отбор проб воды из скважин для лабораторных исследований проводился в конце откачек непосредственно на изливе у устья скважины для изучения физических свойств и химического состава подземных вод. Раздельные пробы отбирались для комплексного анализа, для анализа микрокомпонентного состава и для изотопного анализа в химической лаборатории ФГУП «ВСЕГИНГЕО» Минприроды России.

4.3.2. Результаты геолого-структурных исследований

Общие представления о геологическом строении участка Енисейский в начале его детального изучения базировались на результатах геологического картирования и геофизических работ прежних лет в масштабе 1:200 000 (см. рис. 4.7, 4.8). Затем они дополнялись результатами геолого-геофизических исследований в более крупном масштабе, выполненных в 2002–2004 гг. уже применительно к задачам оценки его пригодности для захоронения ВАО [a, c].

Обобщение результатов структурного анализа рельефа и аэро- и космоснимков с учетом того, что далеко не все линеаменты имеют тектоническую природу, показало, что на территории развито несколько систем трещиноватости (рис. 4.11). Наиболее протяженные и отчетливо выраженные линеаменты имеют северо-северо-восточное простирание, которое в целом совпадает с планом древних структур краевого шва Сибирской платформы. В частности, примерно в 30 км восточнее находится Приенисейский глубинный разлом, а в нескольких километрах западнее — Муратовский разлом. Эти крупные структуры не пересекают территорию участка Енисейский, поэтому их нет на рисунке. Другая система линеаментов имеет северо-восточное и субширотное простирание.

Выполненные **геофизические работы** показали, что положение участка Енисейский в общей структуре гравитационного поля района (масштаб 1:200 000) определяется приуроченностью к области обширной отрицательной гравитационной аномалии, соответствующей площади развития гранитоидов Нижнеканского массива. Юго-западную часть участка занимает наименее дифференцированный блок площадью около 35 км², который практически полностью «вписывается» в границы Байкало-Шумихинской площади [p].

Карта **районирования магнитного поля** являлась важным самостоятельным исходным документом для обоснования перспективного участка планируемых детальных работ (рис. 4.12). Магнитное поле участка Енисейский отличается значительной дифференцированностью как по форме и размерности аномалий, так и по напряженности поля. Выделение аномальных объектов проводилось по контурам изодинам ввиду их изометричной формы. В первом приближении выделенные брахиформные аномалии интерпретировались как геологические тела (интрузии, блоки, складки) с квазиоднородными структурой и строением, а также степенью деформации и метаморфизма. Отрицательные аномалии принимались за породы преимущественно кислого состава (диоритоиды, гранитоиды), положительные — за породы основного состава (метадиабазы, метагаббро), амфиболиты и гнейсы. По признакам осей простираия и мозаичности поля была намечена достаточно четкая тектоническая зональность участка Енисейский, позволявшая разделить его на западный и восточный макроблоки, примерно по линии магистрального профиля М-3. Структурный рисунок этих зон определяет серия локальных знакопеременных изометричных экстремумов магнитного поля (элементов второго и третьего порядков) и дуговой характер огибающих их структурных линий. Если элементы первого порядка были отнесены к главным интрузивным фазам, то элементы второго и третьего порядка были связаны с проявлением более поздних жильных фаз.

Магнитные аномалии на карте уверенно коррелируются с крупными и иными линеаментами. Так, диагональные линеаменты прослеживаются хорошо локализованными зонами аномалий северо-восточного простираия. Среди ортогональных направлений выделяется меридиональная линейная зона аномалий, фактически совпадающая с линией М-3 (Меридиональный разлом).

Совокупность гравиметрических и магнитометрических характеристик и параметров позволила утверждать, что наиболее крупным монолитным геологическим объектом на участке Енисейский является пластообразный массив, сложенный интрузией, предположительно, основного состава (Байкальский массив), мощностью до 2,0—2,5 км. Его слабонарушенная часть расположена между профилями ПР-2 и ПР-3 и магистралями М-1 и М-3. На том этапе изученности (конец 2002 г.) участка Енисейский именно эта область (Байкало-Шумихинская площадь) стала рассматриваться в качестве наиболее перспективной с точки зрения требований, предъявляемых к горному массиву, и соответственно для выбора мест заложения «разведочных» скважин.

Изучение участка Енисейский электроразведочными методами в целом показало однозначность интерпретации материалов и позволило построить геоэлектрическую модель исследуемой территории.

Метод МПП был нацелен на установление зон трещиноватых пород и других неоднородностей в породном массиве и позволил провести картирование верхней части разреза (четвертичных и юрских отложений, коры выветривания), а также выявление и прослеживание разрывных нарушений и обводненных зон (рис. 4.13).

Электроразведочные работы методом АМТЗ проводились для изучения внутренних неоднородностей глубинных частей разреза и позволили установить структурное положение кровли интрузивного массива (рис. 4.14).

Результаты работы методом АМТЗ дали информацию о структурах до глубины 2,5—3,0 км. Массив был разделен на структурные этажи, каждый из которых был охарактеризован. Верхний — имеет изменчивую мощность — от 250 до 600 м и преимущественно юго-западную — северо-восточную ориентировку (азимуты от 30—40° до 60—70°). Нижний — в основном, субмеридиональное простираие структур в азимутах $\pm 10^\circ$.



Рис. 4.11. Схема линеаментов на участке Енисейский [р]

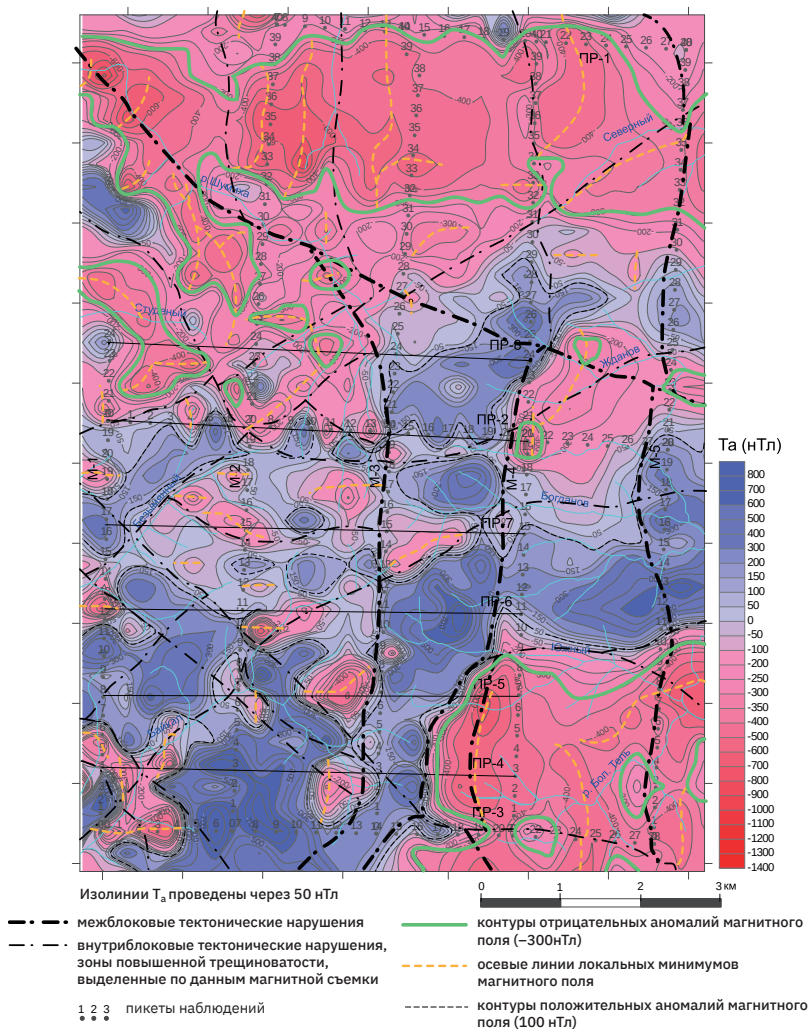
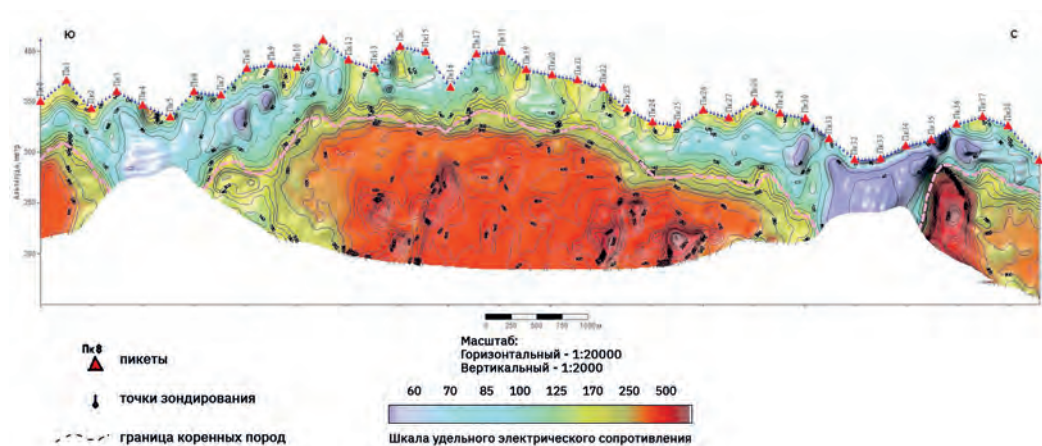
Рис. 4.12. Карта магнитного поля (T_a). Участок Енисейский [а]

Рис. 4.13. Вертикальный разрез удельного электрического сопротивления по магистрали М-3. Метод переходных процессов (МПП) [а]

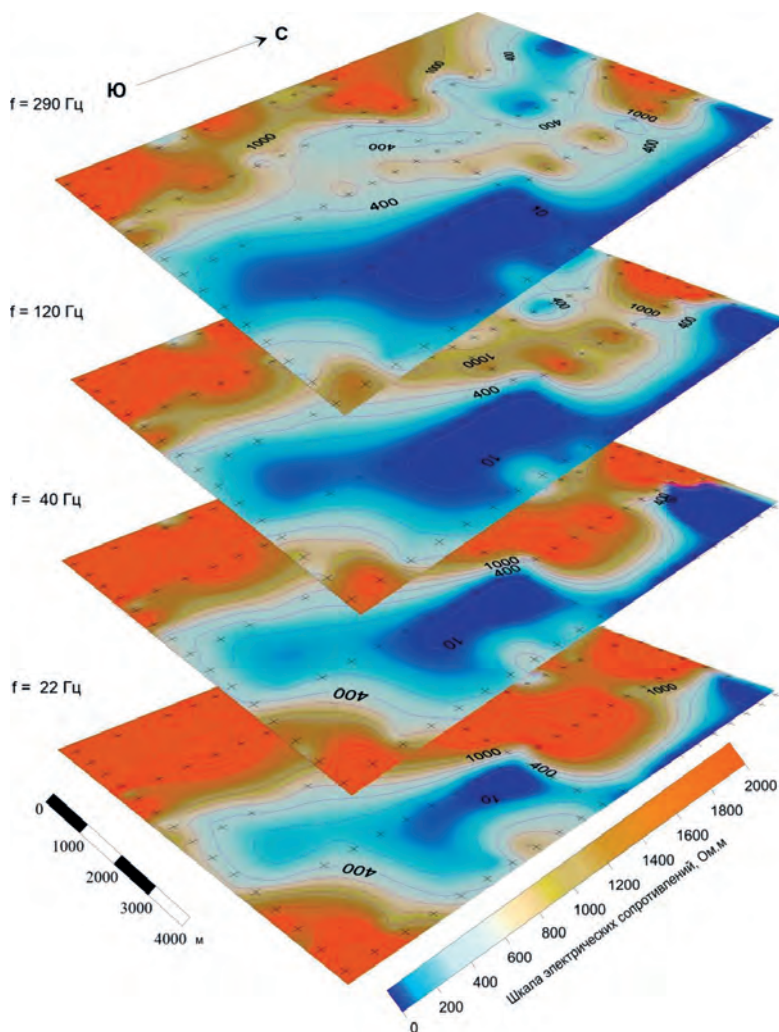


Рис. 4.14. Блок-диаграмма срезов среднего сопротивления на разных частотах зондирования методом АМТЗ [а]

Подошва верхнего комплекса (возможно, тектонической пластины) фиксирует поверхность несогласия, на которую замыкаются локальные разрывные структуры и трещины зоны верхней части разреза. Предполагается, что это главная поверхность дисгармонии, разделяющая верхний и нижний структурные комплексы.

Минимальная глубина залегания поверхности интрузии или контактово-метасоматически измененных пород (Байкальский массив) составляет порядка 300—400 м. Это подтвердилось бурением скв. 1-Е, вскрывшей на глубине 200 м интрузивное тело, согласно слоистости вмещающих пород основного состава ярлычихинского комплекса. Ниже на 40—45 м была зафиксирована зона закалки metabазальтов, а еще ниже обнаружены амфиболизированные габбро-диабазы [а, с, d] (рис. 4.15).



Рис. 4.15. Фото керна из скважины 1-Е

Результаты интерпретации ВЭЗ показали положение крутопадающих зон трещиноватости. На рис. 4.16 приведен один из разрезов участка Енисейский, пересекающих скважины Е-1 и Е-2.

Сейсмические исследования позволили уточнить внутреннюю структуру, проследить зоны тектонических нарушений и зоны повышенной трещиноватости (рис. 4.17) [g]. Сейсморазведочные работы показали очевидное отсутствие крупных активных тектонических разрывов в массиве пород Енисейского участка и на его ближайшей периферии. Была выявлена нижняя граница атамановской серии архея на глубинах 1,8–1,9 км. На глубине 1,5–2 км было выделено предположительное пологое тектоническое нарушение, падающее на северо-запад под углом 30° .

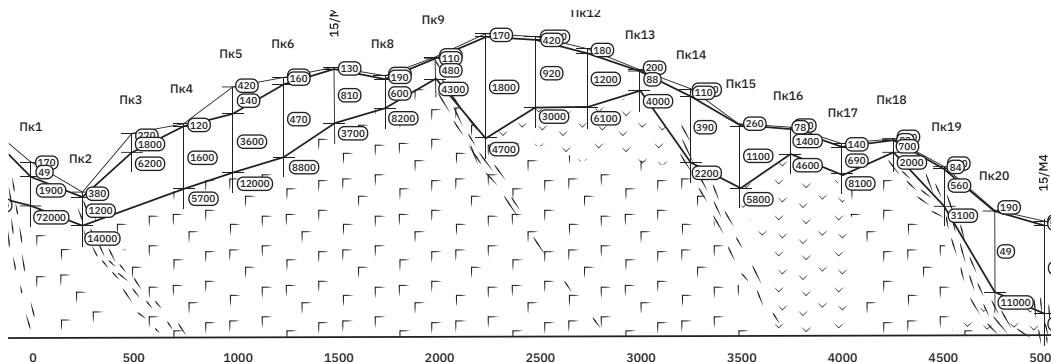


Рис. 4.16. Результаты интерпретации данных ВЭЗ по линии ПР-7, участок Енисейский [с]

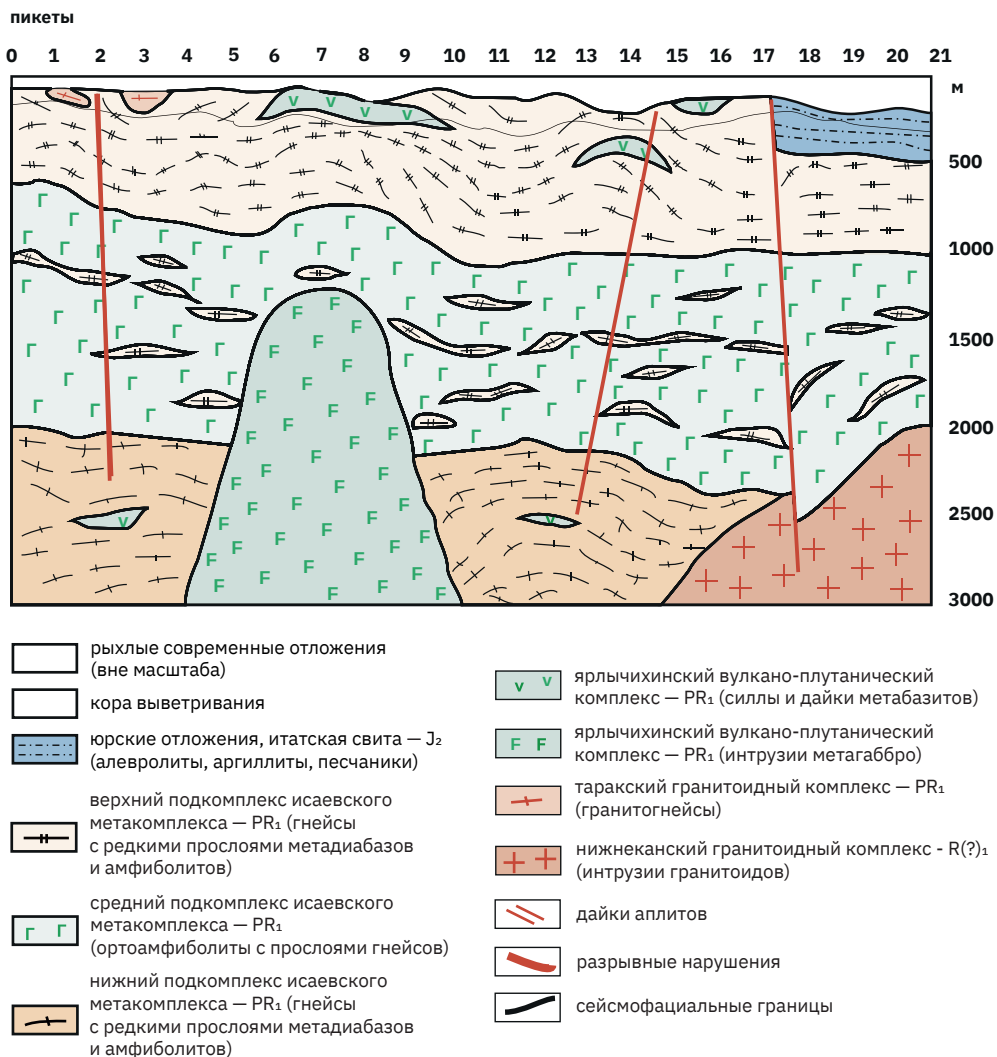


Рис. 4.17. Профиль 4. Глубинный разрез с сейсмическими границами [а, г]

Геологическое строение участка Енисейский

Результаты приведенных исследований нашли свое отражение в предварительной геологической карте дочетвертичных образований участка, составленной в 2004 г. (рис. 4.18). Согласно имевшимся и вновь полученным данным, в геологическом строении участка Енисейский принимают участие кристаллические породы исаевского метаконплекса раннепротерозойского возраста (PR₁is), содержащие разновозрастные тела метагбброидов ярлычихинского вулcano-плутанического комплекса (vPR₁jr) и гранит-мigmatитов таракского комплекса (γPR₁t). В крайней юго- и северо-восточной частях территории участка метаморфические породы прорваны гранитами нижнеканского комплекса (γR?nk) [с].

Породы исаевского метаконплекса представлены переслаивающимися плагиогнейсами и биотитовыми гнейсами, с согласными телами амфиболитов.

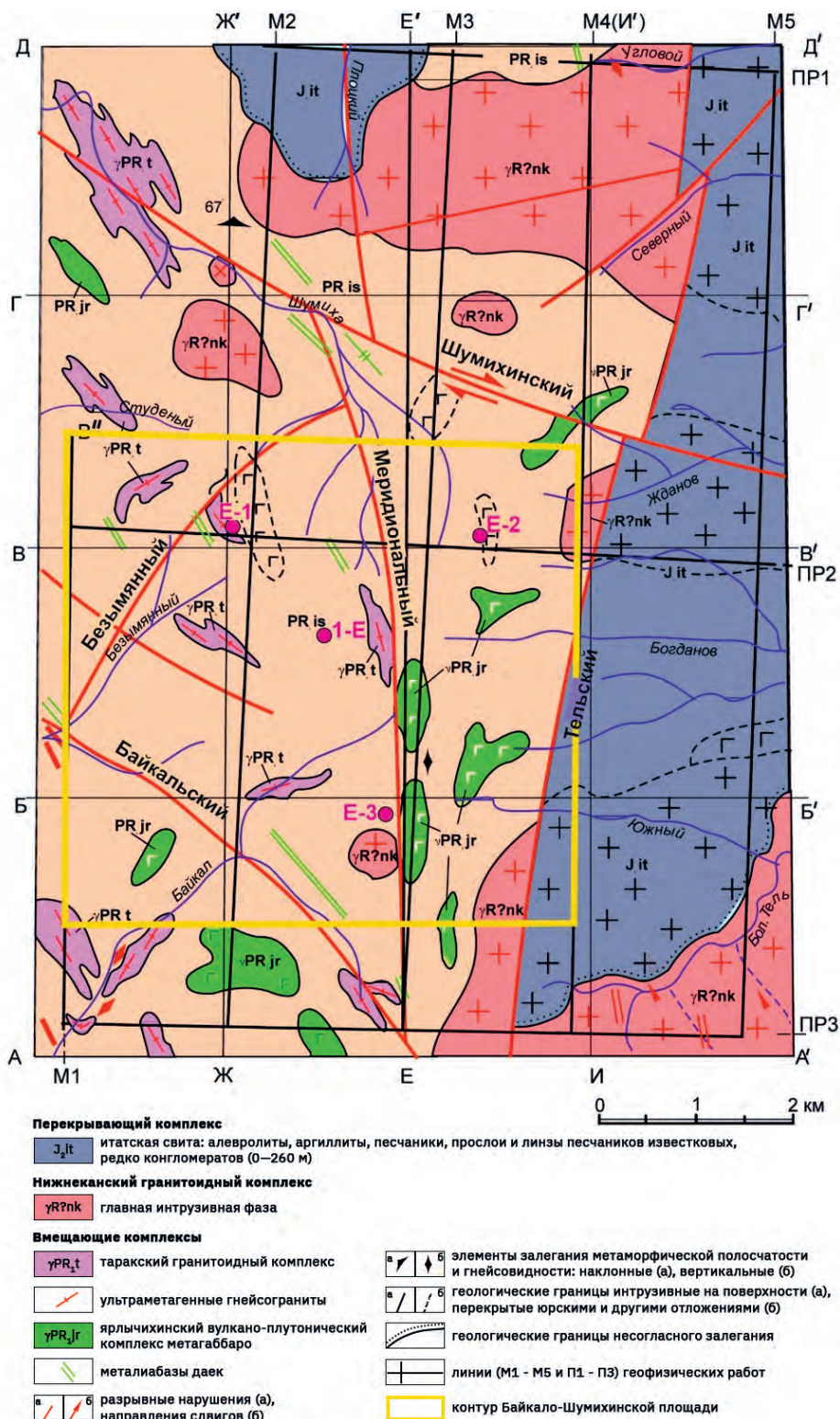


Рис. 4.18. Предварительная геологическая карта дочетвертичных образований участка Енисейский [с]

Нижнеканский интрузивный комплекс на территории участка Енисейский образует несколько интрузивных тел, которые, предположительно, являются апофизами основного массива. Представлены они лейкократовыми и биотитовыми гнищами, частично перекрытыми юрскими отложениями. Одно из них в бассейне реки Большая Тель было изучено по выходам коренных пород и делювиальным развалам гранитов на площади около 8 км². Другая интрузия была установлена по геофизическим данным в северной части участка Енисейский, где плохая обнаженность территории позволила обнаружить в долине ручья Угловой лишь единичные обломки этих пород. Третье интрузивное тело выделяется в основном по данным магнитометрии и гравиметрии в районе ручья Жданов, где его площадь с учетом погребенной под юрскими отложениями части может составлять 2 км² и более.

В восточной части участка развиты отложения итатской свиты средней юры (J₂it), представленные алевритами, аргиллитами, песчаниками, реже — конгломератами и гравелитами, которые трансгрессивно перекрывают метаморфические и интрузивные толщи (Тельская депрессия). Глубина залегания их кровли колеблется от 0,5 до 20,0 м, мощность отложений достигает 250—300 м. Осадочные породы юрского возраста установлены также в северной части участка, в бассейне ручья Плоский.

Плиоцен-нижнечетвертичные аллювиально-делювиальные отложения (ad N₂—Q₁) залегают на осадочных толщах среднеюрского возраста и развиты преимущественно в северной части участка. Литологический состав их достаточно пестрый: в основании — галечниковый грунт с супесчано-песчаным заполнителем и прослоями буровато-коричневых суглинков, мощностью от нескольких сантиметров до 6,5 м. На более возвышенных участках галечниковые отложения отсутствуют или замещены разнотернистыми песками. Выше по разрезу, вплоть до почвенно-растительного слоя, залегают ожелезненные суглинки с прослойками супеси и редкими включениями гравия и гальки. Мощность плиоцен-нижнечетвертичных отложений изменяется от нескольких сантиметров до 20 м.

Докембрийские толщи и осадочные образования юрского возраста почти повсеместно перекрыты современными и верхнечетвертичными отложениями.

В юго-западной части участка Енисейский в разрезе исаевского метаморфического комплекса могут находиться интрузивные породы с плотностью (2,9—3,1 г/см³), вероятно, основного состава (типа габбро), мощностью до 1 км и более (Байкальский массив).

В структуре участка Енисейский выделены два макроблока — западный и восточный, различающиеся как по структурным, так и по петрофизическим характеристикам. Граница разделов макроблоков в южной и центральной частях участка прослеживается вдоль магистрального профиля М-3 и контролируется Меридиональным разломом. Макроблоки разделены субмеридиональной зоной высоких горизонтальных градиентов гравитационного поля, представляющей собой переходную шовную зону, ограниченную Меридиональным и Тельским разломами. Физические свойства коренных пород шовной зоны отличаются низкими значениями скорости продольных сейсмических волн ($V_{гр.} = 4000—5000$ км/с на глубинах до 70 м), пониженными сопротивлениями (300—500 Ом·м на глубинах 300—1000 м и 500—1000 Ом·м на глубинах свыше 1000 м). Кроме того, эта зона характеризуется пониженными значениями плотности пород, выражаемыми отрицательным полем гравиметрических аномалий. В аномальном магнитном поле зона сочленения блоков выражена положительными изодинами (T_a), отображающими локальные формы интрузивных тел преимущественно основного состава, которые являются индикаторами проницаемых разрывных зон.

Таким образом, на исследуемой территории наиболее существенными структурами, потенциально рассматриваемыми в качестве дизъюнктивных, являются Тельский, Меридиональный, Шумихинский и Байкальский разломы. С разной степенью достоверности был выделен еще ряд различно ориентированных менее значительных тектонических нарушений, например, Безымянный, определяющих внутриблоковое строение территории. Линеаменты более высоких порядков, достаточно широко развитые на территории, только частично находят подтверждение в результатах электроразведочных и других геофизических работ. По данным АМТЗ, основные разломы прослеживаются на глубинах от 300 до 2000 м. Эти разрывные нарушения выделяются удельными сопротивлениями 300—500 Ом·м. Байкальский разлом выделяется менее уверенно, на глубоких срезах нередко отдельными фрагментами, что можно объяснить его залеченностью.

Геологическое строение Байкало-Шумихинской площади

Большей детальностью изученности характеризуется Байкало-Шумихинская площадь, которая была выделена в 2002 г. в юго-западной части участка Енисейский.

К 2006 г. материалы всех выполненных исследований были обработаны, что позволило уточнить информацию о тектонических особенностях, составе и взаимоотношениях структурно-вещественных комплексов пород, принимающих участие в строении Байкало-Шумихинской площади [с]. Представления того времени о геологии Байкало-Шумихинской площади нашли отражение на геологической карте дочетвертичных образований (см. рис. 4.18), картах-срезах на глубинах 300—500 м и 800—1000 м (рис. 4.19, 4.20) и геолого-геофизических разрезах по профилям и магистралям [с].

На геологической карте среза 300—500 м площади развития интрузивных тел основного состава составляют 0,8 км² в южной части магистрали М-2, 3,2 км² — в центре Байкало-Шумихинской площади и более 4 км² в ее северо-западной части (см. рис. 4.19). На геологической карте среза 800—1000 м интрузия занимает практически всю западную половину Байкало-Шумихинской площади (см. рис. 4.20), а на срезе 1940 м размеры интрузивного тела увеличиваются и, имея дугообразную форму, интрузия прослеживается до М-3. Контакт интрузии с вмещающими породами довольно сложный, особенно в ее северной и южной части, только на северо-востоке от отметок 800 м до 1940 м поверхность интрузии погружается в восточном и северо-восточном направлении под углом 25—30°. С учетом характера распределения глубинных аномалий $\Delta(\Delta g)h$ и снижения их интенсивности с запада на восток можно предположить, что мощность интрузии (или «единого массива интрузивных тел») убывает от магистрали М-1, где она составляет 1,5 — 2,0 км и полностью выклинивается в районе М-4.

Положение экстремумов глубинных аномалий силы тяжести, прослеженных на глубинах около 2,0 км, очевидно, свидетельствуют о том, что подстилающий интрузию комплекс пород сложен преимущественно метаморфизованными породами основного состава, залегающих в форме покровов, потоков и пронизывающих их интрузивных образований кислого состава (рис. 4.21).

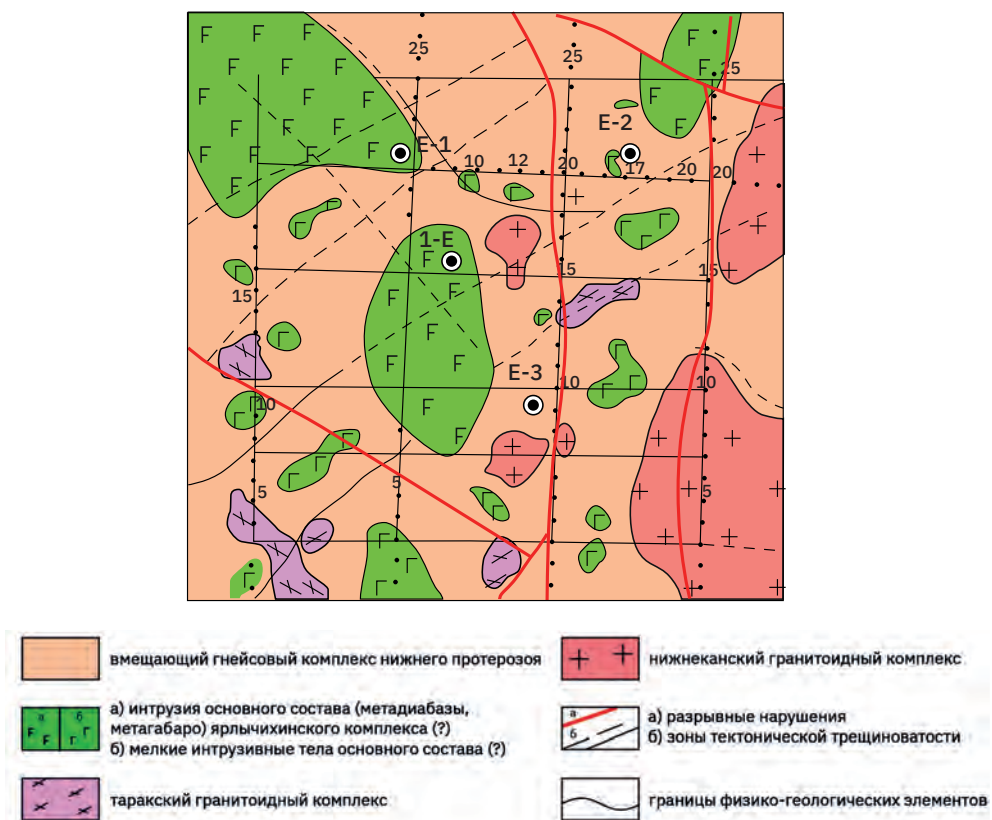


Рис. 4.19. Геологическая карта на срезе глубин 300–500 м

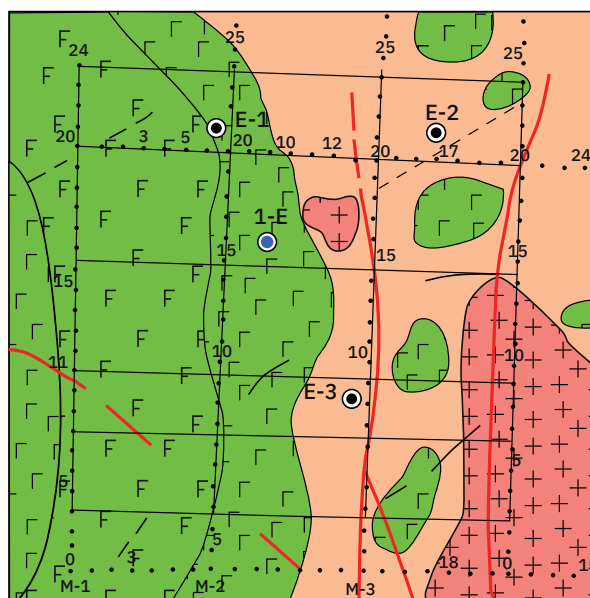


Рис. 4.20. Геологическая карта на срезе глубин 800–1000 м
Условные обозначения: см. рис. 4.19

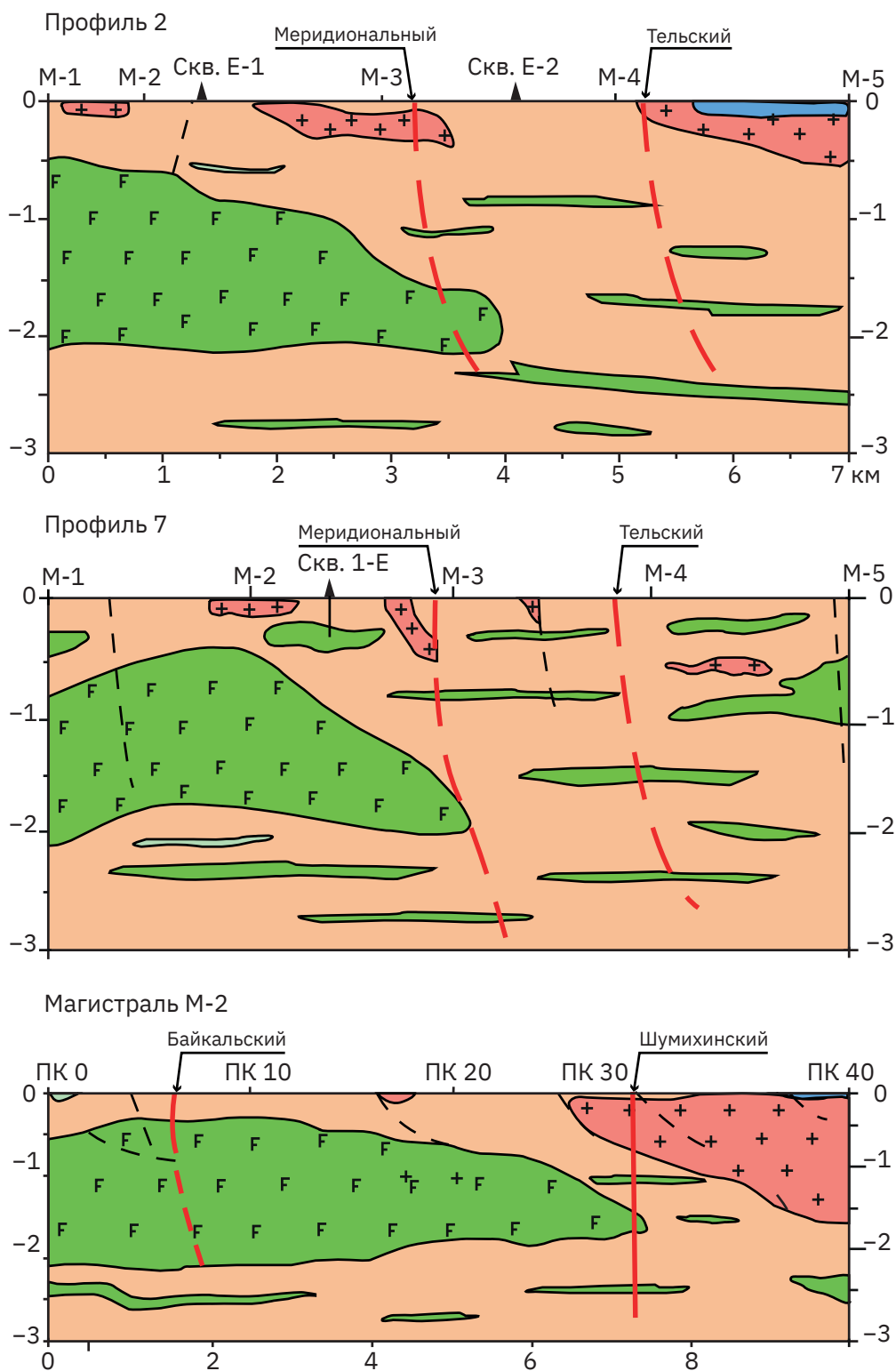


Рис. 4.21. Схематические геолого-геофизические разрезы к участку Енисейский [с]
Условные обозначения: см. рис. 4.19

4.3.3. Гидрогеологические условия

Проведенные **гидрологические и метеорологические исследования** позволили установить, что речная сеть на исследуемой территории имеет преимущественно подземное питание, механизм формирования уровней (расходов) поверхностных водотоков — гидравлический, что подтверждается разными фактами. Формирование химического состава приповерхностных подземных вод происходит в условиях инфильтрационного режима, тесно связанного с рельефом местности [25] [q].

Исследования показали, что подземные воды участка Енисейский представляют собой единую гидравлическую систему, питание которой осуществляется за счет атмосферных осадков, а режим зависит от метеорологических и климатических факторов [с].

Гидрогеологические, гидрогеохимические и геохимические исследования показали, что в пределах участка Енисейский доминирует инфильтрационный тип водообмена. По данным геохимических исследований, восходящих источников с хлоридным типом вод и других признаков разгрузки подземных вод из глубоких горизонтов обнаружено не было. Наблюдаемые концентрации водорастворенного и свободного гелия в почвенном слое не только не превышают атмосферного фона, но и в большинстве случаев, особенно в водораздельной зоне, ниже их.

Совместная интерпретация результатов эманационной съемки, линеаментов и геофизических исследований (ВЭЗ, АМТЗ), позволила выделить в северной части участка Енисейский зоны повышенной трещиноватости (рис. 4.22)

На рис. 4.23 показано изменение химического состава грунтовых вод на участке. Характер плановой изменчивости значений общей минерализации, ионов хлора, натрия и других ионно-солевых компонентов. Они свидетельствуют о том, что в пределах изученной гидродинамической структуры участка Енисейский отсутствует отчетливая связь приповерхностных подземных вод с предполагаемыми тектоническими нарушениями (линеаментами). Равномерный по площади отбор проб вод, включая места, где нарушения уверенно выделяются при дешифрировании, и их анализ позволяет констатировать, что в этих зонах значимый поток глубинного гелия не проявляется, то есть зоны в тектоническом отношении слабоактивны, их проницаемость низкая [r].

Результаты натурных гидрогеохимических наблюдений совместно с балансовыми оценками стока (рис. 4.23, е) подводят к очень важному гидрогеологическому выводу, имеющему прямое отношение к безопасности захоронения: нисходящее движение подземных вод доминирует не только на водоразделах, но также и в долине р. Шумихи и в долине Черского. То есть изменчивость состава подземных вод, показанная на рис. 4.23, не имеет глубоких корней, а касается только приповерхностных циклов инфильтрационного облака.

В верхней части разреза участка развиты пресные слабощелочные гидрокарбонатные воды. Их химический состав формируется в результате взаимодействия инфильтрующихся атмосферных осадков с почво-грунтами и горными породами, что проявляется в увеличении электропроводности, общей минерализации подземных вод, pH и температуры, в повышенном содержании основных ионно-солевых компонентов и гелия, наблюдаемых от водоразделов к долинам. В этом же направлении снижается содержание кислорода, свободной уголекислоты и величины окислительно-восстановительного потенциала (Eh).

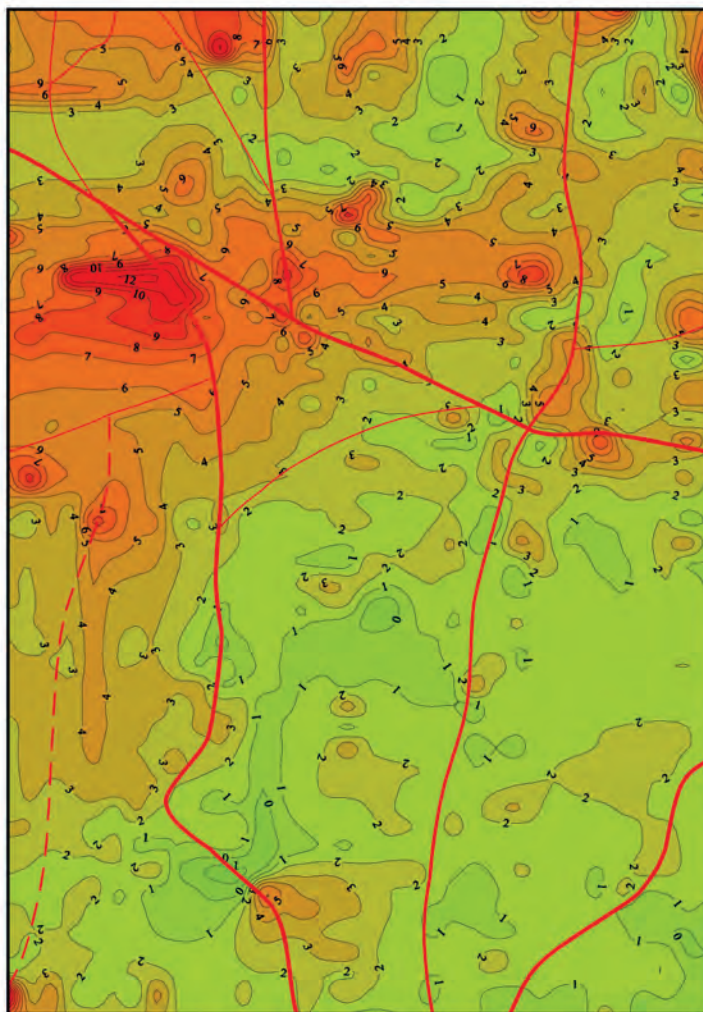


Рис. 4.22. Схема распределения радона на участке Енисейский [р]
Масштаб съемки 1:50 000. Значения изолиний $n \times 10^3$ Бк/м³. Красные линии — предполагаемые тектонические нарушения

Подземные воды терригенных отложений итатской свиты (J_{2it}), распространенные в крайней восточной части участка, характеризуются повышенным содержанием водорастворенного органического вещества, CO_2 и пониженными значениями Eh.

Наиболее активно водообмен происходит в верхних частях разреза: в осадочных отложениях, коре выветривания и зоне экзогенной трещиноватости метаморфических и интрузивных пород. Мощность зоны активного водообмена колеблется по данным бурения скважин от 29,7 до 60,0 м. О затрудненном характере водообмена на большей глубине свидетельствуют низкие концентрации трития в нижних частях разреза картировочных скважин.

Вертикальная гидрохимическая зональность на участке Енисейский изучена до глубины 600 м. В разрезах опробованных скважин отмечается заметная изменчивость с глубиной минерализации и химического состава подземных вод, что в определенной степени может быть связано с составом водовмещающих пород.

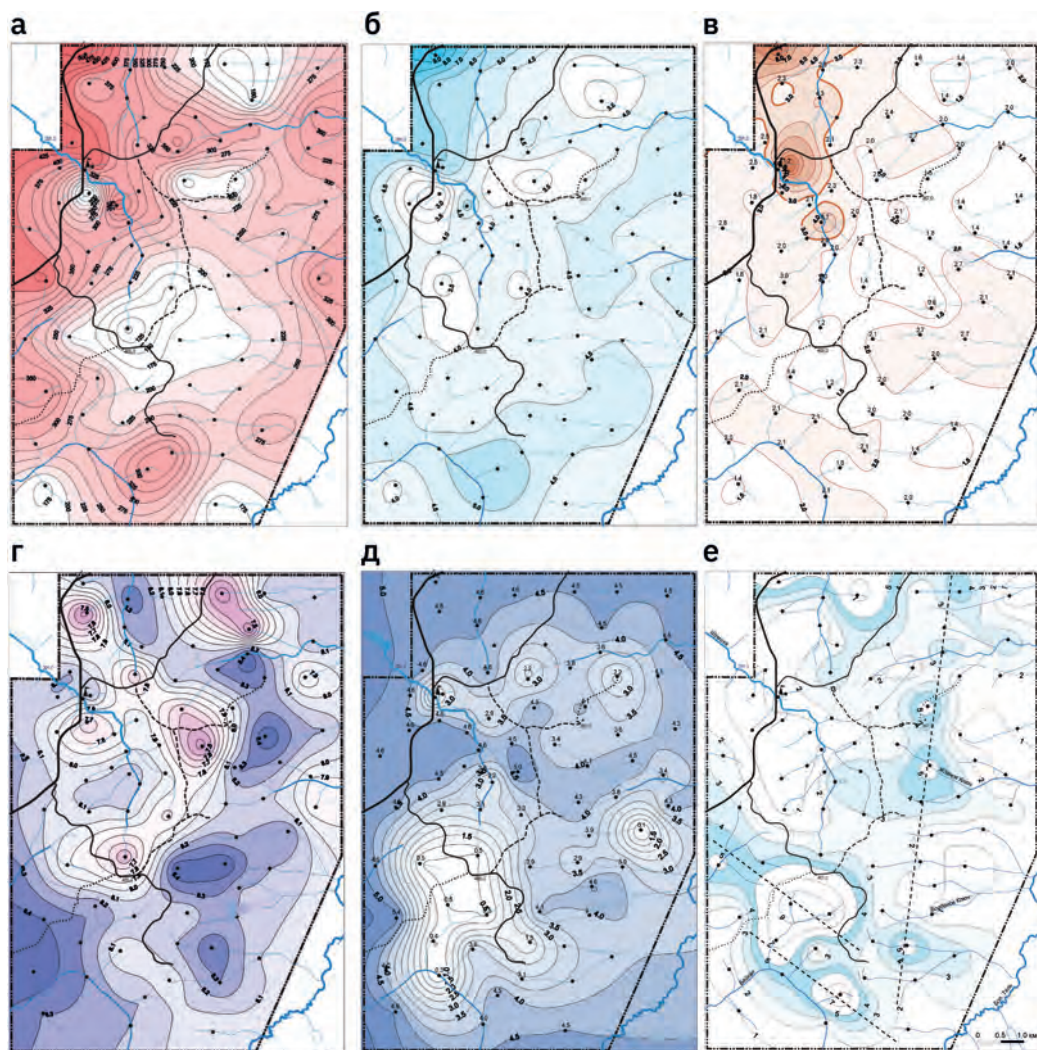


Рис. 4.23. Изменения химического состава грунтовых вод, наблюдаемые в зонах предполагаемых тектонических нарушений [q]

а — общая минерализация, мг/л; б — Na^+ , мг/л; в — Cl^- , мг/л; г — pH; д — He , $\text{н} \cdot 10^{-6}$ -об; е — удельный расход водотока, л/(с·км)

Наибольшую минерализацию (532 мг/дм^3) имеют воды метадиабазов, выветрелых трещиноватых и трещиноватых плагиогнейсов и биотитовых гнейсов в интервале 14,85–50,0 м в скв. Е-3, однако в интервале 50–100 м ее значение заметно уменьшается (до 385 мг/дм^3). В скважинах Е-1 и Е-2 с глубиной происходит слабое увеличение минерализации соответственно до 454–465 и 451–457 мг/дм^3 .

Проведенные опытно-фильтрационные работы в скважинах участка Енисейский [d] показывают, что коры выветривания и нижележащие зоны повышенной трещиноватости на глубинах до 60 м отличаются крайне низкой проницаемостью. Коэффициенты фильтрации ($K_{\text{ф}}$) в них изменяются от 0,007 м/сут на глубинах до 50 м, до 0,00035 м/сут — до 400 м и 0,000011 м/сут — до 600 м.

С увеличением глубины в разрезе участка открытая трещиноватость уменьшается, большинство трещин залечено вторичными минералами. По данным геофизического каротажа в разведочной скважине 1-Е, зоны повышенной трещиноватости мощностью более 10 м установлены в интервалах 108—120 м, 152—165 м, 183—195 м.

Анализ результатов изотопных исследований в совокупности с гидрогеологическими данными свидетельствуют о низкой водообильности и проницаемости скальных пород участка Енисейский, слабой гидравлической связи между водоносными зонами, весьма продолжительных периодах водообмена на глубинах более 100 м и быстром затухании с глубиной влияния современных инфильтрационных вод. Так, по данным ВСЕГИНГЕО (Поляков В. А., Соколовский Л. Г.) и лаборатории эволюционной географии и геохронологии НИИ Географии Санкт-Петербургского государственного университета (Арсланов Х. А.), анализ подземных вод показал, что в интервале глубин 14,9—66,0 м (скв. Е-1, Е-2) скорость водообмена колеблется от 70 до 120 лет, а на глубинах от 41 до 100,0 м — более 500 лет [25]. В скважине Е-3 скорость водообмена в интервале глубин от 50,0 до 100,0 м превышает 1000 лет.

- *Геолого-геофизические и гидрогеологические исследования 2002—2004 гг. позволили изучить основные черты геологического строения и гидрогеологических условий участка Енисейский.*
- *На основе результатов геолого-геофизических и гидрогеологических работ выделена и более детально изучена перспективная Байкало-Шумихинская площадь размером 4 × 5 км. В ее пределах геофизическими методами, заверенными бурением трех скважин глубиной 100 м и одной до 600 м, была выявлена геологическая формация, которая удовлетворяла действующим на тот момент нормативным требованиям к физико-механическим, фильтрационным и другим свойствам вмещающих пород и гидрогеохимическим свойствам подземных вод. По данным бурения и скважинным гидрогеологическим исследованиям до глубины 600 м перспективный блок на потенциальной глубине размещения объекта сложен слаботрещинноватыми гнейсами, в которых зоны повышенной трещиноватости занимают ограниченные интервалы. Гнейсы, отнесенные к породам исаевского метакомплекса, обладают низкими фильтрационными свойствами (коэффициенты фильтрации составляют на глубинах 50 м — 0,007 м/сут, 400 м — 0,00035 м/сут, 600 м — 0,000011 м/сут).*
- *Гидрохимические и изотопные исследования поверхностных и подземных вод свидетельствуют о доминирующем нисходящем потоке фильтрации, незначительных ресурсах трещинно-жильных вод и продолжительном периоде водообмена. На глубине до 100 м — 500 лет (Е-1), до 300 м — 1000 лет (Е-3).*
- *Потенциально пригодная для изоляции высокоактивных отходов формация слагает блок размером 4 × 5 км. По геофизическим данным этот блок оконтурен или пересекается локальными разрывными нарушениями. Линеаменты в перспективном блоке, за исключением Байкальского и Меридионального, подтвержденных комплексом геофизических данных, носят предположительный характер и рассматриваются как внутриблоковые.*
- *Дальнейшие геологические работы на участке, которые были ориентированы на проектирование и размещение ПИЛ в составе ПГЗРО, будут рассмотрены в гл. 5.*

4.4. Результаты исследований в подземном комплексе ГХК

Комплекс подземных сооружений ГХК по степени техногенного воздействия на вмещающий массив представляет собой уникальный аналог будущего объекта захоронения тепловыделяющих радиоактивных отходов в скальных породах.

Подземные сооружения ГХК в виде горных выработок различных конструкций и размеров были созданы в скальных породах более 70 лет назад. При строительстве подземного комплекса были собраны обширные данные, характеризующие геологическое строение массива пород, а в дальнейшем выполнены многочисленные исследования и эксперименты, связанные с изменениями в геомеханических, гидрогеологических, геохимических процессах в породах под воздействием техногенных нагрузок.

Воздействие мощных источников тепла — реакторных установок — оказало значительное техногенное воздействие на динамику развития физических процессов во вмещающем скальном массиве.

4.4.1. Общая характеристика геологических условий

Геологические условия скального массива, вмещающего выработки, в целом соответствуют условиям верхней части геологического разреза участка Енисейский.

Основные горные породы массива — серые и темно-серые биотит-плагиоклазовые гнейсы допалеозойского возраста (85—90 %). Реже встречаются гнейсы почти черные с повышенным содержанием биотита (3—5 %), роговообманковые (3—5 %) на контактах с дайками амфиболитов и метадиабазов, а также розовые на контактах с пегматитовыми жилами (1 %) и др. [s].

Интрузивные образования отмечаются в виде даек диабазов, амфиболитов и порфиритов, иногда значительной протяженности (десятки и сотни метров) и мощности (15—20 м), однако чаще их мощность составляет 0,8—1,5 м. Преимущественное простирание даек меридиональное, а падение на восток — под углами 60—80°.

Элементами структурного строения гнейсового массива являются трещины, зоны тектонических нарушений, а также контакты петрографических разностей пород, с заполнителями, представленными карбонатным и кремнистым цементом, глинистым материалом и хлоритом. Нередко по ним наблюдаются вертикальные и горизонтальные зеркала скольжения.

Для горного массива характерна неравномерная тектоническая нарушенность, которая считается результатом нескольких фаз активизации тектонических процессов. Следствием последней стало общее поднятие массива до современного уровня в рельефе.

На глубину 10—15 м породы сильно выветрены до рыхлой дресвяно-щебнистой массы, которая считается мезозойской корой выветривания. Ниже, до глубины 60—70 м, за счет экзогенных процессов порода разбита сетью трещин до глыбово-щебнистого состояния. Ниже 70 м следы физического выветривания не выявлены.

Трещинно-грунтовые воды развиты в зоне поверхностного выветривания пород массива, их уровень располагается на глубине порядка 15 м.

Общая водопроницаемость массива слабая, коэффициенты фильтрации по данным расходомерии в целом меньше 0,1 м/сут, что обусловлено чередованием достаточно крупных практически водонепроницаемых блоков и проницаемых межблоковых тектонических нарушений, по которым отмечены отдельные более высокие значения коэффициента фильтрации, до 0,4–0,7 м/сут, в том числе выявленные зоны дробления и расланцевания.

4.4.2. Направления и задачи исследований

В течение последних десятилетий в целях обеспечения безопасного функционирования подземного комплекса проводились исследования параметров различных физических процессов в массиве горных пород, зоне техногенной трещиноватости и крепи выработок, изучались устойчивость, а также фильтрационные и миграционные характеристики массива.

Проводившийся комплекс исследований был направлен на создание информационно-основы для оценки изоляционных свойств скальных пород массива в условиях длительного воздействия источников тепла больших размеров [т]. Методология исследований включала:

- сбор, обработку и анализ данных, полученных в результате многолетних натурных измерений и лабораторных исследований параметров состояния скального массива подземного комплекса ГХК по разделам: геомеханика, гидрогеология, геохимия, теплофизика, и сравнение их с результатами современных измерений;
- представление результатов замеров по приведенным разделам как функции места и времени для анализа динамики изменения этих параметров под воздействием природных и техногенных факторов;
- графическую увязку геологических условий мест выполнения измерений и значений полученных параметров физических процессов между собой и со схемой расположения зон структурных неоднородностей массива горных пород.

Основным объектом исследований являлись участки массива, вмещающего выработки с мощными источниками теплового воздействия (объекты Р, рис. 4.24) и подверженные таким образом тепловому воздействию. Для сравнения результатов измерений с аналогичными в условиях отсутствия техногенных нагрузок проведены наблюдения за этими же процессами в породах, вмещающих выработки без теплового воздействия (объекты Б). Эти выработки были построены в 1960-х гг., но до времени выполнения исследований не использовались для тепловыделяющих производств. Параметры выработок и характеристики вмещающих горных пород в целом аналогичны.

4.4.3. Обзор результатов исследований

№ 1. Эксперименты по изучению теплофизических процессов во вмещающем массиве

Для оценки степени теплового воздействия на массив, вмещающий выработки, начиная с 1972 г. проводился комплекс температурных измерений внутри выработок и во вмещающих породах — в скважинах на различной глубине от стен выработок. Проведенные теплофизические исследования в более чем 125 скважинах позволили оценить размеры теплового поля, образованного длительным техногенным воздействием, а также произвести на этой основе анализ результатов замеров параметров гидрогеологических, геомеханических и других процессов в местах массива с различным уровнем теплового воздействия [26] [v, w].

Расположение измерительных скважин в массиве пород, вмещающем тепловыделяющее оборудование, и соответствующие планы изотерм температурных полей для отдельных целиков представлены на рис. 4.25 и 4.26. Результаты этих измерений позволили определить значения коэффициента теплопроводности массива пород в натурных условиях. С учетом результатов лабораторных исследований — определения удельной теплоемкости и объемного веса пород — был получен полный комплекс тепловых характеристик: коэффициента теплопроводности, коэффициента линейного теплового расширения гнейсов и диабазов. Особенностью этих данных является то, что они получены применительно к условиям разогретых пород.

Кроме того, измерения температуры подземных вод в различных точках массива позволили дополнить результаты оценок влияния источников тепла, установленных в выработках, на тепловой режим подземных вод и степень теплового техногенного воздействия объектов на массив горных пород, удаленный от выработок. Результаты замеров показали, что изменение температурного режима массива неравномерно в плане и по разрезу. Вертикальная мощность зоны с температурой выше фоновой достигает 70 м от кровли выработок.

№ 2. Эксперименты по исследованию геомеханических процессов в различных температурных условиях

Для изучения и оценки изменения геомеханических процессов в скальных массивах в условиях тепловых нагрузок по сравнению с массивами без такого воздействия в ближних зонах подземных сооружений осуществлялись инструментальные измерения следующих параметров [s, u, v]:

- линейных габаритов камер;
- микросдвижений и деформаций наклона стен камер по обратным отвесам и микро nivelированию;
- деформаций в глубине межкамерных целиков;
- напряжений в породах межкамерных целиков.

Геомеханическая система мониторинга в районе этих камер была организована в 1965 г. и включала около 800 измерительных установок и 100 скважин с датчиками. Принципиальная схема организации системы мониторинга показана на рис. 4.27.

Эксперимент № 2.1. Конвергенция стен горных выработок в различных температурных условиях

Параметр сближения стен подземных выработок отражает интегральное воздействие на вмещающий породный массив всех технологических процессов в камере и природных изменений его напряженно-деформированного состояния.

Анализ полученных абсолютных величин сдвижения обделки внутрь камер, а следовательно, и смещений породного массива, показал, что перемещения происходят неравномерно в разных точках измерений. Так по различным измерительным створам в камере Р-2 конвергенция стен составила 21,5; 18,4; 18,3; 16,9 мм. В камере Р-4 максимальное сближение в два раза ниже, чем в камере Р-2, и составляет 10,9 мм. В камере Б-4 максимальное сближение стен за весь период наблюдений составило [t] 1,55 мм.

Сравнительный анализ горно-технических условий всех контролируемых камер, величин конвергенции их стен и температурных условий показал, что существенная доля прироста деформаций обделок связана с неблагоприятными горно-техническими и инженерно-геологическими условиями, к которым были отнесены высокая тектоническая нарушенность породного массива и, соответственно, слабые прочностные свойства пород. Существенную роль при этом играют крупные тектонические зоны дробления и расщелачивания.

Помимо неблагоприятных горно-геологических условий, еще более существенным фактором, влияющим на развитие геомеханических процессов, является наличие теплового воздействия. Если учитывать, что в камерах Р-2 и Р-4 находятся примерно равные тепловые источники и их воздействие на вмещающий массив можно условно принять одинаковым, то зафиксированные величины деформаций по отношению к выработкам без теплового воздействия возрастают на порядок. Кроме постоянного медленного крипа пород на таких участках и сдвижения стен внутрь камеры со скоростью 0,3–0,5 мм/год, отмечаются циклические изменения интенсивности деформаций стен и пород междукammerного целика, порой превышающих 1,0–1,5 мм/год, что также связано с присутствием тектонических зон дробления и расщелачивания [26] [w].

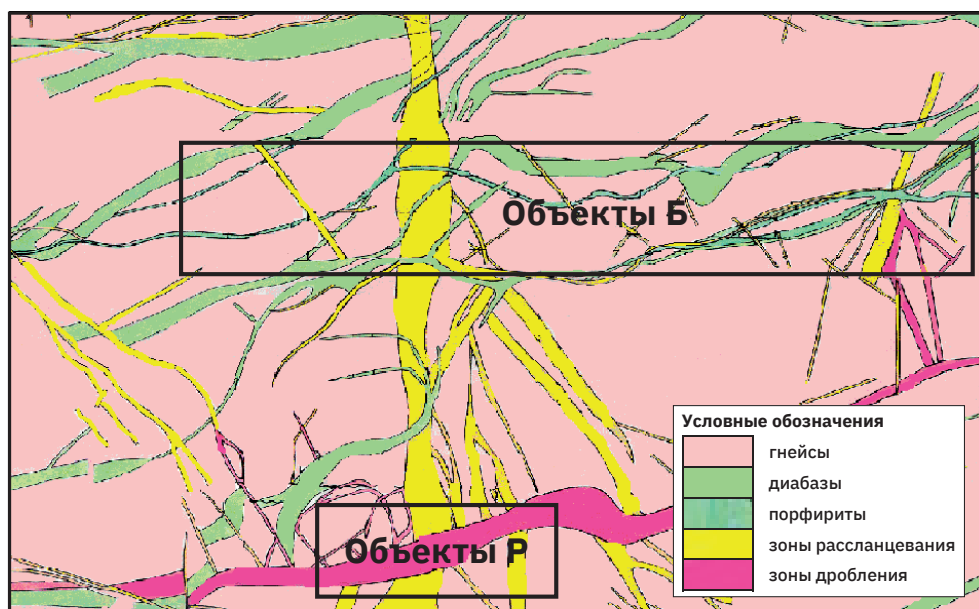


Рис. 4.24. План-схема структурной нарушенности массива горных пород на уровне подземных сооружений (масштаб 1:2 000) [u]

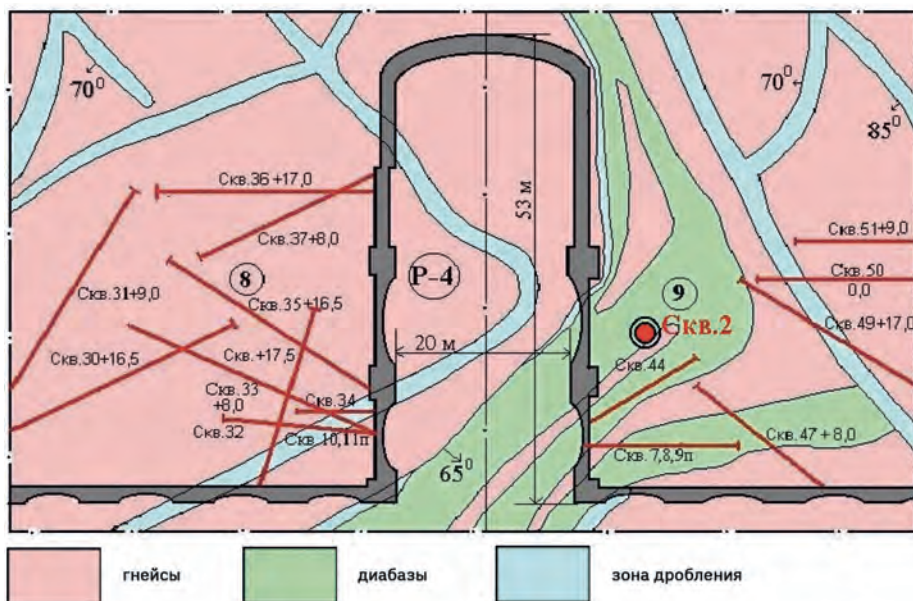


Рис. 4.25. Участок исследований [27]

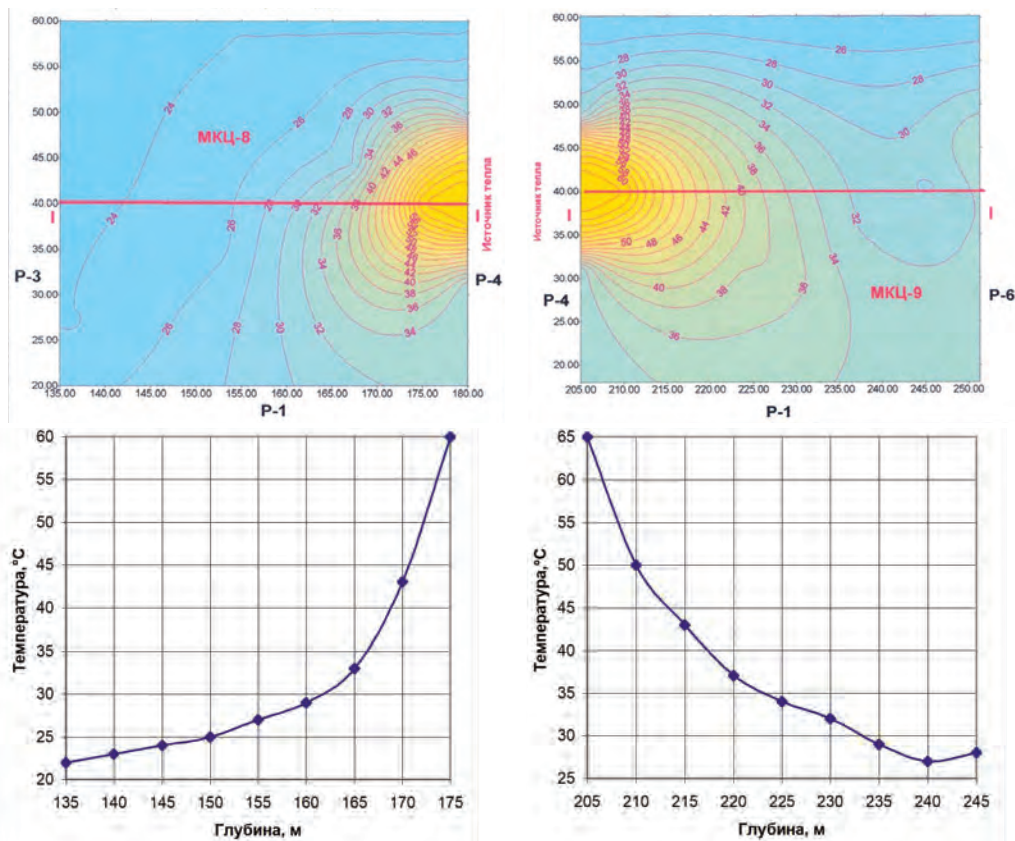


Рис. 4.26. Распределение тепловых полей в межкамерных целиках выработки P-4 [27]

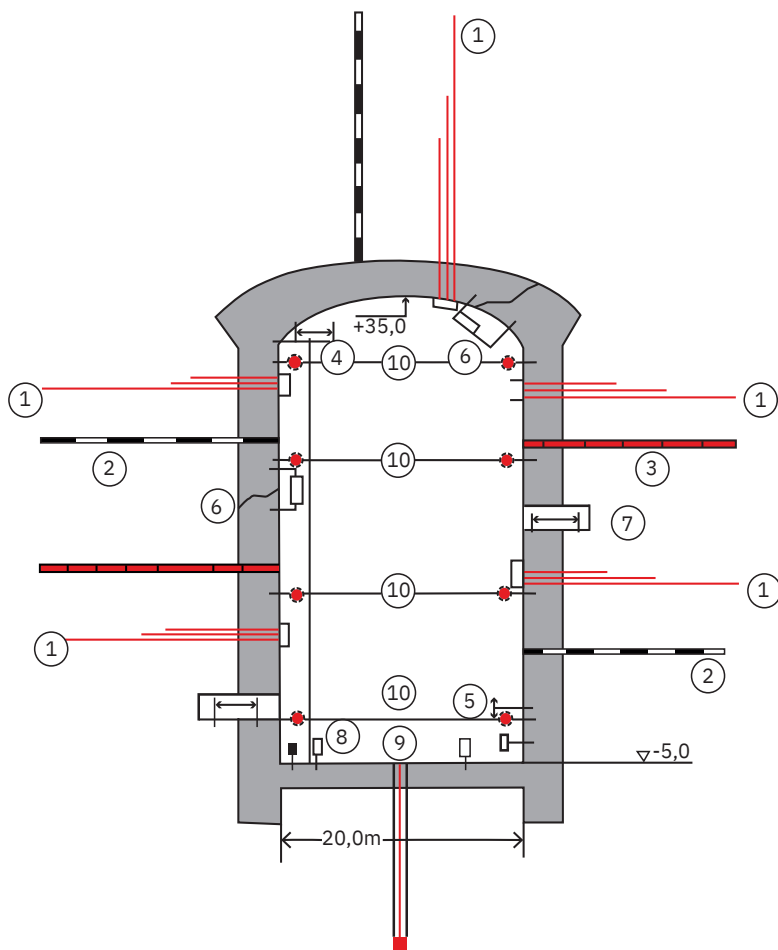


Рис. 4.27. Состав системы контроля геометрических параметров массива и железобетонных конструкций [т]

1 — экстензометры; 2 — термоизмерения; 3 — ультразвуковой каротаж, акустическая эмиссия, удельное водопоглощение; 4 — обратные отвесы; 5 — наклонометрия (микронивелирование); 6 — раскрытие трещин; 7 — контакт массив—обделка; 8 — прецизионное нивелирование; 9 — планово-высотные измерения; 10 — конвергенция стен

Таким образом, по результатам анализа выполненных измерений было установлено, что скорость развития деформационных процессов в условиях тепловых воздействий для практически однородного массива увеличивается в 7,3 раза; в условиях совместного влияния тепла и неблагоприятных геологических условий — в 14 раз (рис. 4.28).

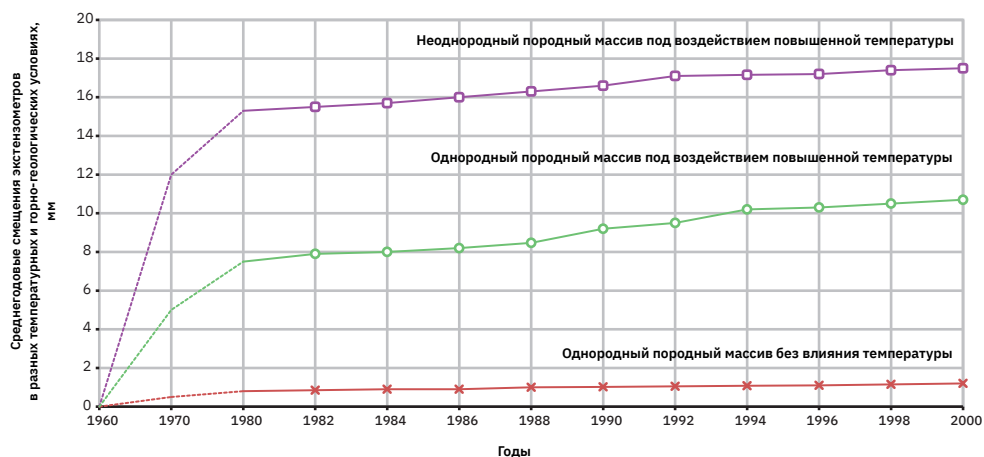


Рис. 4.28. Графики смещения контура выработок [t] в различных горно-геологических и температурных условиях за период 1980–2000 гг.

Эксперимент № 2.2. Деформационные процессы в массиве горных пород

Оценка особенностей деформационных процессов в массиве производилась на основе определений среднегодовых значений смещений скважинных экстензометров, выполненных в период с 1975 по 2005 г. Принцип измерения заключается в одновременной регистрации деформаций пород, расположенных на различном удалении от контура выработки с использованием механических многореperных систем в горизонтальных скважинах.

Выполненные таким образом инструментальные измерения позволяют вести наблюдения за характером смещения, расслоения и деформирования массива горных пород в приконтурной зоне горной выработки, за динамикой деформирования пород в зонах опорного давления и в зонах разгрузки.

В результате данных исследований установлено влияние тепловых нагрузок на деформационные процессы в приконтурной зоне. Зафиксированные величины смещений экстензометров внутри массива на глубине от 2,5 до 30,0 м от стенки выработки показали возникновение зон разуплотнения на различных участках массива. Так, в условиях нагрева суммарная пустотность составила 3,0–4,0 мм в зонах тектонических нарушений, тогда как без нагрева значения находятся в диапазоне 0,1–0,6 мм [t].

Эксперимент № 2.3. Измерение напряжений в междукammerных целиках

Для уточнения механизмов развития процессов деформирования и эволюции массива горных пород дополнительно выполнялись инструментальные измерения компонент поля напряжений в породах междукammerных целиков [v].

Измерения напряжений проводились методом разгрузки при сооружении выработок. Результаты измерений показали, что характер распределения поля напряжений крайне неравномерный и обусловлен степенью нарушенности пород и связанными с этим упругими свойствами и несущей способностью породного массива.

В целике, сложенном монолитными породами, непосредственно в ближней зоне выработки напряжения составили 1,0–5,0 МПа, что соответствует несущей способности сильно нарушенных пород. С переходом в монолитную часть целика напряжения повышаются до 11,0–15,0 МПа. Для зон расланцевания средние значения напряжений заключены в интервале 3,5–7,0 МПа. Из этого следует, что нагрузку вышележащей толщи несут породы относительно монолитных участков.

С целью количественной оценки динамики изменения напряженного состояния скальных пород спустя 40–50 лет (период эксплуатации подземных сооружений) были выполнены повторные измерения действующих напряжений в целиках между камерами Б-3 и Б-4 и Р-2 и Р-3. Результаты измерений показали прирост вертикальных напряжений на 7 % в выработках без техногенного воздействия и на 14 % в выработках, испытывающих тепловые нагрузки.

Эксплуатация камер приводит к перестройке структуры полей напряжений массива горных пород, уменьшению напряжений на тектонически нарушенных участках приблизительно в два раза и их перераспределению на более прочные соседние части массива, где напряжения в среднем увеличились в 2–3 раза, достигая 15–25 МПа.

Результаты позволили уточнить особенности развития деформационных процессов в межкамерных целиках. Так, породы I, II и III категорий нарушенности, как правило, работают в упругой стадии с большим запасом несущей способности. Менее жесткие породы (категории IV и V) деформируются с большей скоростью за счет взаимного перемещения структурных блоков по плоскостям ослабления. Как правило, эти породы в междуканальных целиках работают в запредельном состоянии. В приконтурных зонах в этих породах происходит возникновение зон разуплотнения.

Эксперимент № 2.4. Исследование нарушенности скального массива, вмещающего выработки

Для дополнительной характеристики техногенной нарушенной зоны пород вокруг выработок и определения степени разуплотнения горных пород на этих участках были применены геофизические, визуальные и реологические методы [27] [x].

На первом этапе исследований был выполнен ультразвуковой каротаж скважин с визуальным обследованием.

Сопоставление распределений скоростей продольных волн с соответствующим геологическим описанием скважин дало возможность более детально выявить интервалы нарушенности пород в приконтурной зоне массива (рис. 4.29).

Так, по величине скорости продольных волн в скважинах выделены участки:

- с глубинами от 0 до 2 м скорость колеблется от 2,3 до 3,2 км/с;
- с глубинами от 2 до 4 м наблюдается стабилизация скорости на значениях 3,5–4,5 км/с;
- с глубинами более 4 м разброс значений скорости значительно снижается и среднее значение скорости остается постоянным в пределах разрешающей способности прибора — 2,7–4,0 км/с.

Для оценки интенсивности развития трещиноватости пород на выделяемых участках был применен метод инструментального определения удельного водопоглощения массива.

Анализ результатов исследований показал, что величина удельного водопоглощения имеет широкий спектр величин и отличия достигают 4-го порядка. Так как коэффициент удельного водопоглощения целиком зависит от объема макро- и микронарушений, то и нарушенность варьируется в тех же пределах. На большинстве участков измерения величины коэффициента удельного водопоглощения, а следовательно, и нарушенности, соответствуют монолитному массиву, имеющему только микротрещиноватость. Такие породы не имеют эффективной пустотности и являются практически водонепроницаемыми. Большие коэффициенты удельного водопоглощения соответствуют зонам разуплотнения с большим количеством трещин (рис. 4.30). Такие интервалы отмечаются в скважинах объекта Р-2 на небольших глубинах. Это объясняется наличием зоны техногенной трещиноватости.

Проведение повторных измерений и выполнение сравнительной оценки полученных значений коэффициентов удельного водопоглощения показали, что проницаемость техногенно нарушенной приконтурной зоны за 12-летний период (1987–1999 гг.) эксплуатации подземных сооружений увеличилась. В то же время на некоторых участках массива, вне зоны техногенного влияния, коэффициенты удельного водопоглощения пород уменьшились, что, по-видимому, явилось следствием заполнения (кольматации) трещин.

№ 3. Эксперименты по изучению особенностей гидрогеологических процессов в массиве

Для оценки динамики изменения гидродинамических показателей за период эксплуатации исследуемых сооружений и установления закономерностей нарушенного гидродинамического режима были выполнены следующие эксперименты [х]:

- проанализированы результаты наблюдений за водопритоками в процессе проходки горных выработок в период с 1949 по 1964 г.;
- возобновлены режимные наблюдения за подземными водами по скважинам, пробуренным с поверхности, проанализированы ранее полученные данные;
- проведены опытно-фильтрационные и опытно-миграционные исследования в массиве горных пород ГХК для обоснования его изоляционных свойств, определения коэффициентов фильтрации, гидравлической дисперсии, активной трещиноватости для различных тектонических зон и, соответственно, путей возможной миграции.

Эксперимент № 3.1. Изучение гидрогеохимических условий

Гидрогеохимические условия в горном массиве ГХК целенаправленно исследовались на этапах разведочных работ и строительства комбината, главным образом для оценки возможного влияния состава подземных вод на устойчивость создаваемых подземных сооружений. Пробы подземных вод для химического анализа отбирались на различных участках массива пород, непосредственно из массива и после взаимодействия с бетоном крепи. Исследовался также минеральный состав вмещающих пород.

С целью изучения условий формирования подземных вод, оценки скоростей и траекторий их движения работы по изучению геохимических условий были дополнены результатами исследований изотопного состава атмосферных осадков, поверхностных, трещинно-грунтовых и трещинно-жильных вод.

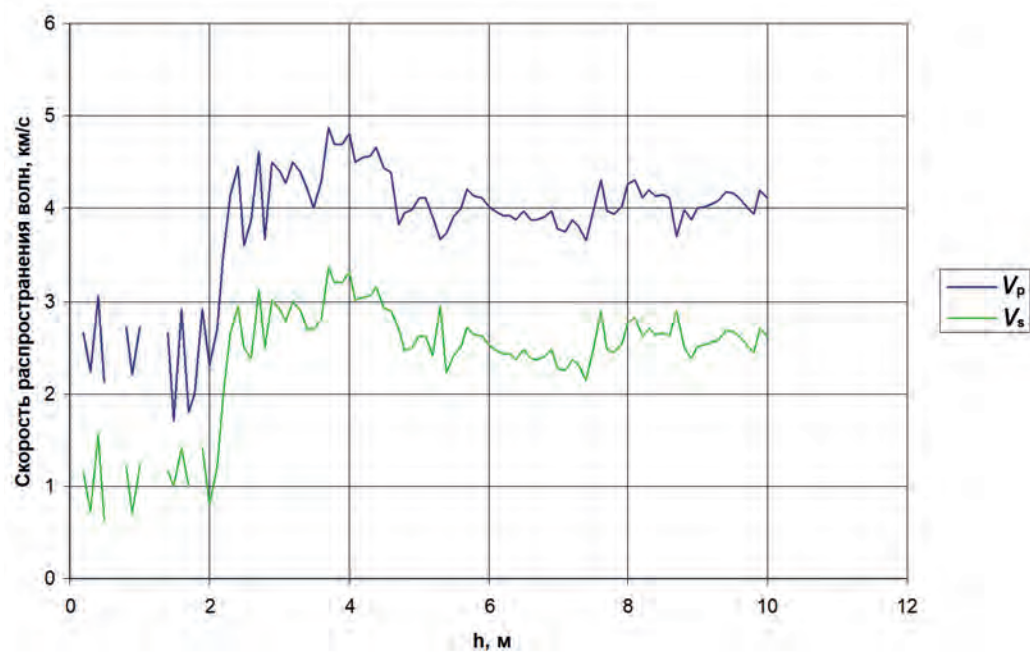


Рис. 4.29. Распределение скоростей продольных и поперечных волн на различном удалении от контура выработки

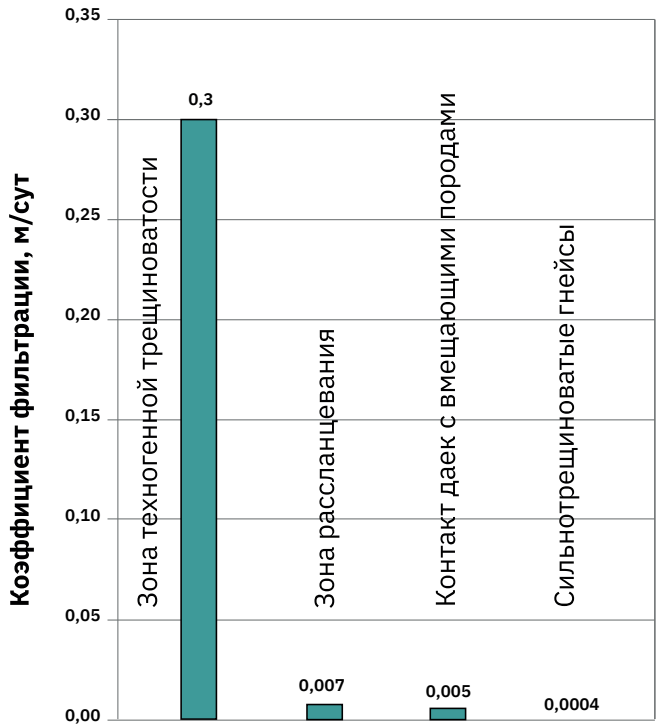


Рис. 4.30. Средние значения коэффициентов фильтрации для различных зон трещиноватости [т]

На основе обобщения этих результатов сделаны следующие выводы: трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды подземных выработок ГХК гидравлически связаны между собой; питание их происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков.

Анализ результатов опробования показал, что основными факторами, формирующими химический состав трещинно-жильных вод, являются состав атмосферных осадков, скорость фильтрации по зонам тектонических нарушений, минеральный состав вмещающих пород и материал заполнителей трещин. Четко прослеживается взаимодействие с карбонатами, заполняющими трещины в гнейсовом массиве. Воды по своему составу являются гидрокарбонатными кальциево-натриево-магниевыми или гидрокарбонатно-сульфатными смешанного катионного состава и, как правило, со слабощелочной реакцией, пресными.

По результатам анализов видно различие в минерализации и изотопном составе снеговых вод, р. Енисей, ручья Студеного, подземных вод из скважины и горных выработок. Минерализация снеговых вод примерно в пять раз меньше в сравнении с водами р. Енисей и в 15–24 раза — с подземными водами.

Эксперимент № 3.2. Комплексные исследования по установлению взаимосвязи поверхностных и подземных вод

Для изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод в пределах скального массива и для оценки его водопроницаемости в районе выработок группы Р в пробуренных с земной поверхности в 1960-х гг. скважинах № 2 и № 3 глубиной соответственно 223 и 200 метров были выполнены комплексные исследования: гидрогеологические откачки, гидродинамический каротаж (расходомерия) и индикаторные исследования, а также проведена рекогносцировочная гидрогеологическая съемка (поверхностная) над данным объектом.

Опытные откачки велись из всего обводненного интервала и поэтому позволили получить только осредненные параметры проницаемости горного массива: «средний» коэффициент фильтрации по скважине № 2 составил 0,002 м/сут, по скважине № 3 — 0,0007 м/сут. Более подробную картину дала расходомерия: по скважине № 2 коэффициент фильтрации меняется от 0,001 м/сут до 0,0021 м/сут, по скважине № 3 — от 0,001 до 0,0003 м/сут.

В целом, на условно выделенных трех апробированных участках скважин № 2 и № 3 наблюдается уменьшение значений коэффициента фильтрации (K_f) с увеличением глубины, и в средней части скважин K_f становится равным десяти-тысячным долям м/сут. Это подтверждает тезис о затухании трещиноватости пород с глубиной (за исключением зон тектонических нарушений), что подтверждается и характером проявления трещиноватости керна из скважин.

Индикаторные исследования (запуск в призабойную часть скважины красителя — эозина) указали на высокую проницаемость приконтурной зоны техногенной трещиноватости. Через сутки после запуска индикатора он был обнаружен в дренажных водах выработки Р-4 и горизонтальных наблюдательных скважинах, пройденных из данной выработки на глубину 20–30 м. Это подтверждает наличие в закрепном пространстве участков с проницаемостью более 1 м/сут.

Индикаторные опыты показали, что зона повышенной трещиноватости вокруг подземных сооружений имеет ограниченные размеры (первые метры), подтверждается индикаторными исследованиями в скважине № 3. Так, краситель, запущенный в эту скважину, в дренажных водах камер Р-2, Р-3 и Р-4 не был обнаружен и через несколько месяцев.

Проведенные опытные откачки также показали, что радиус зоны влияния скважин находится в интервале 20–70 м. Так, при проведении опытных работ только в ближайшей скважине № 2а, расположенной на расстоянии около 20 м от скважины № 2, было отмечено понижение уровня на 2,2 м.

Эксперимент № 3.3. Изменение уровня подземных вод

Для оценки влияния эксплуатации подземных сооружений на изменение гидродинамических условий массива были проанализированы результаты режимных наблюдений за трещинно-грунтовым горизонтом подземных вод. Измерения выполнялись по сети наблюдательных скважин, оборудованных в 1960–1970-е гг. Был выполнен сравнительный анализ карт гидроизогипс, построенных по данным 1960-х гг., и современных (2002 г.). Он показал принципиальное сходство формы уровенной поверхности подземных вод, которая контролируется рельефом дневной поверхности и в весьма сглаженном виде повторяет его формы; по тальвегам логов происходит разгрузка подземных вод.

Вместе с тем за период эксплуатации подземных сооружений произошло изменение уровней залегания подземных вод. За сорокалетний период зафиксирован подъем уровня воды по всем скважинам, пробуренным с поверхности. При этом по четырем скважинам из шести изменения превышают 2,5 м. Это говорит о низком дренирующем воздействии комплекса подземных сооружений на подземные воды массива. Исключением являются участки, примыкающие к вертикальным горным выработкам (стволам), где по отдельным скважинам зафиксирована депрессионная воронка с амплитудой снижения уровенной поверхности до 6,5 м.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что возникновение зон разуплотнения в приконтурных зонах горных выработок не повлияло на общий гидродинамический режим массива пород.

Эксперимент № 3.4. Замеры водопритокров в горные выработки

Выполненный анализ динамики водопритокров в горные выработки с систематизацией и обобщением результатов регулярных замеров водопритокров в выработки, осуществлявшихся с момента создания подземных сооружений (рис. 4.31, 4.32), показал привязку пунктов замеров водопритокров к геологическим элементам массива, позволил сформулировать следующий вывод: за время эксплуатации сооружений объем воды, дренируемой горными выработками, резко снизился в относительно монолитном массиве, рассеченном единичными трещинами [t].

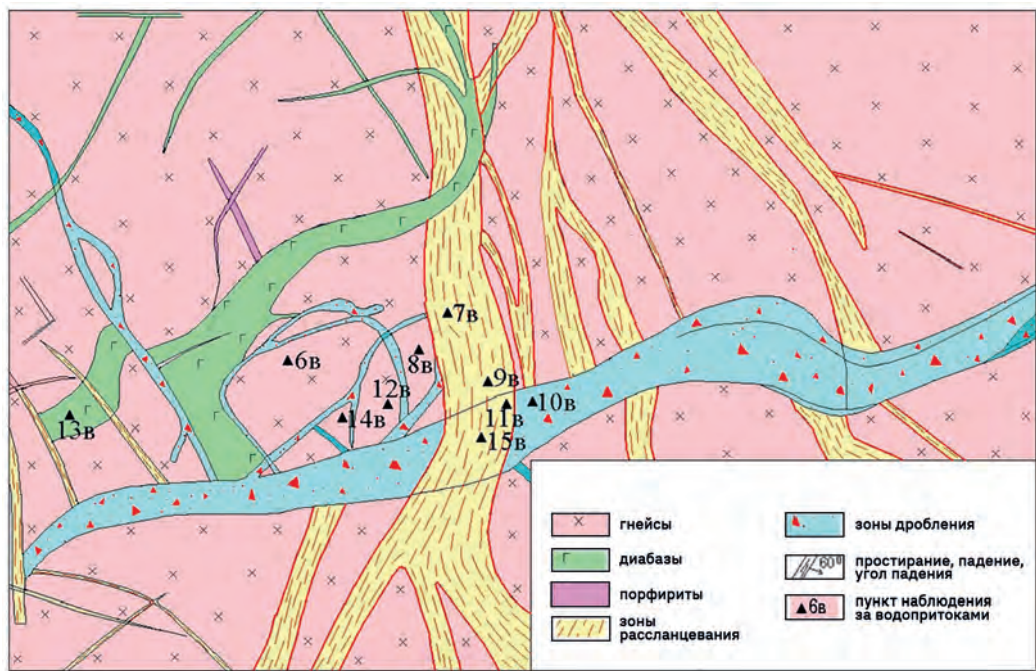


Рис. 4.31. Расположение пунктов измерения интенсивности водопритоков из массива пород в выработках Р. Масштаб 1:1000

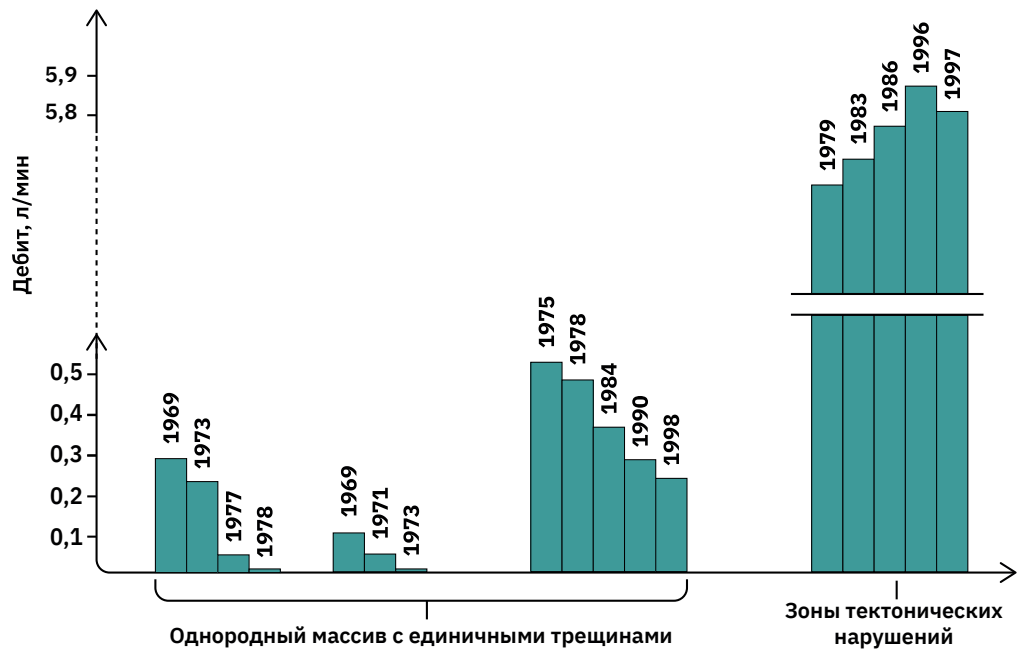


Рис. 4.32. Изменение дебита водопритоков в подземные выработки

Такой характер изменения количества дренируемых трещинно-жильных вод предположительно связан с механической и химической колюматацией единичных трещин, с закрытием в результате теплового воздействия, а также с изменением структуры потока подземных вод в пользу крупных трещинных зон в процессе эксплуатации подземного комплекса.

В результате выполненных гидрогеологических и гидрогеохимических исследований установлено, что:

- действительная скорость фильтрации трещинно-жильных вод с поверхности к горным выработкам на отдельных участках массива, представленных зонами тектонических нарушений, составляет 13–17 м/год;
- коэффициенты фильтрации в приконтурной зоне выработок (техногенной трещиноватости) достигают 6 м/сут при среднем значении 0,3 м/сут;
- за 12-летний период исследований коэффициент фильтрации в приконтурной зоне выработок увеличился на 2–6 % на участках массива с интенсивным развитием деформационных процессов;
- коэффициенты фильтрации в зоне расщелачивания на отметках заложения горных выработок составляют в среднем 0,007 м/сут, в относительно монолитных породах — 0,0004 м/сут;
- дебиты водопритока к подземным сооружениям за 35-летний период наблюдений (с 1964 по 1999 г.) снизились от восьми раз до полного высыхания (по отдельным наблюдательным точкам), и только в области пересечения зон дробления и расщелачивания они увеличились до двух раз;
- гидродинамический режим массива стабилен, он характеризуется малой степенью нарушенности естественных условий.

№ 4. Эксперименты по изучению процессов миграции в естественных условиях

Уникальность объектов ГХК также позволила выполнить изучение *in situ* отдельных физических и химических процессов, которые могут происходить в ПГЗРО в постконсервационный период.

Было проведено изучение процессов миграции радионуклидов в составе комплексного радиоактивного загрязнения в растворе подземных вод в ходе их распространения через систему инженерных и природных барьеров безопасности.

Для этого был изготовлен набор исследовательских стендов (рис. 4.33), один из которых предназначался для проведения экспериментов по выщелачиванию радионуклидов из остеклованных ВАО (изготовленных в ЦЗЛ ГХК) подземными водами и изучения процессов диффузии изотопов в материалах инженерного барьера.

Стенд представлял собой уменьшенный фрагмент ячейки для захоронения ВАО и был размещен в естественно обводненном шурфе, пройденном в горной выработке на глубине ~260 м [28]. В части секций стенда были размещены остеклованные ВАО размером Ø 30 × 30 мм; другая часть секций была заполнена блоками бентонита, смешанного с пульпой РАО. Пространство между секциями было заполнено бентонитом, первоначальной влажностью около 80 %. Длительность опытов составляла 3–5 лет. Отбор проб осуществлялся через каждый год выдержки с разборкой соответствующих секций.

Комплекс выполненных радиохимических и гамма-спектрометрических анализов позволил определить задерживающую способность материалов инженерных барьеров по отношению к различным радионуклидам, значения коэффициента молекулярной диффузии в бентонитовом буфере в зависимости от влажности, типа бентонита, пористости и присутствия железа и скорости выхода радионуклидов из условной «матрицы РАО» в бентонитовый буфер.

Было определено, что в конкретных горно-геологических условиях, характеризующихся определенными значениями физико-химических параметров, скорости выщелачивания радионуклидов из боросиликатных и борофосфатных матриц почти на порядок ниже, чем из пульпы «отвержденных» в бентоните.



Рис. 4.33. Общий вид исследовательских установок для проведения натурных исследований миграции радионуклидов

Кроме того, результаты натурных экспериментов показали существенные различия во взаимодействии комплексных радиоактивных растворов с элементами системы природных и инженерных барьеров в сравнении с взаимодействием монокомпонентных (по радионуклидам) растворов. Это подтверждает необходимость использования в экспериментах реальных многокомпонентных растворов при получении исходных данных для обоснования безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Комплекс подземных сооружений ГХК, существующий более 70 лет, рассматривается как аналог будущего объекта захоронения тепловыделяющих радиоактивных отходов в скальных породах. Геологические условия кристаллического массива, в котором сооружены выработки, в целом соответствуют условиям верхней части геологического разреза участка Енисейский. Это массив гнейсов, пронизанных дайками диабазов и тектоническими нарушениями. Общая водопроницаемость массива слабая и повышается в зонах дробления.

*Комплекс периодических и специальных исследований выполнялся с целью оценки длительного воздействия источников тепла на породы массива, гидрогеологические условия и процессы. Отдельным направлением были эксперименты *in situ* по изучению процессов миграции радионуклидов, которые могут происходить в ПГЗРО в период после закрытия.*

Заключение

Предварительные геологические изыскания в пределах Нижнеканского массива и его метаморфического обрамления (9 000 км²) проводились поэтапно в период 1993—2008 гг. История изысканий условно разделена на несколько этапов, начиная с выделения множества перспективных площадей до проведения работ на двух альтернативных участках — Верхнеитатском, включавшем соседние участки Итатский и Каменный, в гранитоидах, и на Енисейском — в гнейсах. К 2007 г. геологическая изученность альтернативных вариантов по объему выполненных геофизических работ и глубокого бурения стала сравнимой. Условия на обоих участках соответствовали нормативным требованиям Ростехнадзора к размещению подземных объектов захоронения РАО, которые действовали на тот момент. На фоне сопоставимых показателей геологической пригодности обоих участков решающим фактором в выборе Енисейского участка оказались его близость к развитой инфраструктуре ГХК.

Участки Итатский и Каменный были выделены и определены в качестве перспективных в пределах Верхнеитатской площади в 1994 г., после чего они изучались раздельно (ок. 30 и 40 км² соответственно). Оба участка приурочены к гранитоидной части Нижнеканского массива. Блоковая структура была выявлена дистанционными методами и геофизическими работами. На глубину до 700 м массив был изучен бурением. Гидрогеологические условия малопроницаемых гранитоидов на глубине вне зон трещиноватости могли обеспечить безопасность изоляции за счет минимизацию притока подземных вод в ПГЗРО.

Участок Енисейский в качестве перспективного был выделен, как и Верхнеитатский, в 1994 г., однако затем длительное время детальных геологических работ на нем не проводилось. Они стартовали только в 2002 г. В течение нескольких лет на площади 70 км² был выполнен комплекс дистанционных, геофизических, гидрологических и геохимических исследований, выполнено бурение скважин до глубины 600 м и опытно-фильтрационные опыты в них. Среди метаморфических пород с интрузиями гранитоидов первоначально была выделена более перспективная Байкало-Шумихинская площадь (ок. 4 × 5 км), центральная часть которой располагалась внутри малонарушенного тектонического блока, ограниченного линеаментами, частично подтвержденными в геофизических полях.

В качестве аналога будущего объекта захоронения тепловыделяющих радиоактивных отходов в кристаллических породах рассматривается комплекс подземных сооружений ГХК. Здесь на протяжении более 70 лет в условиях длительного воздействия источников тепла выполнялся комплекс периодических и специальных исследований различных процессов в породах и подземной гидросфере.

Литература

1. Кочкин Б. Т. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект) / Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский, С. В. Юдинцев. — М.: ИГЕМ РАН, 2017. — 384 с.
2. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Е. Б. Андерсон, В. М. Даденко, В. И. Кирко и др. // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 16—20 марта 1998) / под ред. Е. Ф. Любцевой. — СПб.: Горно-химический комбинат; НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. — С. 14—23.
3. Геофизические исследования Енисейского кряжа с целью поисков участков захоронения ВАО / Е. Б. Андерсон, Е. Ф. Любцева, А. В. Оганезов и др. // Разведка и охрана недр. — 1999. — № 9—10. — С. 61—63.
4. Результаты поисковых и научно-исследовательских работ по выбору площадок для подземной изоляции ВАО и ОЯТ на Нижнеканском массиве гранитоидов (Южно-Енисейский кряж) / Е. Б. Андерсон, В. Г. Савоненков, Е. Ф. Любцева и др. // Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина. — 2006. — Т. XI. — С. 8—64.
5. Линд Э. Н. Комплексные геолого-геофизические исследования Нижнеканского гранитоидного массива (участки Каменный и Итатский): Росгеолфонд: Геологический отчет: инв. № 482704 / Э. Н. Линд, В. М. Даденко, В. А. Ключев и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2004. — 351 с.
6. Линд Э. Н. Комплексные геолого-геофизические исследования Нижнеканского гранитоидного массива (участки «Каменный» и «Итатский»): Геолфонд по Красноярскому кр.: Геологический отчет: инв. № 29174 / Э. Н. Линд, И. В. Шевченко и др. — Красноярск: ГХК, КНИИГиМС, 2008. — 232 с.
7. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века: иллюстрация основных положений. — М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2001. — 64 с.
8. Обращение с отработавшим ядерным топливом. Концепция Министерства Российской Федерации по атомной энергии. — М.: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2003. — 38 с.
9. Второй национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами: К третьему совещанию по рассмотрению в рамках объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. — М.: ГК «Росатом», 2009.
10. Разработка обобщенного плана проведения научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ по созданию объекта подземной изоляции РАО на Нижнеканском массиве: Итоговый отчет (за период 01.05.2002 — 31.01.2005): Проект МНТЦ № 2377Р / Т. А. Гупало, В. П. Бейгул, В. Л. Миловидов и др. — М.: ФГУП «ВНИПИПромтехнологии», 2005.
11. Гупало Т. А. Комплексная программа инженерно-геологических изысканий для проектирования и строительства подземной лаборатории / Т. А. Гупало, О. А. Прокопова // Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива в новой концепции завода РТ-2: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 20—24 мая 2002). — СПб.: Горно-химический комбинат; НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 2004. — С. 130—145.
12. Федеральный объект подземного захоронения отвержденных радиоактивных отходов в России: практические шаги к созданию / Е. Г. Кудрявцев, И. В. Гусаков-Станюкович, Е. Н. Камнев и др. // Безопасность окружающей среды. — 2008. — № 4. — С. 106—112.

13. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-04 : [утв. приказом Ростехнадзора № 8 от 19.10.2004]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2004.
14. Подземная изоляция радиоактивных отходов: Атомная энергетика / Е. Б. Андерсон, С. В. Белов, Е. Н. Камнев и др.; под ред. В. Н. Морозова. — М.: Горная книга, 2011. — 592 с.
15. Создание подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае / Ю. Д. Поляков, А. Ю. Порсов, В. П. Бейгул, М. В. Паленов // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. — 2013. — № 1(29). — С. 14—21.
16. Исследование минеральных и деформационных преобразований горных пород Нижнеканского массива в целях определения их удерживающей способности при геологическом захоронении и изоляции радиоактивных отходов / В. А. Петров, В. В. Полуэктов, Й. Р. Хаммер, Г. Цулауф // Горный Журнал. — 2015. — № 10. — С. 67—74. — DOI: 10.17580/gzh.2015.10.13
17. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород / Н. Ф. Лобанов, В. П. Бейгул, П. В. Лопатин, А. Ю. Озерский // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 59—64. — DOI: 10.17580/gzh.2015.10.11
18. Лукина Н. В. Активные разломы зоны сочленения Сибирской платформы и Алтае-Саянской орогенической области / Н. В. Лукина // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. — 1996. — Т. 71. — № 5. — С. 25—32.
19. Даценко В. М. Нижнеканский массив — эталон нижнеканского гранитоидного комплекса (Енисейский кряж) / В. М. Даценко. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 1995. — 123 с.
20. Линд Э. Н. Состав, физические свойства пород Нижнеканского массива и результаты геофизических работ как основа для составления геологической карты участков Итатский и Каменный / Э. Н. Линд, В. М. Даценко, В. М. Жура и др. // Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива в новой концепции завода РТ-2: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 20—24 мая 2002). — СПб.: Горно-химический комбинат; НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 2004. — С. 98—108.
21. Даценко В. М. К вопросу о рудоносности Нижнеканского массива (данные детальных работ на участках Каменный и Итатский) / В. М. Даценко, Э. Н. Линд, Л. П. Андреева // Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива в новой концепции завода РТ-2: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 20—24 мая 2002). — СПб.: Горно-химический комбинат; НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 2004. — С. 94—97.
22. Gupalo T. A. Prospects for development of technologies of radwaste geological isolation in Russia / T. A. Gupalo // International Journal of Nuclear Energy Science and Technology. — 2006. — Vol. 2. — № 1—2. — P. 42—53. — DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010646
23. Lopatin V. V. Research of promising geologic site in Russia for disposal of radioactive waste / V. V. Lopatin, T. A. Gupalo, N. F. Lobanov // Proceedings of 7th international conference on radioactive waste management and environmental remediation IECM'99 (Nagoya, Japan, 26—30 September, 1999). — N. Y., USA: ASME, 1999.
24. Лукина Н. В. Нижнеканский гранитоидный массив: новейшие и современные тектонические движения, морфология и кинематика активных разломов и мегатрещин, современное поле напряжений. Возможности безопасного захоронения ВАО / Н. В. Лукина // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 16—20 марта 1998) / под ред. Е. Ф. Любцевой. — СПб.: Горно-химический комбинат; НПО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. — С. 49—59.
25. Гидрогеология Нижнеканского гранитоидного массива / Т. А. Гупало, Л. Г. Соколовский, В. А. Поляков, В. Л. Миловидов // Разведка и охрана недр. — 2004. — № 5. — С. 26—30.

26. Гупало В. С. Исследования изменения деформационных свойств массива пород, находящегося под воздействием техногенных нагрузок / В. С. Гупало // Проблемы подземного строительства в XXI веке: Труды международной конференции (Тула, 25–27 апреля 2002). — Тула: Издательство ТулГУ, 2003.
27. Гупало В. С. Обоснование конструктивных параметров подземных хранилищ радиоактивных отходов с учетом длительных тепловых воздействий на массив скальных пород: дис. ... канд. техн. наук / В. С. Гупало. — М.: Московский государственный горный университет, 2003. — 137 с.
28. Review of excess weapons plutonium disposition LLNL contract work in Russia: Proceedings of the 3rd annual meeting for coordination and review of LLNL Contract Work (St. Petersburg, Russia, 14–18.01.2002) / eds. L. J. Jardine, G. B. Borisov. — Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.

Архивные документы и материалы

- a. Линд Э. Н. Изучение структурно-тектонического строения «Енисейского» участка Нижнеканского гранитоидного массива на основе проведения комплексных геофизических исследований: Отчет / Э. Н. Линд, В. М. Даценко и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2002–2004.
- b. Линд Э. Н. Специализированные геолого-геофизические исследования на участке «Енисейский» Нижнеканского гранитоидного массива: Отчет по НИР / Э. Н. Линд, В. М. Даценко, А. С. Беспрозванных и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2004.
- c. Гупало Т. А. Детальные геолого-поисковые, буровые и специализированные работы на Нижнеканском массиве: Отчет / Т. А. Гупало, В. Л. Миловидов, О. А. Проколова и др. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2002–2005.
- d. Трофимов В. А. Бурение трех структурных скважин для оценки геолого-гидрогеологических условий участка «Енисейский»: Отчет : Архив ФГУП «КГПИИ «ВНИПИЭТ»: инв. № 103-6561/дсп / В. А. Трофимов, А. И. Лозовой и др. — Железногорск: ВНИПИЭТ, 2003.
- e. Трофимов В. А. Бурение разведочной скважины для оценки геолого-гидрогеологических условий участка «Енисейский»: Отчет / В. А. Трофимов, А. И. Лозовой и др. — Железногорск: ВНИПИЭТ, 2004.
- f. Геофизические и гидрогеологические исследования в скважине 1-Е при бурении до глубины 600 м (итоговый): Отчет: Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: Договор 487-Н: инв. № А-505-05 / В. С. Москалишин, Л. И. Старицына, В. А. Трофимов, А. И. Лозовой — Железногорск: ВНИПИЭТ, 2005.
- g. Даценко В. М. Обоснование геолого-геофизической модели строения Енисейского участка: Отчет : Договор 487-Н: инв. № А-297-05 / В. М. Даценко, А. С. Беспрозванных, В. Г. Сибгатулин и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2006.
- h. Строительство первоочередных объектов окончательной изоляции РАО (Красноярский край, Нижне-Канский массив): Итоговый отчет : договор № Р 2.30.07.321 / Е. Н. Камнев, Т. А. Гупало, Ю. А. Ревенко, Р. Р. Хафизов. — М.; Железногорск: ГХК; ВНИПИпромтехнологии, 2007.
- i. Декларация о намерениях строительства первоочередных объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив) : [утв. заместителем генерального директора Государственной Корпорации «Росатом» Е. В. Евстратовым 20.12.2008]: Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-11665. — М.: ФГУП «ВНИПИпромтехнологии», 2008.
- j. Андерсон Е. Б. Геолого-геофизическое изучение северной части Нижнеканского массива с целью поиска блоков монолитных гранитоидов, перспективных для захоронения отвержденных высокоактивных отходов завода РТ-2: Сводный отчет о НИР: Инв. № 2533-И / Е. Б. Андерсон, И. В. Величкин, В. М. Даценко и др. — СПб.: Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 1996.

- k. Андерсон Е. Б. Геологические и геофизические исследования на территории южной части Енисейского кряжа для обоснования возможности безопасного захоронения отверженных высокоактивных отходов завода РТ-2 в глубокие геологические формации (обобщение и анализ литературных и фондовых материалов и результатов рекогносцировочных полевых работ): Сводный отчет о НИР: инв. № 2240-И-93 / Е. Б. Андерсон, В. М. Даценко, О. Л. Кедровский и др. — СПб.: Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 1993.
- l. Андерсон Е. Б. Результаты комплексных геолого-геофизических и специализированных исследований на участке Каменный и прилегающей территории (Нижнеканский массив). Книга 1: Сводный отчет о НИР: инв. № 2896-И / Е. Б. Андерсон, Р. И. Любцев и др. — СПб.: Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 2001.
- m. Линд Э. Н. Результаты комплексных научно-исследовательских геолого-геофизических работ по изучению Нижнеканского гранитоидного массива: Предварительный отчет / Э. Н. Линд, В. М. Даценко, Р. В. Кабанов и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2001.
- n. Линд Э. Н. Проведение комплексных геолого-геофизических исследований Нижнеканского гранитоидного массива (участки «Каменный» и «Итатский»): Отчет / Э. Н. Линд, Р. Р. Хафизов, В. Г. Савельев и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2001.
- o. Лопатин В. В. Техническое задание на проектирование объекта подземного захоронения твердых радиоактивных отходов. Инженерно-геологические и гидрогеологические условия. Исходные данные: Государственный контракт № Н.4п.23.04.08.210 от 18.02.2008: инв. № А-11652 / В. В. Лопатин, С. А. Гуськов, Н. Ф. Лобанов. — ВНИПИпромтехнологии, 2008. — 132 с.
- p. Лозовой А. И. Комплексные инженерно-геологические и гидрологические исследования участка Енисейский в северной части Нижнеканского гранитоидного массива: Отчет. Т. 1 / А. И. Лозовой, В. А. Зуев, Р. М. Лобацкая. — Железногорск: ВНИПИЭТ, 2002.
- q. Зуев В. А. Результаты полевых гидрогеологических исследований на участке «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский гранитоидный массив: Архив ФГУП «КГПИИ ВНИПИЭТ»: инв. № 103-6307/дсп: Научный отчет по полевым работам 2002 г. / В. А. Зуев, Е. В. Зуева, А. И. Сурнин. — Томск: ЭГП «Ноосфера», 2003.
- r. Лопатин А. П. Геологическое строение, геоморфология, тектоника и неотектоническая активность глубинных разломов долины Енисея на участке от г. Красноярска до устья р. Кан по данным аэрокосмосъемок: Отчет о НИР / А. П. Лопатин, Ю. М. Мальцев, Л. Н. Лаврентьева. — Красноярск: ГЦ «Природа», 1994.
- s. Технология повышения устойчивости специальных подземных сооружений, авторский надзор и научно-техническая помощь по контролю за состоянием: Отчет. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 1991—1992.
- t. Гупало Т. А. Разработка количественных критериев пригодности скального массива для безопасного длительного хранения отходов от производства оружейного плутония на примере подземного комплекса Красноярского горно-химического комбината: Итоговый отчет: Проект МНТЦ №307В-97 (1997-2001 гг.) / Т. А. Гупало, В. П. Бейгул, Н. И. Селезнев и др. — ВНИПИпромтехнологии, 2001.
- u. Организация контрольных пунктов геомониторинга в камерах Б3 и Б4 на участках, предназначенных для размещения новых технологий: Отчет. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 1996.
- v. Инструментальный контроль развития геомеханических процессов в целиках и обделках подземных сооружений ГХК, оценка их технического состояния. Научно-техническая помощь службе горного надзора в проведении натурных измерений: Отчет. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 1996.
- w. Научное сопровождение горного мониторинга на подземных объектах ГХК: Отчет о НИР: Технический архив ФГУП «ГХК»: Договор № 303-Н. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2001.
- x. In-situ исследования степени гетерогенности и изолирующих свойств массивов магматических и метаморфических пород, предназначенных для долговременного хранения РАО в окрестности Железногорска, вблизи Красноярска: Отчет по контракту BGR, НТЦ «ГХК» и ФГУП «ВНИПИпромтехнологии». — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2001.

Глава 5

Детальная характеристика участка Енисейский. 2009—2015 гг.

История и особенности детального геологического изучения участка. Систематическое изучение участка Енисейский*, в соответствии с требованиями Закона Российской Федерации «О недрах» [1] и рекомендациями Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (Минприроды России) [2], было начато в 2009 г. Участок находится в зоне влияния Горно-химического комбината (ГХК), который получил лицензию на право пользования недрами с целью геологического изучения участка недр для окончательной изоляции (захоронения) РАО. Соответственно, в начале изучения Енисейского участка ГХК выступал в качестве заказчика и частично финансировал работы по геологическому изучению участка недр. Специалисты геологической службы ГХК непосредственно участвовали в изучении участка.

В методическом отношении руководство работами осуществлял ВНИПИ-промтехнологии, специалисты которого сформулировали основные требования к методике выполнения работ, задали контур изучаемого участка, а также принимали участие в контроле реализации работ и обсуждении получаемых результатов (рис. 5.1). Практическое выполнение работ было поручено и велось в основном работниками АО «Красноярская горно-геологическая компания» (далее «Красноярскгеология»), которые располагали необходимыми техническими средствами для бурения разведочных скважин на требуемую глубину изучения (700 м). Кроме того, «Красноярскгеология» как местная организация имеет большую степень доверия к получаемым результатам при их общественном обсуждении в регионе. Общее организационное, научное и методическое руководство работами было поручено начальнику Геоэкологической партии А. Ю. Озерскому.

На момент начала изучения участка работам был придан статус предпроектных инженерных изысканий, целью которых было обозначено обоснование его пригодности для окончательной изоляции РАО. Однако по результатам проверки распорядителя недр в 2010 г. недропользователя (ГХК) обязали выполнять геологическое изучение участка в соответствии с правилами организации недропользования. По итогам была восстановлена стадийность, а результаты начали представляться на экспертизу в Государственную комиссию по запасам полезных ископаемых (ГКЗ) Федерального агентства по недропользованию (Роснедра).

* Здесь и далее в разделе под участком Енисейский понимается территория, изученная бурением на глубину до 700 м (см. рис. 5.2). Эта территория была определена как перспективная для размещения ПГЗРО по результатам работ 2002—2005 гг. (см. гл. 4), затем ее позиция была несколько скорректирована.

Учитывая то обстоятельство, что подобные работы в Российской Федерации проводились впервые и ранее не рассматривались государственной экспертизой, было намечено провести их в две стадии: поисковую и оценочную [3, 4]. В рамках выполнения поисковой стадии работ в 2010 г. был подготовлен и представлен на государственную экспертизу геологический отчет [3], в основу которого были получены материалы по бурению, испытаниям и опробованию трех поисковых скважин (Р-1, Р-2, Р-3) и двух оценочных (Р-4, Р-5). Рассмотрев отчет о поисковой стадии, Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых (ГКЗ Роснедра) признала [5], что *«по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок „Енисейский“ является перспективным для дальнейшего изучения с целью обоснования его пригодности для захоронения радиоактивных отходов в архейских гнейсах Нижне-Канского массива в целевом интервале глубин 450–550 м»*. Решением Государственной комиссии по степени изученности участок Енисейский был отнесен к группе выявленных.

По итогам рассмотрения результатов работ 2009–2010 гг. (поисковая стадия) Государственная комиссия рекомендовала в дальнейшем выполнить геологическое картирование участка, установить водопроводящие зоны в пределах блока, их гидравлические связи, особенности внутреннего строения, скорости водного потока, уточнить водоприитоки в горные выработки, провести прогноз температурного воздействия радиоактивных отходов на геологическую среду, выполнить оценку воздействия объекта на окружающую среду. Кроме этого, рекомендовалось провести крупномасштабные геофизические исследования для изучения тонкой структуры полей и выделения тектонических зон, отдельных разновидностей горных пород и дайкового комплекса, выполнить сейсморазведку для детального сейсмического районирования массива.

Обнаружение повышенной трещиноватости пород в скважинах Р-3 и Р-5 стало одной из причин корректировки границ участка со смещением от границ поисковой стадии на 200–300 м к осевой водораздельной зоне Атамановского хребта (рис. 5.2). Это решение было утверждено на Научно-техническом совете ГХК от 30 сентября 2010 г.

Оценочная стадия работ была проведена в 2010–2011 гг. теми же участниками с привлечением специализированных субподрядных организаций.

В соответствии с предпроектными проработками «ВНИПИпромтехнологии» концепция на стадии оценочных работ основывалась на комплексном изучении практически водонепроницаемого скального массива для обоснования безопасности захоронения РАО в целевом интервале, расположенном на глубинах 450–475 м (абсолютных отметках от ± 0 до -25 м). Объем подземного сооружения был предварительно рассчитан на размещение РАО на двух эксплуатационных горизонтах — 450 и 475 м. При этом площадь изучения превышала площадь подземного сооружения почти в два раза, так как с северной части изучению подлежала часть массива, в котором предполагалось строительство пандуса (наклонного съезда) для спуска РАО к целевому интервалу по аналогии с решениями, принятыми в скандинавских странах.

Методические и технические требования к выполнению работ оценочной стадии, точки бурения «разведочных» скважин, методика их опробования и фильтрационных испытаний были установлены АО «ВНИПИпромтехнологии». Одиночные поинтервальные откачки в дальнейшем были дополнены кустовыми, выполнено геохимическое опробование пород и др. На основании всех предложений и идей, а также



Рис. 5.1. Начало геологоразведочных работ на Енисейском участке, 2009 год. Специалисты ФГУП «Горно-химический комбинат», ОАО «ВНИПИпромтехнологии» и ОАО «Красноярскгеология» осматривают площадку под бурение первой скважины. Слева направо: И. В. Шевченко, В. Н. Медведев, Ю. Е. Торжков, В. П. Бейгул, В. Г. Середкин, А. В. Позинзов. Фото А. Ю. Озерского

нормативных документов [1, 6, 7], был составлен Проект на выполнение оценочных работ. Проект был рассмотрен и согласован Управлением по недропользованию по Красноярскому краю и утвержден ФГУП «ГХК».

Основным методом изучения недр участка являлось бурение оценочных (разведочных) скважин. Поскольку на тот момент Минприроды РФ не разработало требований к размещению скважин для изучения участков недр, не связанных с добычей полезных ископаемых, скважины были расположены в основном по периметру планируемого подземного сооружения с тем, чтобы не нарушать сплошность пород в пределах целевого интервала. Бурение проводилось колонковым способом с полным отбором керна скоростными буровыми станками СКБ-5 (рис. 5.3).

В качестве бурового инструмента применялись комплексы со съемными керноприемниками ССК производства Atlas-Corpro, Boart Longyear, Fordia. Целевой интервал глубин вскрывался диаметром NQ (75,7 мм), что позволило получить керна диаметром 47,6 мм, пригодный для испытаний на физико-механические и деформационные свойства. Из керна также отбирались пробы на химические анализы и для изготовления шлифов.

Всего за 2009–2011 гг. на поисковой и оценочной стадиях были пробурены 10 скважин глубиной 600–700 м и четыре гидрогеологических скважины глубиной по 200 м. Общий объем бурения составил 7602,5 пог. м. Полевую геологическую документацию, отбор литохимических и инженерно-геологических проб вели геологи Ивановской ГРЭ (г. Канск) С. А. Арефьев, В. Г. Голубев, В. А. Астраханцев (рис. 5.4).

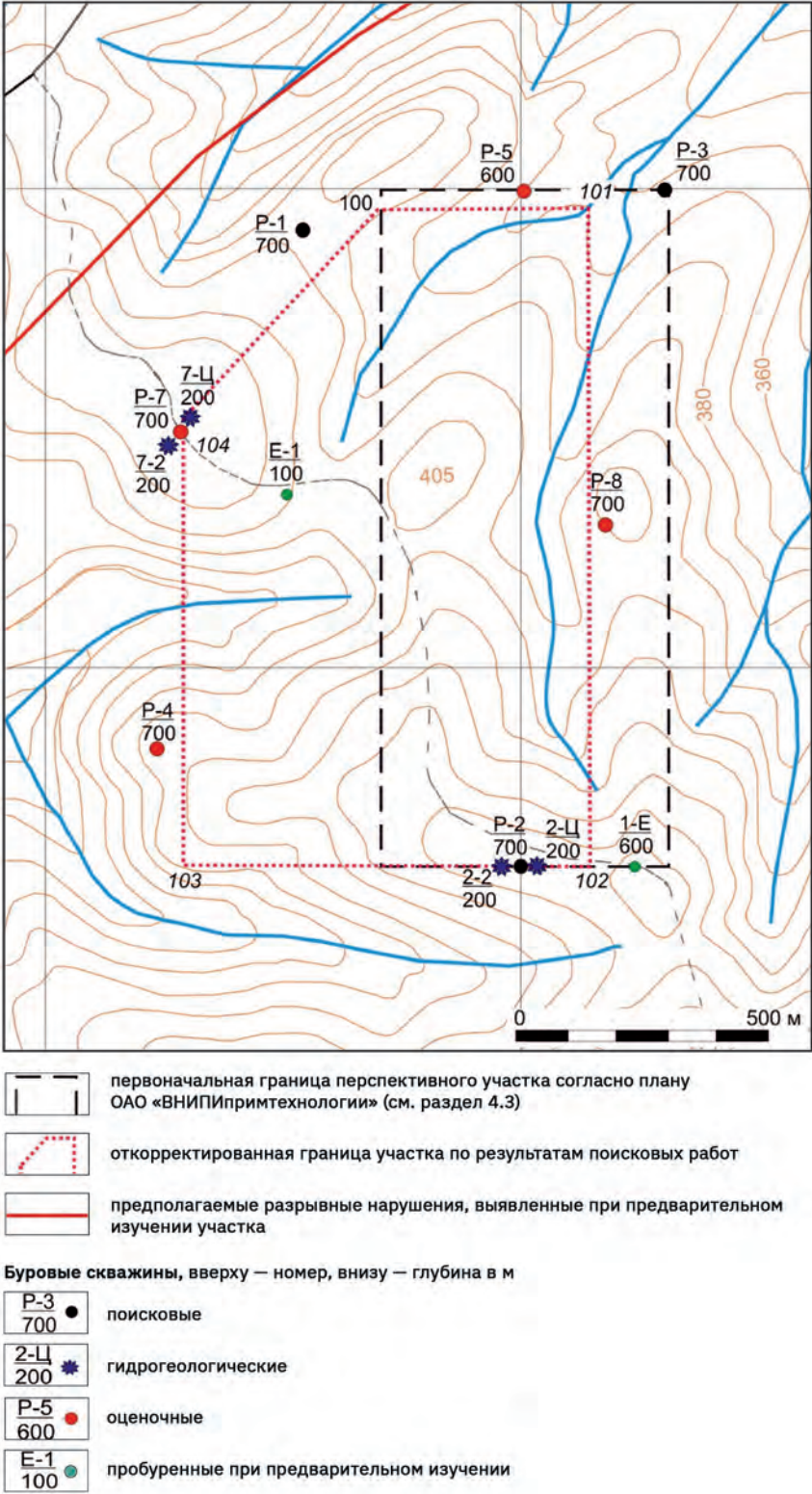


Рис. 5.2. Корректировка границ участка Енисейский по результатам поисковых работ



Рис. 5.3. Буровая установка СКБ-5 на скважине Р-2. 2010 г. Фото А. Ю. Озерского



Рис. 5.4. Геологи ФГУП «Горно-химический комбинат» и АО «Красноярскгеология» изучают kern скважины Р-6, 2011 г.

Слева направо: начальник партии АО «Красноярскгеология» А. Ю. Озерский, начальник отдела ФГУП «Горно-химический комбинат» И. В. Шевченко, главный геолог ФГУП «Горно-химический комбинат» И. В. Шрамко, ведущий геолог Ивановской ГРЭ АО «Красноярскгеология» В. Г. Голубев

Во всех скважинах был выполнен геофизический каротаж, в том числе гамма-каротаж — 7575 пог. м; гамма-гамма-каротаж — 7554 пог. м; электрический каротаж (КС, ПС) — 7180 пог. м; кавернометрия — 7420 пог. м; каротаж магнитной восприимчивости — 1198 пог. м; резистивиметрия — 6497 пог. м; расходометрия — 6438 пог. м; инклинометрия — 6823 пог. м.

Важным дополнением к прямому изучению целевого интервала явились площадные геофизические работы, включенные в проект по рекомендации ГКЗ Роснедра:

- магнитная съемка по сети 100×10 м — $6,2 \text{ км}^2$;
- электроразведка методом ВЭЗ — 622 физические точки;
- сейсморазведочные работы МОГТ (методом общей глубинной точки) 3D — $6,2 \text{ км}^2$.

Магнитную съемку и вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) выполнили геофизики Южной геофизической экспедиции «Красноярскгеология». Надо сказать, что возможности этих методов оказались совершенно недостаточны для изучения целевого интервала на глубинах 450—475 м, но благодаря результатам магнитной съемки К. А. Заблочким была составлена геологическая карта участка, а результаты ВЭЗ позволили выявить мощность и состав покровных отложений (см. раздел 5.1).

Для выполнения сейсморазведочных работ была приглашена специализированная организация ОАО «Енисейгеофизика». Эти работы выявили глубинные структуры участка, но были менее показательны в целевом интервале глубин.

Методика гидрогеологических испытаний скважин также была задана специалистами АО «ВНИПИпромтехнологии». В каждой скважине после завершения бурения и достижения проектной глубины проводились поинтервальные откачки через каждые 50 м. Испытываемый интервал изолировался пакерами, установленными на колонне буровых труб, перфорированная часть колонны (фильтр) находилась между пакерами. В связи с крайне малой водоносностью пород откачка велась тарганием желонкой, только верхняя часть скважин испытывалась погружным насосом. При такой методике было получено большое количество (150) значений проницаемости пород, однако точность их нельзя назвать высокой. Длительность экспресс-откачек задавалась по условию наступления квазистационарного режима, при этом продолжительность опытов в среднем составила 7,5 ч, изменяясь от 1,5 до 46 ч. Радиус влияния таких откачек составлял первые метры и характеризовал только прискважинную зону. Это, конечно, не дало возможности оценить геофильтрационные характеристики массива в целом. Кроме поинтервальных откачек были также выполнены откачки из полных стволов оценочных скважин, а также две кустовые откачки.

Всего было выполнено порядка тысячи анализов проб, включая физико-механические и деформационные свойства монолитов, химические анализы проб пород и подземных вод.

Широкий круг вопросов, которые требовалось решить для обоснования пригодности участка Енисейский для окончательной изоляции РАО, потребовал привлечения большого числа специалистов в различных областях знаний.

Описание шлифов было выполнено профессором кафедры геологии, минералогии и петрографии Института горного дела, геологии и геотехнологий ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» А. М. Сазоновым.

Напряженное состояние массива пород изучалось специализированной организацией ООО «Центр геодинамических исследований» под научным руководством А. И. Савича.

Лабораторные определения изотопного состава и возраста подземных вод проводились методом радиоуглеродного датирования зав. лабораторией экспериментальной гидрогеологии и гидрогеомеханики Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН И. В. Токаревым под научным руководством члена-корреспондента РАН В. Г. Румынина.

Экспериментальное изучение сорбционных свойств кристаллических пород было выполнено Е. В. Захаровой из Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН.

Ландшафтные условия участка были изучены на основе дешифрирования современных материалов дистанционных съемок профессором кафедры Физической географии МГУ им. М. В. Ломоносова С. П. Горшковым.

Кроме отечественных специалистов, в отчете по оценочной стадии были использованы результаты, предоставленные в рамках программы международного сотрудничества АО «ВНИПИПромтехнологии». Математическое моделирование теплопереноса выполнил специалист компании DBE Technology GmbH М. Йобманн, а прогнозные расчеты сорбционно-миграционных процессов выполнили сотрудники компании Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) Ю. Флюгге и Й. Вольф.

Одновременно с геологоразведочными работами на участке проводились предпроектные инженерно-экологические изыскания. Эти работы позволили получить фоновые данные по состоянию природной среды участка. Были изучены химический состав атмосферы, поверхностных вод, почв, растительности, а также ландшафтная структура участка и его радиационно-экологические условия [8].

Отчет по оценочной стадии [4] был рассмотрен Государственной комиссией по запасам полезных ископаемых (ГКЗ Роснедра) в начале 2012 г. Комиссия подтвердила [9], что *«по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок „Енисейский“ является пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в архейских гнейсах Нижне-Канского массива в целевом интервале глубин 459–475 м»*. Комиссия также признала возможным строительство и опытно-промышленную эксплуатацию первой очереди объекта захоронения радиоактивных отходов участка Енисейский на двух эксплуатационных горизонтах –450 и –475 м. Участок Енисейский по степени изученности был отнесен к группе оцененных.

Помимо обязательных мероприятий по лицензированию участка и проектированию его освоения, комиссия предложила целый ряд рекомендаций по дальнейшему изучению участка, наиболее важными из которых являются:

- геологическое картирование и составление карты поверхности участка с целью наиболее точного выявления тектонических нарушений;
- более детальную высокоточную цифровую магнитную съемку по сети 25 × 5 м на участке строительства с последующей глубокой обработкой и созданием объемной модели массива;
- гидрометрические работы на р. Шумихе и оценка изменчивости стока, с целью обоснования сброса и разбавления дренажных вод.

Комиссия также рекомендовала доизучить:

- теплофизические свойства горных пород, с целью корректировки прогнозных расчетов теплопереноса;
- взаимосвязь подземных вод в районе полигона захоронения с р. Енисей.

Во время проведения оценочных работ и рассмотрения отчета в России произошли существенные изменения в сфере работы с РАО. В 2011 г. был принят Федеральный закон «Об обращении с РАО и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [10], который предусматривает обязательное захоронение РАО и создание национального оператора по обращению с РАО.

ФГУП «Горно-химический комбинат» прекратило геологоразведочные работы на участке и сдало в 2015 году лицензию на право пользования недрами. В этом же году лицензию на геологическое изучение и оценку пригодности Енисейского участка оформило ФГУП «НО РАО», которое далее и проводило все работы по геологическому изучению недр на участке, выступая в качестве их заказчика.

В 2013–2014 гг. на участке проведены инженерные изыскания для разработки проектной документации [а], значительная часть которых выполнялась для обоснования строительства наземных зданий, сооружений и линейных объектов. В работах приняли участие те же специалисты, что и на поисково-оценочных работах. На изысканиях применялся диаметр бурения HQ (96,0 мм), что позволило получить керн диаметром 63,5 мм, нормативно приемлемый для определения физико-механических свойств при изысканиях. Бурение сопровождалось теми же видами работ, которые проводились на оценочной стадии, что позволило существенным образом повысить уровень геологической изученности участка (табл. 5.1).

Кроме перечисленных в табл. 5.1 видов работ также выполнена крупномасштабная площадная магнитная съемка по сети 10×5 м на площади проектируемого сооружения (1,2 км²). Интерпретация результатов магнитной съемки с использованием программного комплекса «КОСКАД 3D» [12] выполнена в Российском государственном геологоразведочном университете. Крупномасштабная магнитная съемка позволила уточнить геолого-структурные особенности приповерхностной зоны участка, однако, ее точность и достоверность для картирования глубинных объектов нельзя признать высокой.

Также было выполнено объемное инженерно-геологическое моделирование недр Енисейского участка с использованием программного комплекса Micromine [13].

В процессе изысканий изучены состав и свойства покровных отложений, проведены GPS-наблюдения за современными движениями земной коры, а также сейсмическое микрорайонирование.

Поскольку на оценочной стадии работ были получены неоднозначные результаты по возрасту подземных вод, вызванные главным образом техническими проблемами опробования, в ходе изысканий было запланировано и проведено бурение и оборудование специальной скважины для отбора проб на датирование подземных вод. Скважина (ПР-1) пробурена в стороне от участка (см. также рис. 5.5 в подразделе 5.1.1), для исключения воздействия от откачек из поисковых и оценочных скважин. Для отбора проб воды был вскрыт целевой интервал глубин, а вся скважина над ним была гидравлически изолирована. Изотопно-геохимические исследования и часть анализов выполнены в Ресурсном центре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета. Анализы ³⁶Cl, необходимые для датирования, выполнены в лаборатории Hydroisotop GmbH (Schweitenkirchen, Германия).

Руководствуясь положительными результатами государственной экспертизы и необходимостью окончательной изоляции большого количества РАО, в Госкорпорации «Росатом» приняли решение об увеличении мощности интервала захоронения с 25 до 75 м. В соответствии с этим программа инженерных изысканий была откорректирована для дооценки дополнительного интервала глубин. Однако увеличение размеров целевого интервала глубин захоронения потребовало и проведения повторной государственной экспертизы. В связи с изложенным в 2015 г. были проведены работы оценочной стадии с целью комплексной геологической, гидрогеологической и инженерно-геологической оценки интервала захоронения радиоактивных отходов на глубинах 450–525 м (от +5 до –70 м БС) [14]. Оценка нового интервала проводилась без дополнительного объема бурения путем с использованием полевых материалов, полученных при предшествующих геологоразведочных работах и инженерных изысканиях. Государственная комиссия рассмотрела отчет по оценочной стадии [15]. Комиссия подтвердила, что «по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок „Енисейский“ является потенциально пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в объеме до 160 тыс. м³ в архейских гнейсах Нижне-Канского массива в целевом интервале глубин 450–525 метров (абс. отметки +5...–70 м БС)». Комиссия также признала возможным проведение разведки и опытно-промышленной эксплуатации объекта захоронения радиоактивных отходов на участке Енисейский. По степени изученности участок Енисейский в целевом интервале глубин 450–525 метров (абс. отметки от +5 до –70 м БС) был отнесен к группе оцененных.

Таблица 5.1 Объемы работ по изучению недр Енисейского участка при поисково-оценочных работах и инженерных изысканиях [11]

Исследования	Поиск и оценка участка (2009–2012 гг.)	Инженерные изыскания (2013–2014 гг.)
Количество глубоких скважин	14	6
Объем бурения, пог. м	7602,5	2657
Геофизический каротаж, пог. м	7575	2098
Анализы свойств горных пород	452	95
Поинтервальные откачки	150	79
Кустовые откачки	2	6
Химические анализы воды	148	93
Изотопные анализы воды	19	82
Датирование возраста воды (метод)	19 (¹⁴ C)	12 (¹⁴ C, ³⁶ Cl)

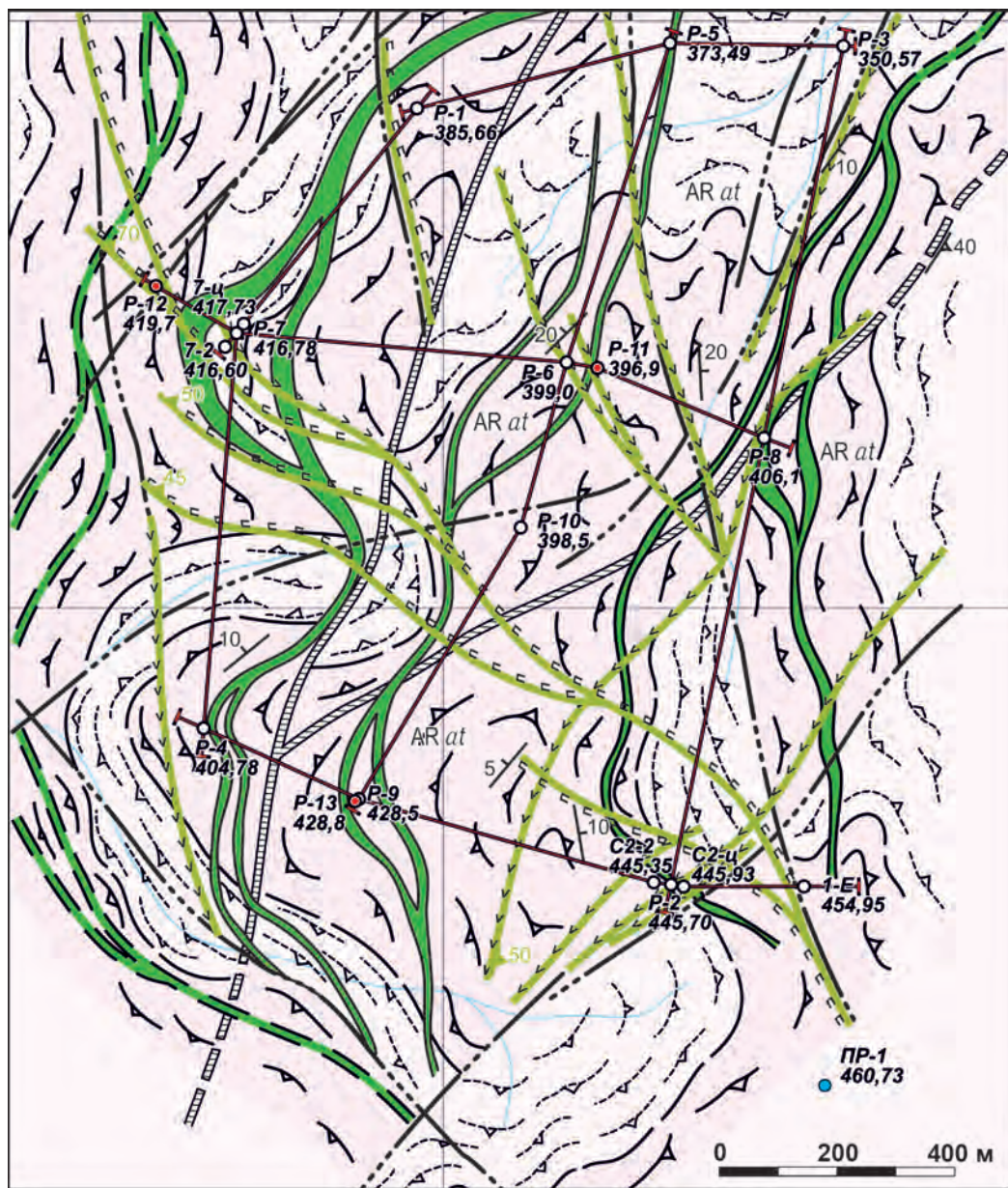


Рис. 5.5. Геологическая карта Енисейского участка по материалам геологических исследований 2009–2014 гг. (составил К. А. Заблочкин, 2015 г. [14])

Метаморфические образования атамановской метасерии раннего архея с предполагаемыми элементами гнейсовидной полосчатости пород



преимущественно мелкозернистые и среднезернистые: биотитовые и двуслюдяные гнейсы с редкими прослоями: кордиерит- и силлиманит содержащих гнейсов



преимущественно биотитовые плагиогнейсы (плагиоклаза до 45–50 %) с редкими прослоями кордиеритсодержащих биотитовых и кордиеритовых гнейсов и кристаллических сланцев, реже — гиперстен-гранатовых и гиперстен-кордиеритовых гнейсов

Докембрийские дайковые образования



комплекс регионально метаморфизованных секущих и реже послойных даек метадолеритов первого этапа внедрения



секущие дайки долеритов, габбро-диабазов (а), диабазовых порфиритов, реже — трахидолеритов (б) второго этапа внедрения

Разрывные дислокации



зоны сцементированных тектонических брекчий древнего заложения, подтвержденные данными бурения (а), предполагаемые по геофизическим данным (б)

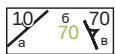


постметаморфические разрывные нарушения, трассируемые секущими дайками габбро-диабазов второго этапа внедрения с проявлениями катаклаза, милонитизации, метасоматоза и последующего внедрения линзовидно-прожилковых инъекций кальцит-кварц-полевошпатового состава



прочие разрывные нарушения, выявленные по геофизическим материалам

Прочие обозначения



Элементы залегания
а — гнейсовидной полосчатости
б — углов падения дайковых тел
в — разрывных нарушений



буровые поисковые и оценочные («разведочные») скважины с указанием номеров и абсолютных отметок устьев (2009–2011 гг.)



глубокие изыскательские скважины (2013 г.)



линии геологических разрезов



скважина для проведения экспериментально-аналитических работ по определению возраста подземных вод (2014 г.)

Экспертная комиссия ГКЗ в своем заключении по отчету дала недропользователю следующие основные рекомендации:

- уточнить геологическое строение, гидрогеологические условия и геоэкологическую обстановку на вероятных путях миграции радионуклидов;
- изучить изменчивость минерального и петрографического состава вмещающих пород на всем пути распространения загрязняющих компонентов, их геохимические и радиогеохимические природные особенности, трещиноватость и целостность массива в целом, сорбционные свойства пород;
- изучить гидрогеологические условия с детальностью, позволяющей получить обоснованные значения параметров для проведения численного математического моделирования процессов фильтрации подземных вод и миграции загрязняющих компонентов.

При этом предлагалось выполнить инженерно-геологические, инженерно-гидрогеологические, геофизические и экологические изыскания по направлению линии разгрузки потока подземных вод от объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов до р. Енисей.

Таким образом, участок, изученный глубоким бурением и сопутствующими методами, можно считать соответствующим актуализированным требованиям НП-055-14 [16], Методическим рекомендациям по обоснованию выбора участков недр Минприроды РФ для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых [2], а также рекомендациям МАГАТЭ [7] и, соответственно, пригодным для опытно-промышленных работ и для дальнейшего геологического изучения с целью окончательной изоляции РАО. Это мнение исполнителей работ по геологическому изучению участка было принято недропользователем (ФГУП «НО РАО») и получило государственную поддержку в результате трех экспертиз в ГКЗ Роснедра.

5.1. Геологическое строение и вмещающие породы*

В геологическом строении участка Енисейский принимают участие мигматизированные гнейсы и кристаллические сланцы атамановской серии канского метаморфического комплекса архея, два комплекса секущих даек основного состава позднеархейского и раннепротерозойского возрастов и современные покровные элювиально-делювиальные отложения. Коренные породы тектонически нарушены (рис. 5.5).

5.1.1. Петрографические особенности пород скального массива

Характеристика метаморфических пород канской серии (AR₁kn)

Обоснование палеоархейского возраста (3221 ± 15 Ma) канской метасерии было выполнено А. М. Сазоновым с соавт. [17] и рассмотрено в подразделе 3.4.1. Метаморфические породы (гнейсы и кристаллические сланцы) занимают примерно 4/5 геологического разреза изученного массива. Основная масса пород участка Енисейский сложена переслаивающимися светло-серыми, серыми (до темно-серых с зеленоватым и голубоватым оттенком) мигматизированными плагиогнейсами, биотитовыми, гранат-биотитовыми, силлиманит-кордиерит-биотитовыми и биотит-гиперстеновыми гнейсами, биотит-кварц-плагиоклаз-кордиеритовыми и существенно реже плагиоклаз-биотит-кварцевыми кристаллическими сланцами. Обогащенные биотитом разности пород тяготеют в основном к верхам разреза. Вниз по разрезу все больше встречаются прослои кордиерит-содержащих, силлиманит-кордиерит-содержащих и биотит-гиперстеновых плагиогнейсов и кордиеритовых сланцев с тенденцией преобладания в низах разреза последних. В этом же направлении растет и степень мигматизации пород. В отдельных случаях встречаются довольно плотные без видимой полосчатости массивные биотит-кордиеритовые сланцы мощностью до первых десятков метров с прослоями мелкозернистых биотит-микроклин-плагиоклазовых гнейсов. В количественном отношении в разрезе толщи преобладают (до 50 %) биотитовые и двуслюдяные разновидности гнейсов, а также плагиогнейсы с содержанием плагиоклаза до 55–60 % и кварца до 30–40 %. Силлиманит- и кордиеритсодержащие разности составляют 18–20%, гранат-биотитовые и гиперстеновые гнейсы до 10 %. Оставшиеся 18–20 % разреза принадлежат дайковым образованиям долеритов, габбро-диабазов и диабазовых порфиритов.

* В разделе использованы материалы из отчетов АО «Красноярскгеология», подготовленных по результатам геологоразведочных работ на участке Енисейский в 2009–2015 гг. [3, 4, 14].

Меланосома мигматизированных гнейсов и кристаллических сланцев — светло-серые, серые и темно-серые с зеленоватым оттенком реликтовой лепидо-гранобластовой микроструктуры породы, состоящие из хлоритизированного (иногда нацело) биотита (от 5 до 30 %), мусковита по биотиту (до 15—20 %), кварца (от 3 до 50 %), плагиоклаза (25—60 %), калиевого полевого шпата (до 5—10 %). В кордиеритсодержащих разностях практически повсеместно присутствует пинитизированный кордиерит (от 5 до 40 %), плагиоклаз (до 25—30 %), микроклин (до 5—25 %), реже гранат (до 5 %) и силлиманит (от 3 до 10 %). В биотит-гиперстеновых гнейсах присутствует гиперстен (5—10 %), биотит (25—30 %), плагиоклаз (30—35 %). В двуполевошпатовых гнейсах помимо плагиоклаза присутствует ортоклаз, иногда до 40 %. Кварц присутствует во всех разновидностях пород в количестве от 10 до 35 %.

Повсеместно имеются во всех разновидностях пород циркон (до 1—3 %), рутил (до 1 %), магнетит (1—5 %), иногда в рудном минерале единичные знаки шпинели. В единичном случае в хлорите встречены вроски рубина.

Документируемая по керну скважин параллельная полосчатость обусловлена различиями минерального состава. В целом по минеральному составу можно судить о сравнительно однородном составе массива с тенденцией плавного роста к низам разреза глиноземистости, магнезиальности и железистости.

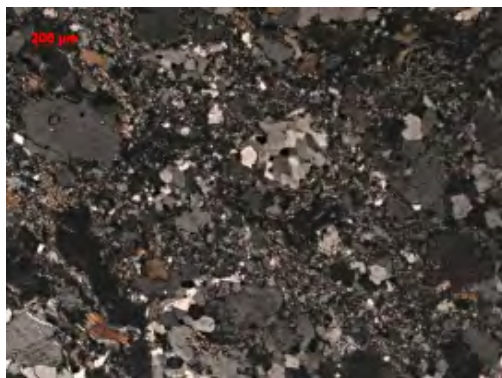
По результатам петрографических исследований практически во всех разновидностях пород встречаются реликты устойчивых критических минеральных ассоциаций (гиперстен, кордиерит, гранат и т. п.), характерных для гранулитовой фации регионального метаморфизма (рис. 5.6). В соответствии с существующей региональной легендой для карт масштаба 1:200 000 весь вскрытый скважинами разрез следует, по-видимому, отнести к образованиям атамановской метасерии канского метаморфического комплекса. Минеральные ассоциации, свойственные амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациям, появились уже в процессе регрессивного метаморфизма, связанного, соответственно, с таракской и нижнеканской гранитизациями.

Лейкосома мигматитов представлена мелко-среднезернистой породой гранитоидного состава с гипидиоморфнозернистой структурой, состоящей из биотита (1—3 %), кварца (20—25 %), плагиоклаза № 26 (40—70 %), микроклин-пертита (15—20 %), кордиерита (до 3 %), гиперстена (от единичных зерен до 3—5 %), циркона в гиперстене и биотите и равномерно распространенного рудного минерала (до 1%). Гранитоидный состав мигматитов образует полосы мощностью до 2—3 и более сантиметров. Породы линейно и линзовидно-линейно-полосчатые как за счет первичной метаморфической дифференциации вещества, так и за счет инъекционной мигматизации гранитоидным материалом таракского времени (контакт с меланосомой иногда метасоматический: в гранитах наблюдаются реликты гнейсов). В лейкосоме мигматитов встречаются гнезда трещиноватых розовых гранатов размером до 3 и более см. Характер изменения структурно-текстурных особенностей и вторичных изменений минерального состава пород участка Енисейский представлен на рис. 5.6.

Характер и степень мигматизации пород не однородны. В большей степени инъекционной мигматизации подвержены обогащенные биотитом разности, где содержание лейкосомы составляет 10—20 %, а в нижних горизонтах толщи достигает 30 и более процентов. Плагиогнейсы, кордиерит- и гиперстенсодержащие кварцитовидного облика и кварц-плагиоклазовые кристаллические сланцы слабо мигматизированы. Мигматизация их обязана в основном метаморфической дифференциации вещества.



Р-1. Глубина 474,7 м. Николи «+». Биотитовый плагиогнейс. Незначительно проявленный межзерновой катаклаз, осложняющий первичную гранобластовую структуру породы. Кварц подвержен пластическим деформациям, а плагиоклаз механическому двойникованию. Биотит рутилизирован



Р-1. Глубина 133,9 м. Николи «+». Биотитовый гнейс катаклазированный. Бетонная структура, участками проявлены сотовые новообразования кварца



Р-1. Глубина 376,7 м. Николи «+». Серцитизированный биотитовый плагиогнейс. Бластомилонитовая структура. Новообразования серицита и сотового кварца



Р-1. Глубина 420,5 м. Николи «+». Грейзенизированный биотитовый гнейс. Спутано-лепидобластовый агрегат новообразований тонкочешуйчатого мусковита субпараллельный первичной гнейсовидности

Рис. 5.6. Структурно-текстурные особенности и вторичные изменения минерального состава гнейсов участка Енисейский (скв. Р-1). Фото и описание шлифов А. М. Сазонова [17]

Регионально метаморфизованные высоких степеней метаморфизма породы в пределах участка претерпели регрессивный метаморфизм, в результате чего высокотемпературные минералы замещаются низкотемпературными. По результатам петрографических исследований шлифов выделяются два этапа проявления регрессивного метаморфизма.

Регрессивный метаморфизм первого этапа имеет площадное распространение и выразился в хлоритизации и рутилизации, а иногда и эпидотизации биотита, пинитизации кордиерита, в замещении гранатов зеленым биотитом, в мусковитизации и в серицитизации силлиманита и плагиоклазов. Диафторез второго этапа проявлялся лишь вдоль локальных зон повышенной трещиноватости. В эту стадию при сохранении текстурных и структурных особенностей первичных пород биотит полностью замещается хлоритом в ассоциации с рутилом, а также анатазом или эпидотом. Плагиоклаз замещается соссуритом. Появляются прожилки хлорита, кальцита, кварца, хлорита с кальцитом и др. постметаморфические разрывные нарушения, трассируемые секущими дайками габбро-диабазов второго этапа внедрения с проявлениями катаклаза, милонитизации, метасоматоза и последующего внедрения линзовиднопрожилковых инъекций кальцит-кварц-полевошпатового состава.

Характеристика магматических образований

Вся сланцево-гнейсовая толща пронизана дайковыми комплексами как минимум двух генераций. Первым внедрился комплекс полого залегающих и падающих на восток-юго-восток под углом от 10 до 45° даек габбро-долеритов, секущих (и реже послейных) гнейсовую толщу под углом не более 45—50° (рис. 5.7). Позднеархейский и раннепротерозойский возраст дайковых комплексов предложен К. А. Заблочким на основе анализа их условий залегания и контактов с вмещающими породами, аналогий с другими дайковыми комплексами Енисейского кряжа, однако, до настоящего времени он не был датирован абсолютными значениями возраста.

Мощность даек колеблется от первых метров до 40 м. Дайки полнокристаллические мелко- и среднезернистые, серого с зеленоватым оттенком цвета. Внедрение даек этого комплекса происходило, по-видимому, до завершения главной фазы метаморфизма атамановской метасерии, о чем свидетельствуют постепенные переходы во вмещающие породы, а также совместная с последними метаморфическая дифференциация вещества. Появились метадолериты метаморфизма высоких давлений (ортогнейсы по долеритам) с минералами высоких степеней метаморфизма (гиперстен и гранат по 5—10 %, кварц) и с гнейсовидной полосчатостью, прослеживающейся из вмещающих пород в дайковые образования. Разрывные нарушения, по которым внедрился комплекс, полностью затушеваны метаморфическими процессами.

Второй этап внедрения комплекса маломощных крутопадающих темно-серых до черных с зеленоватым оттенком мелкозернистых даек габбро-диабазов происходил по разветвленной сети тектонических трещин. Эти дайки по отношению к дайковому комплексу первого этапа являются секущими. На контактах в дайках с вмещающими породами и дайками первого этапа внедрения отмечаются зоны заделки. Завершается основной вулканизм внедрением даек диабазовых порфиритов и трахидолеритов без следов метаморфической дифференциации, внедрившихся по той же сети диагональных трещин вслед за секущими дайками габбро-диабазов второго этапа.

По химическому составу дайки метадолеритов и секущих их габбро-диабазов сходны, что свидетельствует, по-видимому, о внедрении их из единого магматического очага. После завершения регионального метаморфизма контакты даек с вмещающими породами были первично «спаянными», о чем свидетельствуют постепенные переходы во вмещающие породы. В некоторых секущих дайках сохранились реликты региональной метаморфической полосчатости, прослеживающейся от вмещающих пород через дайки в продукты гидротермально-метасоматического заполнения трещин отрыва.

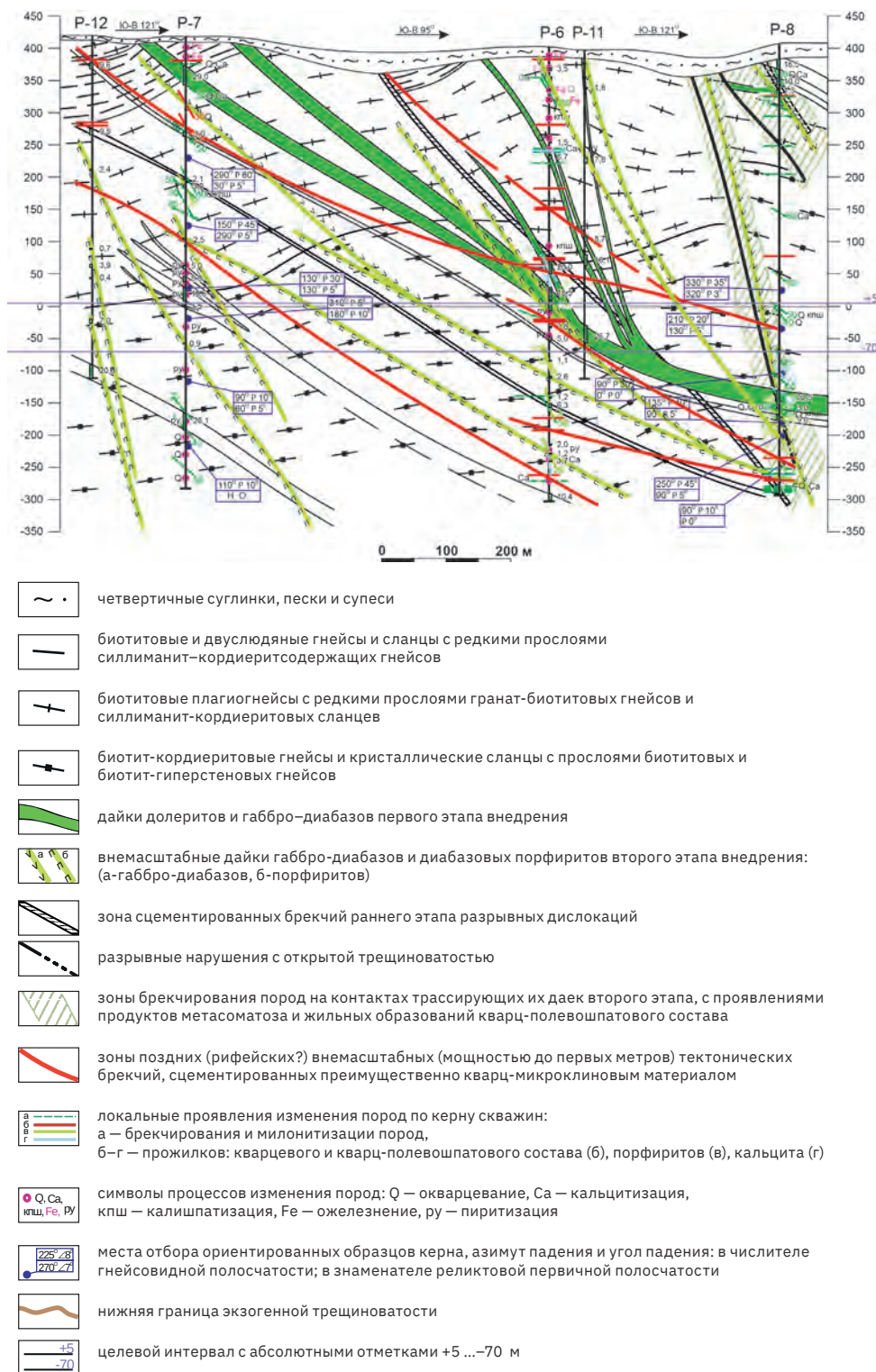


Рис. 5.7. Субширотный геологический разрез через Енисейский участок (составил К. А. Заблоцкий [14])

В современном виде дайки представлены глубоко метаморфизованными, метасоматически измененными инъекционно мигматизированными породами, зачастую превращенными в ортоамфиболиты. Обычно это породы темно-серого с зеленоватым оттенком до черного цвета, от мелко- до среднезернистых, в большинстве случаев массивные, иногда полосчатые (мигматизированные ортоамфиболиты). Во всех разновидностях даек видна реликтовая долеритовая структура. Микроструктура бластодолеритовая, бластоофитовая, бластопорфировая, в амфиболитизированных разностях — гранобластовая.

Минеральный состав пород при сравнительно однородном химическом составе в зависимости от степени вторичных изменений представлен следующими разновидностями: актинолит (5—60 %) или роговая обманка (до 40—45 %) с реликтовым диопсидом (3—35 %); плагиоклаз № 47 (20—60 %); ортоклаз до 3—5 %; гранат (2—3 %); биотит (3—5 %); кварц (3—10 %); сфен (1—5 %); реже апатит (1—3 %); эпидот (0—3 %); хлорит (0—3 %) и рудный минерал, представленный в основном магнетитом за счет выделения при замещении пироксена амфиболом. В ходе регрессивного метаморфизма в метадолеритовых амфиболитах первичный моноклинный пироксен замещается амфиболом (рис. 5.8).

В минеральном составе даек диабазовых порфиритов и трахидолеритов в качестве порфировых выделений присутствуют титанистый авгит и диопсид в количестве 10—20 %. Основная масса представлена хлоритизированным стеклом, либо серицитизированным плагиоклазом с апатитом и сфеном и рудным минералом. В качестве вторичных минералов встречается хлорит, серицит, калиевый полевой шпат, актинолит, вкрапленники карбонатов.

Свойства метаморфических пород, влияющие на безопасность ПГЗРО

Коренные образования являются литогенной основой для размещения РАО и в соответствии с принятой концепцией будущего пункта захоронения РАО формируют природный геологический барьер, препятствующий миграции радионуклидов в окружающую среду.



Р-4. Глубина 437,3 м. Николи «+». Бластодолерит. Новообразования актинолита среди реликтовой офитовой матрицы исходной породы



Р-4. Глубина 557 м. Николи «-». Гранат-роговообманковый матадолерит. Мелкозернистый агрегат граната приурочен к контактовым участкам роговой обманки и плагиоклаза

Рис. 5.8. Структурно-текстурные особенности и вторичные изменения минерального состава магматических пород участка Енисейский (скв. Р-4). Фото и описание шлифов А. М. Сазонова [17]

Характеристика **физико-механических свойств** пород вмещающего массива, образованного метаморфическими гнейсами и дайками интрузивных пород, приводится как для массива в целом, так и для отдельных стратиграфо-генетических комплексов гнейсов и долеритов (табл. 5.2). В ее основе изучение более чем 700 образцов. Объединение гнейсов и долеритов в единый массив произошло в результате регионального метаморфизма и мигматизации, спаявших породы различного состава и генезиса в единую прочную кристаллическую структуру, разделяемую на блоки поверхностями ослабления в виде трещин, зон дробления и выветривания.

Физико-механические свойства метаморфических и магматических пород практически не отличаются друг от друга и зависят только от степени метаморфизма и выветрелости пород.

В соответствии с ГОСТ 25100-2020 [18] все скальные породы по частным показателям физико-механических свойств характеризуются как очень плотные, невыветрелые, от малопрочных до очень прочных, от непористых до среднепористых, от размягчаемых до неразмягчаемых. По средним значениям породы, слагающие скальный массив, характеризуется как очень плотные, прочные, непористые, невыветрелые, неразмягчаемые. Интрузивные породы имеют несколько большие значения плотности.

Породы скального массива по пределу прочности на одноосное сжатие характеризуются как среднепрочные, прочные и очень прочные, за редкими исключениями, описанными далее. При этом они очень неоднородны по прочности на одноосное сжатие. Частные значения пределов прочности на одноосное сжатие отдельных образцов из одной пробы пород часто различаются в 1,5–2 и более раз при этом зачастую, прочность пород в водонасыщенном состоянии больше, чем в сухом. Малопрочные разности гнейсов встречены в верхней части разреза, в зоне экзогенного выветривания. Малопрочные долериты встречены в скважинах Р-9, Р-11 и Р-13 в интервале глубин от 404 до 441 м и приурочены к эндоконтам крупной дайки метадолеритов и дайкам интенсивно метаморфизованных долеритов.

Зона экзогенного выветривания прослеживается до глубин 60–96 м, где она маркируется по наличию гидроокислов железа в виде охристых налетов и корок на стенках трещин. В пределах этой зоны характерна открытая трещиноватость с подавляющим количеством трещин субпараллельно гнейсовидной полосчатости под углом 10–30° и незначительным количеством трещин под углом 60–70° в отдельных интервалах. По физико-механическим свойствам выделяется верхняя часть разреза выветрелых скальных грунтов до глубины 20–50 м, которая характеризуется несколько пониженными значениями плотности и прочности и повышенной трещиноватостью.

Ниже зоны экзогенного выветривания трещиноватость имеет тектонический генезис. Наблюдаемые в разрезе древние трещины и зоны дробления сцементированы продуктами метасоматоза карбонат-кварц-микроклинового состава и на целостность керна влияния не оказывают. Максимальная их концентрация наблюдается на контактах долеритов и гнейсов.

По углу падения выделяются четыре системы трещин: пологие (10–30°), наклонные (40–50°), крутые (60–70°), субвертикальные (более 80°). Наибольшее распространение имеют пологие и наклонные трещины, ориентированные преимущественно субпараллельно гнейсовидной полосчатости, крутые и вертикальные трещины наблюдаются только лишь в отдельных интервалах разреза.

Таблица 5.2. Физико-механические свойства пород скального массива

Показатели свойств, единицы измерения			Символ	Массив в целом	Гнейсы	Долериты	Целевой интервал
Природная влажность, %			W	0,23	0,20	0,34	0,20
Плотность, г/см ³	грунта		ρ_e	2,76	2,72	2,78	2,78
	скелета грунта		ρ_d	2,76	2,71	2,78	2,78
	частиц грунта		ρ_s	2,86	2,80	2,86	2,86
Пористость грунта, д. е.	общая		$n^{об}$	0,025	0,024	0,029	0,027
	открытая		$n^{от}$	0,011	0,010	0,014	0,015
	закрытая		$n^{зак}$	0,015	0,014	0,016	0,017
Коэффициент пористости, д. е.			e	0,025	0,024	0,027	0,028
Водопоглощение, %			W_n	0,75	0,75	0,75	0,69
Коэффициент крепости горной породы			f	6,4	6,1	7,2	6,9
Предел прочности, МПа	на сжатие	в сухом состоянии	R_{cc}	76,8	77,1	75,7	83,2
		в водонасыщенном состоянии	R_{cv}	69,0	68,6	70,4	74,5
	на растяжение		R_p	11,9	11,6	13,0	12,6
	при изгибе		R_u	28,3	29,1	25,9	31,3
Скорость волн, м/с	продольные		V_{pcp}	5542	5560	5495	5041
	поперечные		V_{scp}	2377	2401	2313	2172

Таблица 5.2. (окончание)

Показатели свойств, единицы измерения			Символ	Массив в целом	Гнейсы	Долериты	Целевой интервал
Деформационные характеристики	динамические	модуль упругости, МПа	E_g	84896	83984	88239	70660
		коэффициент Пуассона	μ	0,37	0,36	0,38	0,36
	статические	модуль упругости, МПа	E	77187	77271	76966	82957
		коэффициент Пуассона	μ	0,26	0,26	0,27	0,28
Предел прочности образца при срезе со сжатием (под соответствующими углами) τ_θ , МПа			25°	50,0	49,1	52,4	48,8
			35°	78,2	74,7	88,0	80,6
			45°	129	125	139	133
Нормальное сжимающее напряжение при срезе со сжатием (под соответствующими углами) σ , МПа			25°	23,3	22,9	24,5	22,7
			35°	54,9	52,2	62,4	56,5
			45°	129	125	139	133
Козэффициент внутреннего трения			$tg\varphi$	0,71	0,70	0,72	0,72
Угол внутреннего трения, град			φ	34,9	34,7	35,7	35,4
Удельное сцепление, МПа			c	35,6	34,8	37,8	35,2
Козэффициент водонасыщения, д. е.			K_r	0,27	0,21	0,38	0,20
Козэффициент выветрелости, д. е.			K_{wr}	0,97	0,98	0,98	0,97
Козэффициент размягчаемости, д. е.			K_{sof}	0,94	0,93	0,98	0,95

По характеру действия сил выделяются трещины отрыва и скалывания. Первые характеризуются непрямолинейными изогнутыми формами, с шероховатыми и неровными стенками, вторые — прямолинейными формами с ровными отполированными стенками, иногда со следами скольжения. К трещинам скалывания преимущественно относятся пологие и наклонные трещины, к трещинам отрыва — крутые и субвертикальные.

В большей части разреза породы слабо трещиноватые с модулем трещиноватости ($M_{тр}$) менее 5. В отдельных случаях до глубины 258 м встречаются трещиновые зоны с $M_{тр}$ более 5. В их пределах иногда отмечены зоны очень сильно трещиноватых пород ($M_{тр} > 30$) и зоны дробления до дресвы и щебня мощностью 0,1—0,3 м, редко до 1,5 м. В некоторых трещинах скалывания наблюдаются хлоритовые и карбонат-хлоритовые заполнители мощностью не более 0,5 см, в метадолеритах встречаются серпентинизированные поверхности.

Система скрытых трещин без заполнителя характерна для даек долеритов. Их наличие обнаруживается при раскалывании породы молотком. Как правило, поверхности таких трещин гладкие, хлоритизированные.

Появление техногенных трещин обусловлено вибрацией бурового снаряда, подклиниванием керна в местах развития вертикальных трещин, что приводит к образованию участков, разрушенных до щебня. Особенно это характерно для нижних частей интервала проходки и связано с отворотом корпуса кернорвателя. Диагностируются такие трещины по рваным неровным стенкам со свежими изломами.

По данным кавернометрии, в скважинах наблюдаются редкие каверны глубиной до 14 см, приуроченные к зонам повышенной трещиноватости, дробления и выветривания пород. Наибольшая часть каверн и наиболее глубокие каверны приурочены к верхней части разреза до глубины 225 м. Ниже встречаются редкие мелкие каверны, глубиной до 2—5 см.

По данным **опытно-фильтрационных работ** породы характеризуются как слабодоупроницаемые в отдельных интервалах до глубины 110 м, на остальных участках разреза породы водонепроницаемые (см. раздел 5.2).

Общее число проб для изучения **тепловых свойств** к 2013 г. составило 30 шт. Последние полученные относительно низкие значения теплопроводности (табл. 5.3) существенно отличаются от значений, полученных в начале 2000-х гг. (2,7—3,0 Вт/(м·К)). Низкие значения теплопроводности метаморфических пород, в общем, находят все большее подтверждение в современных опубликованных данных. Широкий интервал значений теплопроводности для метаморфических пород приводится в монографии «Грунтоведение» [19]: 0,22—7,4 Вт/(м·К). При изучении Кольской сверхглубокой скважины было выявлено, что увеличение степени метаморфизма от зеленосланцевой до амфиболитовой фации приводит к закономерному снижению теплопроводности пород [20].

Для подтверждения значений теплопроводности в ходе дальнейших исследований планируется натурное определение теплопроводности в массиве горных пород [21].

Характеристика покровных отложений

Четвертичные отложения образуют практически сплошной покров на поверхности Енисейского участка и являются литогенной основой его ландшафта.

Таблица 5.3. Статистические показатели результатов лабораторных определений теплопроводности и термического сопротивления в лаборатории ФГУП «ЦНИИГеолнеруд», 2013 г.

Породы	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение	Коеф. вариации
Теплопроводность λ, Вт/(м·К)					
Гнейс	0,402	1,565	0,796	0,390	0,5
Долерит	0,442	1,136	0,801	0,308	0,4
Термическое сопротивление R, м²·К/Вт					
Гнейс	0,007	0,029	0,018	0,007	0,4
Долерит	0,009	0,028	0,016	0,008	0,5

Для составления схематической карты четвертичных отложений участка Енисейский (рис. 5.9) использовались материалы, полученные в результате бурения геологоразведочных скважин и результаты вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Также были использованы данные государственной геологической съемки масштаба 1:200 000 [22]. Составление схематической карты четвертичных отложений и их расчленение производилось согласно «Методическому пособию...» [23].

Бурение разведочных скважин показало, что покровные отложения развиты практически повсеместно и характеризуются весьма разнообразной мощностью (табл. 5.4).

Максимальная мощность покровных отложений приурочена к эрозионным врезам и склонам, тогда как на водоразделах она минимальна. По результатам инженерно-геологических изысканий для строительства наземных объектов в пределах участка минимальная мощность четвертичных отложений составляет 1,3 м. В среднем мощность покровных отложений составляет 17,8 м, а в трети скважин она превысила 25 м. Это обеспечивает экранирование коренных пород от проникновения излишне большого количества атмосферных осадков.

В соответствии с представлениями авторов государственной геологической съемки масштаба 1:200 000 [22] четвертичная система в районе участка Енисейский представлена аллювиальными отложениями голоцена и нерасчлененными образованиями элювиально-делювиального генезиса.

Голоцен представлен русловым и пойменным аллювием р. Шумихи, проходящей севернее участка, и мелких ручьев, протекающих по его территории. Осадки поймы (аН) представлены суглинистыми отложениями, глинами, песками. Глинистые образования преобладают в составе аллювия на всем участке. Мощность пойменных голоценовых отложений достигает в некоторых местах 15 м.

Наибольшее распространение на территории работ получили нерасчлененные элювиально-делювиальные отложения. Они занимают практически всю площадь Енисейского участка. К ним относятся склоновые гравитационные и водно-гравитационные осадки, которые формировались на протяжении всего плейстоцена и голоцена.

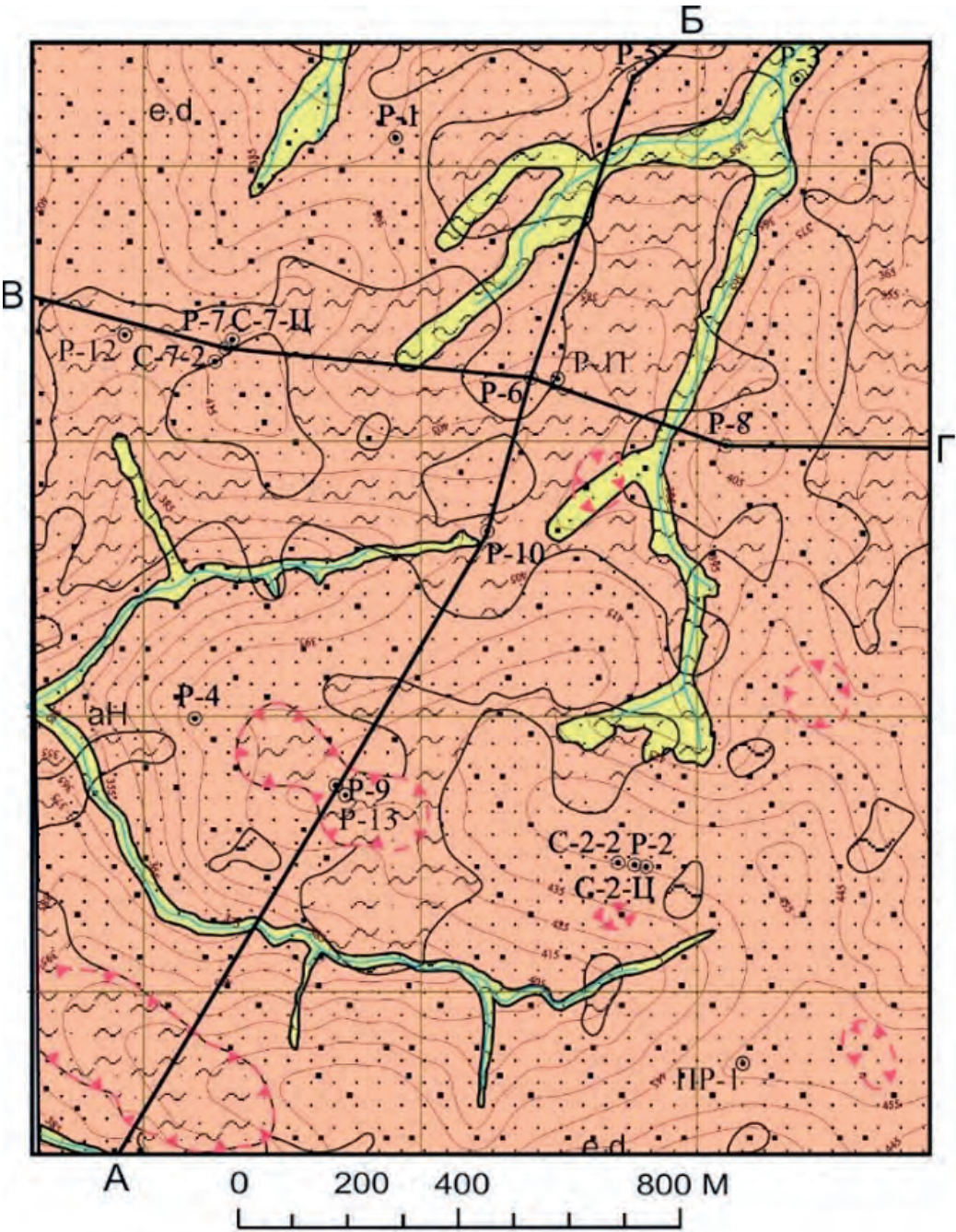
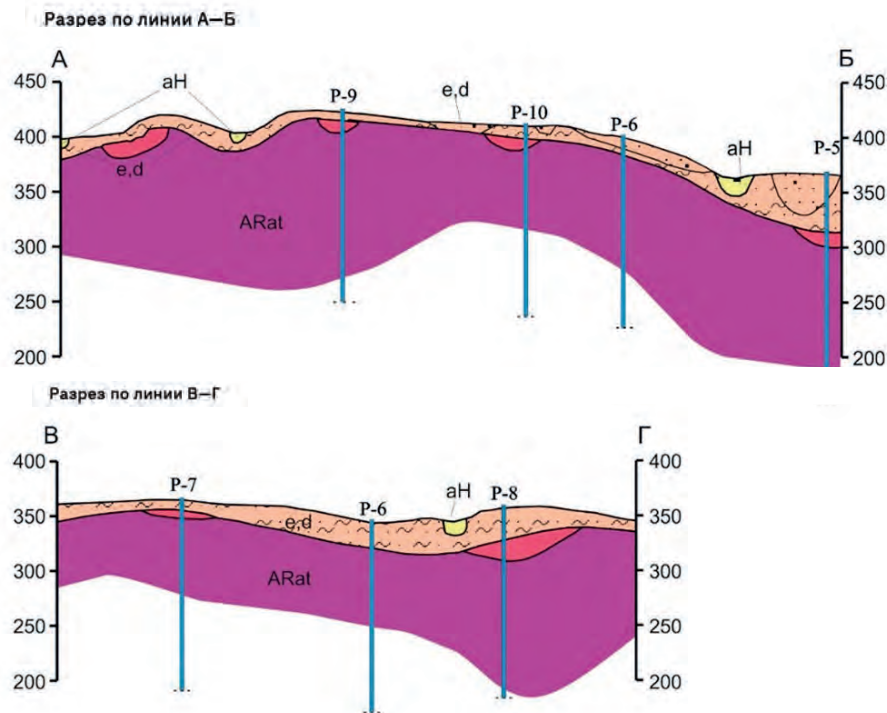


Рис. 5.9. Схематическая карта четвертичных отложений участка Енисейский



- e,d нерасчлененные элювиально-делювиальные отложения, суглинки, супеси, пески
- aH голоценовые аллювиальные отложения, суглинки, глины, пески

Литологический состав

- суглинки, глины
- супеси, пески

На разрезах

- коры выветривания на архейских породах
- ARat дочетвертичные отложения (атамановская серия раннего архея)
- P-9 поисково-оценочные скважины

Прочие обозначения

- P-9 скважины
- линия геологического разреза
- границы стратиграфо-генетических комплексов покровных отложений
- границы между литологическими составами пород
- коры выветривания, выделенные по данным геофизических исследований

Таблица 5.4. Мощность четвертичных отложений в разрезах глубоких скважин

Номера скважин	Мощность, м	Номера скважин	Мощность, м
P-1	38,6	P-11	44,9
P-2	5,7	P-12	11,0
P-3	8	P-13	12,6
P-4	4,8	ПР-1	3,1
P-5	41,3	P-11-1	33,4
P-6	14	K-1	31,0
P-7	9,1	2Ц	5,7
P-8	26,1	2-2	2,8
P-9	15	7Ц	8,5
P-10	26	7-2	13,7

По материалам вертикального электрического зондирования четвертичные отложения представлены суглинками, супесями, песками и иногда глыбами. Они слагают, как правило, водоразделы и склоны долин крутизной 5—15°. Мощность отложений варьируется в пределах 3—5 м, в некоторых местах достигая 41,3 м (скв. P-5). В северной части участка преобладают суглинки, центральная часть сложена практически в равном соотношении суглинками, супесями и песками, а на юге участка Енисейский элювиально-делювиальные отложения представлены преимущественно супесями, песками и глыбами.

Кроме чисто покровных отложений, на участке Енисейский в результате бурения геологоразведочных скважин и геофизических исследований были выявлены и закартированы структурные коры выветривания на коренных породах, мощность которых местами достигает 20,5 м (скв. P-1). Внешне, по структурно-текстурным особенностям, они похожи на коренные породы, но полностью дезинтегрированы и представляют собой суглинки, супеси, пески с включением и прослоями дресвы и щебня до 0,5—2,0 м. Обнаружены коры выветривания преимущественно в центральной части и на юге участка Енисейский. Геологический возраст и генезис кор выветривания достоверно не установлен.

5.1.2. Структурно-тектонические особенности участка

Непосредственно на участке Енисейский развиты гнейсы и кристаллические сланцы атамановской метасерии канского метаморфического комплекса, которые слагают типичный для пород такого возраста вытянутый гранито-гнейсовый купол с пологими крыльями. Ось купола, судя по материалам магнитной разведки полого погружается под углом от 5 до 20° на северо-запад. По материалам Ю. И. Парфенова [14, 24], осевая плоскость этой структуры, находящаяся за пределами участка Енисейский, в бассейне р. Кантат запрокинута на юго-запад под углом до 60°. В свою очередь, породы в пределах участка Енисейский слагают очень пологую антиклинальную складку второго порядка, ось которой фиксируется по азимуту СЗ 330 в направлении от скважины P-2 к скважине P-1.

Материалы сейсмической разведки, проведенной ОАО «Енисейгеофизика» в 2010 г. [14] [b], также подтвердили пологое погружение подошвы пород атамановской серии к северу, при этом основание серии залегает на глубинах 1800–2000 м (рис. 5.10).

Под породами атамановской серии сейсморазведчики выделили «слоистую толщу» мощностью около 2 км, которая вероятно представляет собой гнейсовую толщу раннеархейской кузеевской метасерии. Исходя из аналогий с соседними докембрийскими блоками юго-западной окраины Сибирского кратона (Дербинским, Иркутным, Китойским), глубже кузеевской метасерии, по-видимому, залегают гранулитовые тоналит-трондjemит-гранодиоритовые (ТТГ) гнейсы. В целом, сейсмические работы показали монолитную структуру участка на глубине захоронения РАО.

Под участком сейсморазведочными работами была выявлена крупная дизъюнктивная структура, залегающая на глубинах 2700–4200 м и полого падающая в северном направлении под углом 23–25°.

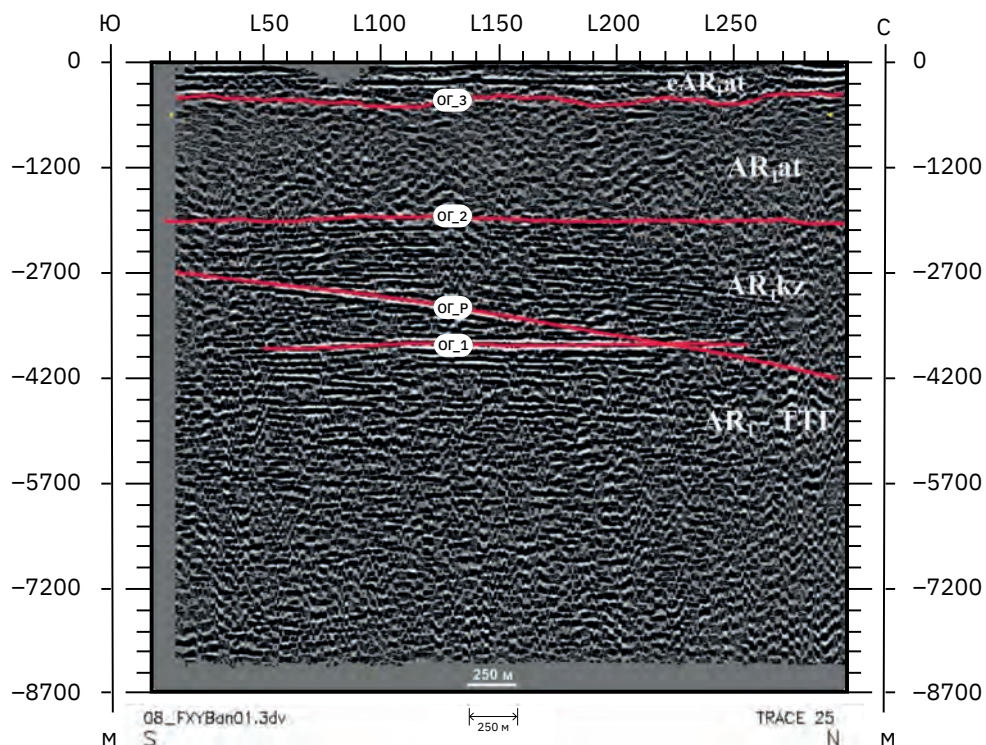


Рис. 5.10. Схематический меридиональный геолого-геофизический разрез через Енисейский участок по материалам сейсморазведки [14] [b]

eAR1at — зона разрушения в гнейсах атамановской метасерии;
 AR1at — гнейсы атамановской метасерии ниже зоны разрушения;
 AR1kz — гнейсы кузеевской метасерии;
 AR1-ТТГ — тоналит-трондjemит-гранодиоритовый комплекс ранней коры Сибирского кратона;
 ОГ-1 — отражающая граница 1; ОГ-2 — отражающая граница 2;
 ОГ-3 — отражающая граница 3 зоны разрушения; ОГ-Р — отражающая граница разлома

Уточненное представление о структурных особенностях участка было также получено в результате проведения площадной крупномасштабной магнитометрической съемки по сети 10×5 м при участии профессора Российского государственного геологоразведочного университета (РГГРУ) доктора физико-математических наук А. В. Петрова [12, 14].

Результирующие построения базируются на обработке и интерпретации данных магниторазведки методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии статистического и спектрально-корреляционного анализа данных. Созданная магнитная модель отражает относительное распределение магнитных масс в изучаемом объеме геологической среды, а модели трассирования осей аномалий несут информацию о ее структурных особенностях (рис. 5.11).

В отличие от сейсморазведки, уверенно оперирующей на больших глубинах, магнитная разведка показала небольшую глубинность, при которой интервалы глубин свыше 350 м характеризуются отрывочными полями. Тем не менее созданная магнитная модель позволила выявить существенные структурные особенности участка (см. рис. 5.11):

- верхняя часть разреза (до 50—100 м) сильно дифференцирована по магнитным свойствам пород, ее слагающих, что, скорее всего, связано с наличием осадочных пород и обломочного материала в разрезе; отмечается основное простираие структур в верхней части разреза (до 50—100 м) как северо-восточное;
- на глубинах более 100 м появляются кольцевые структуры, образованные как магнитными, так и не магнитными комплексами пород;
- практически на всех срезах фиксируется ось (синий цвет), пересекающая площадку ПГЗРО с юго-запада на северо-восток по диагонали, которая, вероятнее всего, отражает тектоническую дислокацию;
- в пределах площадки ПГЗРО также отмечается ось структуры (синий цвет) на срезах от $N=350$ до $N=350$ широтного простираия, а на более глубоких — северо-западного простираия;
- из горизонтальных срезов следует, что по мере увеличения глубины от поверхности происходит затухание тектонических дислокаций, а на проектной глубине строительства ПГЗРО наблюдается практически полное отсутствие дислокаций.

Таким образом, магнитометрические исследования показали, что кроме признанных структур северо-западного простираия, в пределах участка имеются направленные на северо-восток.

Описанные выше серии даек архей-раннепротерозойских метадолеритов внедрялись по одной из систем наиболее древних разрывных нарушений с близким к меридиональному простираию и с пологим падением на восток. Произошло их внедрение, по-видимому, на заключительной стадии прогрессивного метаморфизма. А по системе крутопадающих трещин северо-западного простираия после завершения регионального метаморфизма произошло внедрение даек основного состава второго этапа с последующим сопровождением вдоль них разновозрастных проявлений гидротермальных процессов, связанных с процессами гранитизации таракского (ранний протерозой) и рифейского (в эпоху становления нижнеканского массива гранитоидов) времен.

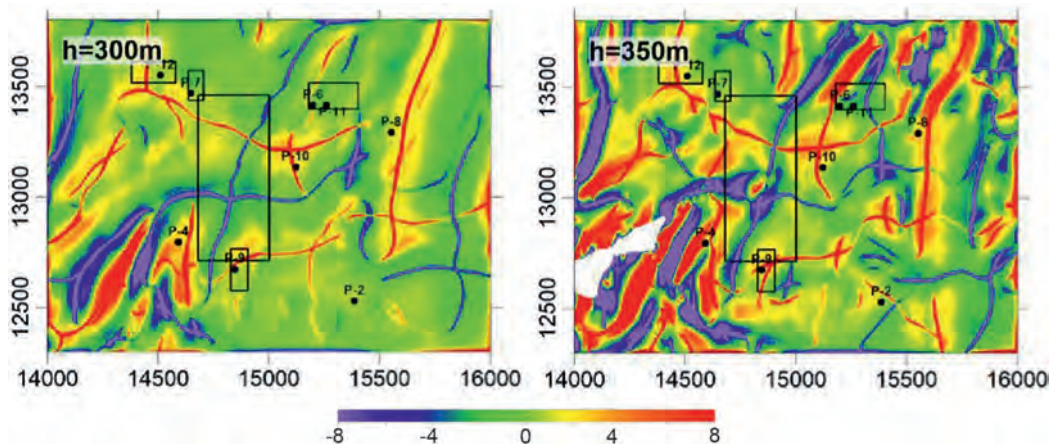


Рис. 5.11. Горизонтальные срезы глубин отметок 300 и 350 м, полученные на модели трассирования осей аномалий магнитных масс. Контуры блока размещения ПГЗРО и шахтных дворов на поверхности показаны черными линиями [14]

В результате неоднократного подновления тектонических движений не только вдоль даек второго этапа, но и в изначально монолитной гнейсовой толще появились зоны милонитизации, катаклаза и брекчирования в гнейсах с проявлением процессов калишпатизации, грейзенизации и хлоритизации пород. По этим зонам наряду с мощными палеозойскими площадными корами выветривания, сформировавшимися при выходе пород на дневную поверхность, выявляются, хотя и редкие и маломощные, линейные коры выветривания, трассирующие малоамплитудную разрывную тектонику внутри крупных блоков.

Повсеместно первичная реликтовая полосчатость вмещающих пород имеет очень пологое различно направленное падение (от горизонтального до 5–7°). Углы падения гнейсовидной метаморфической полосчатости колеблются от параллельной с первичной полосчатостью до пересечения с ней под углом до 20–40°. Крутые углы в этих случаях, как правило, контролируются локальными деформациями вдоль контактов даек и зон брекчирования, связанных с дизъюнктивной тектоникой.

Северо-восточная часть участка характеризуется присутствием зон дробления пород и тектонических разрывов с открытой трещиноватостью, а также наличием вдоль этих зон линейных кор выветривания. На остальной части площади под маломощным чехлом рыхлых четвертичных отложений развиты лишь площадные коры физического и химического выветривания с максимальной мощностью их до 40–50 м. Зоны открытой трещиноватости пород в изученной части площади ограничиваются лишь первыми десятками метров. Ниже по разрезу уже закрытая трещиноватость пород сопровождается зоны брекчирования на контактах дайковых образований. При переходе пород в горизонты плагиогнейсов и малослюдистых кордиеритсодержащих гнейсов и сланцев трещиноватость пород слабая (модуль трещиноватости от 3 до 10). Как трещины разрыва, так и трещины систем отдельности сцементированы либо дайковыми образованиями, либо продуктами метосамотоза и жильными образованиями нижнеканской гранитизации (жилы и выпоты пегматоидных гранитов, кварцевые, кварц-кальцитовые жилы иногда с сульфидами и нитевидные кальцитовые прожилки). С глубиной со снижением трещиноватости пород значительно снижается и дисперсия физико-механических свойств.

Претерпевшие высшую степень регионального метаморфизма породы толщи вместе с дайками долеритов изначально обладали высокими прочностными свойствами. Первоначально развитая система трещин отдельности была незначительной. Однако, толща от начала ее консолидации до рифейского времени неоднократно вовлекалась в режимы разнонаправленных тектонических подвижек и, прежде всего, вдоль сети подновлявшихся трассируемых дайками второго этапа разрывных нарушений.

Наиболее ранней разрывной структурой, прослеженной по магниторазведочным данным, является зона брекчирования пород, заложившаяся еще до времени внедрения дайкового комплекса. Она подсечена скважиной Р-4 в северо-восточном направлении и протягивается на север за пределы участка. Падает она на юго-восток под углом $50\text{--}70^\circ$ и подтверждается пересечениями по трем поперечным профилям зонами сцементированных гранитоидным материалом брекчий в скважинах Р-5, Р-3, Р-6, Р-8, Р-9 и по продольному профилю скважины Р-10. По этой зоне и сопутствующим ей диагональным трещинам произошли ступенчатые надвиги пород в западном направлении с амплитудой от первых десятков до сотни метров. В дальнейшем по сравнительно пологой, падающей на восток сети нарушений трещин произошло внедрение комплекса даек первого этапа внедрения, претерпевших региональный прогрессивный метаморфизм. Этими дайками плотно сцементирована сеть разрывных нарушений этого направления. Сопутствующие зоны брекчирования в процессе завершения регионального метаморфизма нацело сцементированы и дальнейшее практически безамплитудное растрескивание массива происходило только в пределах диагональных трещин.

Сеть диагональных трещин характеризуется сопутствующим внедрением даек второго этапа, секущих дайки первого этапа. Практически все эти нарушения имеют северо-восточное и более крутое — от $40\text{--}45^\circ$ до $60\text{--}70^\circ$ — падение. Лишь на крайнем юго-востоке участка скважиной Р-2 подсечен ряд даек этой генерации падающих на юго-восток под крутыми углами. Внедрились они по сети трещин, сопутствующих северо-восточному ответвлению разлома древнего заложения. Внедрение комплекса даек второго этапа сопровождалось проявлениями маломощных зон трещиноватости с последующим их цементированием продуктами нижнеканской гранитизации.

На общем фоне сравнительно выдержанных прочностных свойств пород участка разрезы по скважинам Р-10 и Р-6, вскрывших зону сближенных даек диабазовых порфиритов и трахидолеритов, характеризуются более широким диапазоном дисперсии физико-механических свойств вмещающих пород.

Серия секущих, веерообразно расходящихся к поверхности даек габбро-диабазов и диабазовых порфиритов прослеживается на глубине $147,70\text{--}314,4$ скважиной Р-7. В скважине Р-6 они фиксируются на глубине $485\text{--}615$ м, в скважине Р-10 — $207,6\text{--}326,7$ м. Истинная мощность таких даек от первых десятков сантиметров до $5\text{--}6$ м при общей зоне их внедрения до 100 и более метров, падающей под углом до 45° на северо-восток по азимуту 45° . По скважине Р-10 секущие дайки порфиритов встречены в 8 пересечениях в интервале $207,6\text{--}358,8$ м, по скважине Р-6 — в 10 пересечениях в интервале $390,0\text{--}628,8$ м. В интервале $207,6\text{--}225,5$ м по скважине Р-10 и вмещающие гнейсы и дайки интенсивно калишпатизированы.

На контактах даек отмечаются маломощные зоны трещиноватости вмещающих пород, а сами дайки во многих случаях включают в себя секущие прожилки кварц-кальцитового и кварц-полевошпатового состава. Образование прожилков связано с процессами гранитизации нижнеканского времени и сопровождалось локальным узким (вдоль контактов жил и прожилков) диафторезом как вмещающих пород, так и частично даек второго этапа внедрения. Проявление процессов серпентинизации за счет ромбического и реже моноклинного пироксена в дайках свидетельствует об участии в гидротермальных условиях углекислоты в присутствии паров воды при температуре 200–400 °С. Обычно эти процессы сменяются процессами карбонатизации, что и подтверждается наличием паутинообразных карбонатных прожилков.

Характер трещиноватости на контактах секущих даек практически ничем не отличается от таковой, встречаемой на всей площади участка. Это зоны с максимальной мощностью до первых десятков сантиметров. В большинстве случаев контакты спаянные. Однако сама зона, в пределах которой внедрился комплекс даек, характеризуется более интенсивными вторичными изменениями пород, выразившимися в повышенной степени инъекционной мигматизации пород, их катаклаза и милонитизации, грейзенизации, хлоритизации и карбонатизации. Биотит иногда нацело хлоритизирован, рутилизирован, кордиерит пинитизирован, появляется вторичный силлиманит по биотиту, кордиериту, плагиоклазу, по гранату, появляются прожилки карбонатов и калишпатов.

Дайки также иногда подвергнуты диафторезу и превращаются в актинолитовые сланцы с нацело хлоритизированными и эпидотизированными вкрапленниками и калишпатизированными плагиоклазами.

На контактах литологических разностей, в зонах дробления и по плоскостям трещин появляются маломощные налеты и зоны глиноподобного вещества, представленные хлоритизированными и пинитизированными продуктами изменения пород. Такие заполнители трещин мощностью 0,1–0,4 м встречаются в скважине Р-6 в трех интервалах до глубины 163,8 м и по 1 см в интервалах 274,3–281,4 м. Ниже горизонта целевого назначения в интервале 425,6–425,7 м встречен прослой такого материала в зоне брекчирования.

Глинисто-дресвяный заполнитель трещин мощностью до 1 см встречен в скважине Р-10 в интервале 423,8 м. В целом, интервал 423,8–427,1 м представлен выветренными почти до глинистого состояния хлоритизированными биотит-кордиеритовыми гнейсами. По данным каротажа стволы всех скважин остаются устойчивыми, встречена каверна до 120 мм в скважине Р-10 в интервале 423,9–431,2 м.

Характеристика целевого интервала

Целевой интервал, расположенный на абсолютных отметках от +5 до –70 м, охарактеризован глубокими поисково-оценочными скважинами, расположенными по его периферии. Бурение скважин глубокого заложения внутри этого блока подземного строительства не проводилось, чтобы не нарушать сплошность и проницаемость пород, представляющих естественный геологический барьер для захораниваемых РАО. Общее представление по геологическому строению и физико-механическим свойствам целевого интервала было составлено на основе интерполяции геологических материалов.

В геолого-структурном отношении целевой горизонт приурочен к полого падающему на юго-запад крылу антиклинальной складки «гнейсового купола», ось которого проходит восточнее профиля скважин Р-9 — Р-10 — Р-6, погружаясь на северо-запад под углами 10—15° (рис. 5.12).

В геологическом отношении целевой интервал слагают очень плотные, слабо трещиноватые мигматизированные, иногда окварцованные биотитовые плагиогнейсы, биотит-кордиеритовые и гранат-гиперстеновые гнейсы и кристаллические сланцы атамановской метасерии с реликтовой полосчатостью, подчеркивающей моноклинально и полого падающее на юго-запад крыло антиклинальной складки. В разрезе они чередуются между собой с преимущественным распространением в верхах биотитовых плагиогнейсов, переходя через горизонты кордиеритсодержащих разностей к гранатсодержащим и, затем, к гиперстенсодержащим разностям в основании разреза. В пределах целевого интервала плагиогнейсы составляют 25 %, кордиеритсодержащие разности — 56 % и гранат- и пироксенсодержащие разности — 19 %. Целевой интервал подстилается такими же крепкими и слабо трещиноватыми породами на глубину десятков метров.

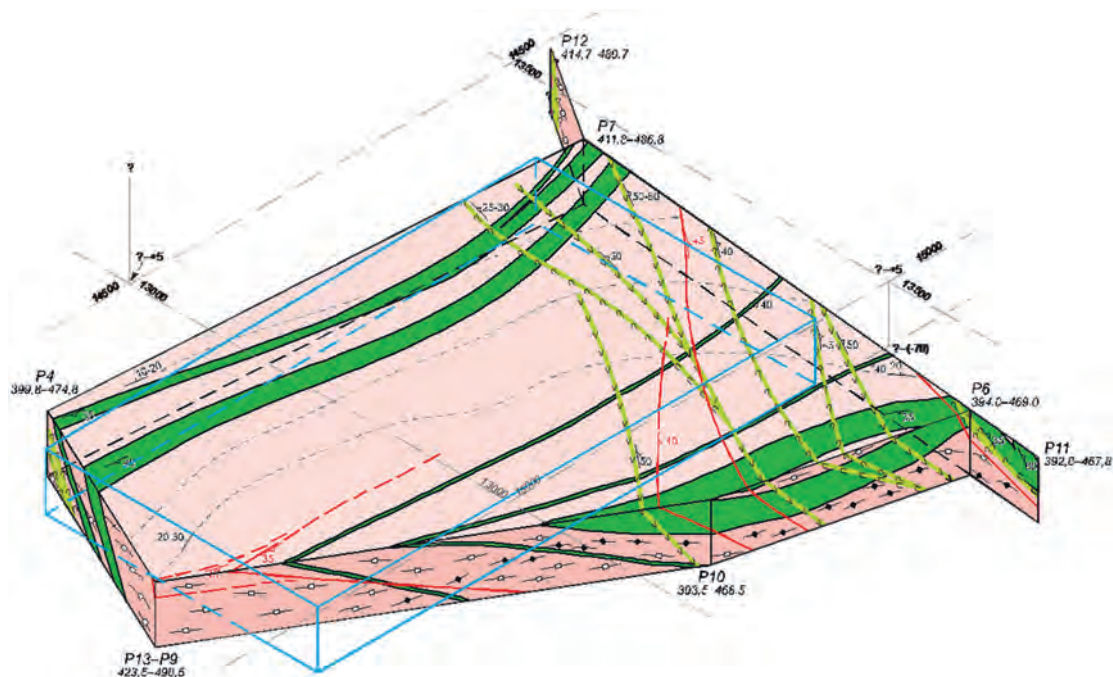
Гнейсовая толща блока прорвана дайками основного состава первого этапа внедрения мощностью от первых до первых десятков метров (секущие и послонные метадолериты) и второго этапа мощностью 0,7—2,6 м (секущие трахидолериты, габбро-диабазы, диабазовые порфиры). Контакты метадолеритов с гнейсами спаянные, на контактах секущих долеритов развиты зоны дробления и повышенной трещиноватости с проявлением процессов хлоритизации и карбонатизации в виде линз и прожилков, реже прожилкового окварцевания с редкой пиритизацией. Простирание даек метадолеритов близкое к меридиональному, падение от 20 до 45—50° восточное. Трещиноватость даек низкая, модуль трещиноватости изменяется от 2 до 5, увеличиваясь до 6—10 на участках внедрения даек второго этапа.

Секущие дайки долеритов второго этапа внедрения сопровождаются в экзоконтактах зонками дробления и иногда (скв. Р-10, Р-6) проявлениями выветривания по трещинам во вмещающих породах до глинистого состояния. Простирание секущих даек северо-западное, веерообразное, падение на северо-восток, крутое, иногда до вертикального. В контуре подземного хранилища разновидность секущих даек приурочена к северной части подземного сооружения. Из числа даек метадолеритов в контур объекта попадают лишь две дайки общей мощностью до 18 м, что составляет до 5 % от общего разреза пород целевого интервала. В гнейсах встречаются зонки дробления и милонитизации пород мощностью от первых десятков сантиметров до двух и более метров. Более поздние (постдайковые) разрывные дислокации в гнейсах и в дайках, сопровождаемые процессами хлоритизации, карбонатизации и калишпатизации (иногда с внедрением кварц-микроклиновых инъекций), приурочены преимущественно к северо-восточной части целевого интервала.

В целом, наибольшие изменения всех пород целевого горизонта приурочены к восточной части участка (скв. Р-10, Р-6, Р-11) и находятся за пределами целика, выбранного для размещения объекта. Связаны они с проявлениями вторичной разрывной тектоники в зоне влияния разлома древнего заложения.

Оценка напряженного состояния массива

Изучение напряженного состояния массива пород на участке Енисейский выполнялись ООО «Центр геодинамических исследований». Для изучения напряженного состояния пород применен ультразвуковой метод в модификации ультразвуковых исследований свежих образцов керна. Образцы пород отобраны в скважине Р-4 в интервале глубин 422—600 м.



Мигматизированные породы атамановской метасерии канского метаморфического комплекса архея

- биотитовые плагиогнейсы
- биотит-силлиманит-кордиеритовые гнейсы
- гранат-гиперстеновые и гиперстен-двоупироксеновые гнейсы

Дайковые образования основного состава

- комплекс древних даек долеритов, внедрившихся в заключительную стадию прогрессивного метаморфизма
- комплекс постметаморфических секущих даек габбро-диабазов (а), диабазовых порфиров и трахидолеритов (б) второго этапа внедрения с проявлениями последующих процессов прожилково-вкрапленной карбонатизации и калишпатизации и диафореза вмещающих пород
- немасштабные зоны разрывных нарушений и тектонических брекчий с линзами и штокверкового типа прожилками кварц-микроклинового состава
- элементы залегания:
 - а — зон разрывных дислокаций
 - б — гнейсовидности вмещающих пород
 - в — контактов дайковых и жильных образований
- линии сечения реликтовой гнейсовидной полосчатости
- номера скважин с указанием в знаменателе интервалов кровли и подошвы целевого горизонта
- аксонометрические проекции осей координатной сетки в кровле целевого горизонта + 5 м
- контур выбранного для размещения объекта целика с абсолютными отметками + 5 ...-70 м

Рис. 5.12. Блок-диаграмма целевого интервала с абсолютными отметками + 5 ...-70 м, ограниченная профилями между поисково-оценочными скважинами (составил К. А. Заблоцкий, 2015 [14])

Исследования показали, что средние значения напряжений в породах изменяются в пределах 11,5–18 МПа (табл. 5.5). Частные спады напряжений до 8–9 МПа или даже до 5,5–7,5 МПа связаны с зонами повышенной трещиноватости и брекчирования в дайках. С ростом глубины напряжения возрастают до значений вертикальной составляющей 25 МПа и горизонтальной – 20,5 МПа.

Средние величины тектонических напряжений изменяются в пределах от 8,5 до 16,0 МПа при среднем значении для всего разреза в 11–12 МПа. Указанные величины тектонических напряжений обуславливают довольно высокий уровень горизонтальной компоненты поля естественных тектонических напряжений при несколько меньшем значении вертикальной компоненты. Поскольку измерения проводились в масштабе образцов, реальные величины тектонических напряжений в массиве должны быть несколько меньше.

Геотермические условия

Геотермические условия были изучены при проведении инженерных изысканий для строительства подземных сооружений. На этом этапе изучения выполнен термометрический каротаж в скважинах Р-11, Р-12, Р-13 и ПР-1. В упомянутых скважинах термометрический каротаж был выполнен после проведения всех видов опытных работ и выстойки скважин в течение 6,5 месяцев, что отвечает требованиями РСН 75-90 [25].

Температура недр на глубине 40 м, что соответствует средней глубине нейтрального слоя (зона постоянных годовых температур), составляет 3–4 °С. На глубине целевого интервала (500–550 м) она достигает 10–11 °С. Геотермограммы, построенные по результатам термокаротажа, укладываются в прямые линии без проявления каких-либо аномалий. Прямые линии геотермограмм говорят о кондуктивном характере теплопереноса и отсутствии адвекционного влияния подземных вод.

Температурные градиенты составляют 15 мК/м для скважины Р-11, 13 мК/м – для скважины Р-12, 18 мК/м – для скважины Р-13, 14 мК/м – для скважины ПР-1. Среднее значение градиента, таким образом, равно 15 мК/м. Измеренные значения температурного градиента в общем соответствуют значениям, измеренным для подобных геологических структур [26, 27]. Близкие значения термоградиента (14–15 мК/м) были измерены в кристаллических породах Кольской сверхглубокой скважины в интервале 800–2200 м [20].

Оценка плотности кондуктивного теплового потока может быть дана лишь приблизительно, учитывая неоднозначные данные по теплопроводности пород массива. При средней теплопроводности пород 0,8 Вт/(м·К) плотность теплового потока равна 12 мВт/м², а при средней теплопроводности пород 3 Вт/(м·К) она составит 45 мВт/м². Последнее значение приблизительно соответствует плотности теплового потока по региональным данным (см. подраздел 3.4.2).

Таблица 5.5. Статистические показатели результатов лабораторных определений теплопроводности и термического сопротивления в лаборатории ФГУП «ЦНИИгеолнеруд», 2013 г.

Интервал глубин, м	Наименование пород	Составляющие напряжения, МПа		
		горизонтальная	вертикальная	тектоническая
422,0–438,5	Дайки долеритов и плагиогнейсы	15	12	12,5
438,5–526,1	Гнейсы биотит-кордиеритовые	14	12	11
526,1–536,3	Долериты	13,5	11,5	10,5
536,3–546,7	Гнейсы биотит-кордиеритовые	13	10,5	10,5
546,7–576,3	Долериты	13,5	16,5	9
576,3–582,1	Гнейсы биотит-кордиеритовые	12	13,3	8,5
582,1–600,0	Долериты	18	13	16

Подводя итоги геологического изучения, можно заключить, что в геологическом строении участка Енисейский принимают участие мигматизированные гнейсы и кристаллические сланцы атамановской серии канского метаморфического комплекса архея, два комплекса секущих даек основного состава позднеархейского и раннепротерозойского возрастов, а также современные покровные элювиально-делювиальные отложения. Коренные породы нарушены тектоническими нарушениями низких рангов.

Результаты геологических исследований 2009–2014 гг. отражены на геологической карте, разрезах и 3D-моделях и нацелены на характеристику блока размещения РАО на глубине от +5 до –70 м. В целом, гнейсовая толща блока размещения прорвана дайками основного состава первого этапа внедрения мощностью от первых до первых десятков метров (секущие и послонные метадолериты) и второго этапа мощностью от 0,7 до 2,6 м (секущие трахидолериты, габбро-диабазы, диабазовые порфириды). Контакты метадолеритов с гнейсами спаянные, на контактах секущих долеритов развиты зоны дробления и повышенной трещиноватости с проявлением процессов хлоритизации и карбонатизации в виде линз и прожилков, реже прожилкового окварцевания с редкой пиритизацией. Прости- рание даек метадолеритов близкое к меридиональному, падение от 20 до 45–50° восточное.

5.1.3. Геолого-структурная 3D-модель блока, изученного глубокими скважинами

Геолого-структурная трехмерная модель блока участка Енисейский, изученного глубокими скважинами, построена с целью:

- оценки текущей изученности геологического строения блока размещения ПИЛ;
- выявления неопределенностей в данных (проведение объемного моделирования выявляет нестыковки при интерпретации положения зон тектонической нарушенности, интрузивных и других геологических тел);
- формулировки задач (при необходимости) и количественного планирования доизучения геологической структуры (положение выработок и объем бурения).

Ввиду малой изученности геологического блока глубоким бурением для выявления неопределенностей в геологическом строении на настоящий момент используется две модели, основывающиеся на одной базе данных (БД). БД создана О. А. Морозовым и является единой для обеих моделей. Использование специализированного программного обеспечения (Micromine [13]) позволяет создавать графические объекты в объеме (т. е. трехмерными, англ.: three-dimensional, 3D) модели геологических тел, траектории скважин, инженерных сооружений и другое.

Первая 3D-модель — объемная визуализация геологических структур, выделенных К. А. Заблоцким и отраженных им на картах и разрезах по результатам оценочного и поискового этапов изучения участка и представленных в отчетах «Красноярскгеология» [3, 4, 14]. В этой модели представлена 3D-увязка дайкового комплекса, а также разрывных нарушений горных пород. В модель включена проектная привязка сооружений объекта, поверхностных зданий и сооружений.

Вторая 3D-модель создана на основе переинтерпретации данных первичной геологической документации керна буровых скважин, результатов геофизических исследований скважин и детальной площадной магнитометрической съемки [3, 4, 14]. В этой модели отражена исключительно разрывная тектоника.

В перспективе предполагается дальнейшее наполнение моделей геологическими телами и фактическими данными, полученными при проведении работ (геологическое доизучение, проходка стволов и горизонтальных выработок, эксперименты в ПИЛ).

Визуализация геолого-структурных построений К. А. Заблоцкого («Красноярскгеология»)

Этот вариант трехмерной модели является визуализацией представлений о геологическом строении участка, положенных в основу проектного облика ПИЛ (ПГЗРО); принятые проектные решения базируются именно на таком видении геологического строения участка Енисейский.

Исходными данными для построения геологической основы модели, кроме упомянутой БД, послужили геологическая карта дочетвертичных отложений масштаба 1:10 000, геологические разрезы (7 шт.), а также схема геологического строения горизонта + 5 м масштаба 1:10 000, построенные К. А. Заблоцким.

В дополнение к БД глубинного бурения в модель добавлены данные инженерно-геологических скважин, пройденных при изысканиях на площадках стволов под наземные здания и сооружения [с–f]. Из всего количества инженерно-геологических скважин (172 штуки) отобраны только те скважины, которые вскрывают коренные породы (архейские гнейсы), всего 84 штуки.

Поскольку геологические условия участка, на основании которых построена данная трехмерная геологическая модель, подробно изложены в начале гл. 5, во избежание повтора описание геологического строения здесь не приводится.

При построении модели не проводилась переинтерпретация представлений К. А. Заблочного. Это базовая «проектная» модель, которой соответствуют уже принятые проектные решения. В процессе построения происходило искажение изображения в силу наличия некоторых неувязок в исходных разрезах и картах, которые становятся заметны при привязке изображений в объеме. Однако в модели не проводилось поиска новых решений, все построено в соответствии с авторским замыслом К. А. Заблочного.

При построении модели отображались все представленные на геологической карте и разрезах разрывные нарушения и дайки за исключением секущих даек второго этапа внедрения. Увязка последних крайне неоднозначна в силу их малой мощности и протяженности (рис. 5.13). Геологические тела (разрывные нарушения, дайки) построены методом каркасного моделирования. На модели (рис. 5.14–5.18) введена единая цветовая кодировка геологических тел, расшифрованная в условных обозначениях к рис. 5.14.

Углы падения разрывных нарушений и даек взяты из разрезов; там, где проследить по картам и разрезам разрывное нарушение невозможно, падение отрисовано вертикально (тела голубого цвета).

В модели практически полностью отрисован комплекс даек первого этапа внедрения — серия мощных секущих даек метадолеритов. Как и описано в источнике [3, 4, 14], дайки полого залегают и падают на восток-юго-восток под углом от 10 до 45°, пересекают гнейсовую толщу под углом не более 45–50° (таковы максимальные углы встречи даек и оси керна). Мощность даек колеблется от первых до 40 и более метров (см. рис. 5.15). Фиолетовые тела — зоны сцементированных тектонических брекчий — наиболее ранняя разрывная структура, заложившаяся еще до времени внедрения дайкового комплекса. Она прослеживается от скважины Р-4 в северо-восточном направлении и протягивается на север за пределы участка, падает она на юго-восток под углом от 50 до 70°.

Помимо геологической структуры, модель отражает поверхность коренных пород (см. рис. 5.17) и проектную сеть подземных горных выработок и ПГЗРО (см. рис. 5.18).

Проведенная визуализация выявила наличие неопределенностей в геолого-структурных данных, которые проявились нестыковками в отрисовке части даек первого этапа внедрения и разрывных нарушений на исходных разрезах в северной части участка. Модель показала, что геологическое строение этой части блока и, по-видимому, участка Енисейский в целом является более сложным, чем сейчас представляется. Однако в части блока, определенном под размещение ПИЛ, нестыковок не отмечено.

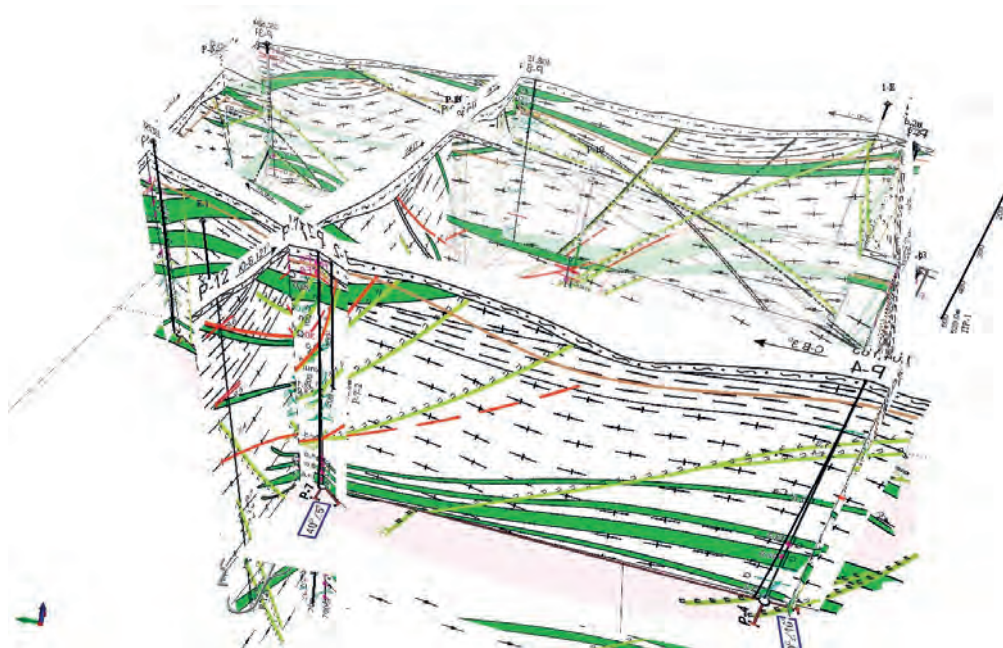


Рис. 5.13. Разрезы и карты К. А. Заблоцкого в трехмерном пространстве, составляющие основу для объемной модели

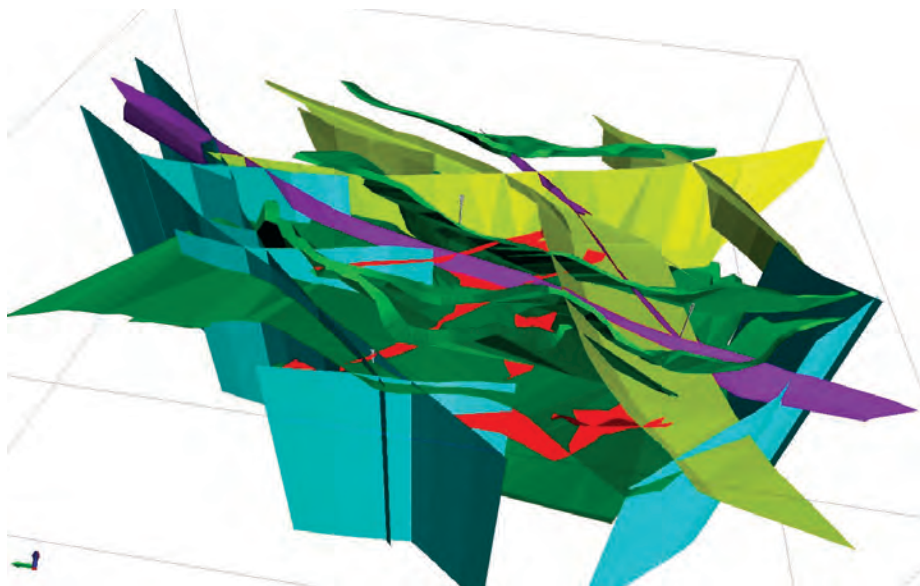


Рис. 5.14. Трехмерное представление геологических тел (даек и разломов) участка
Условные обозначения к рис. 5.14—5.18:

Красным цветом обозначены разрывные нарушения, выявленные по геофизическим материалам, которые отслеживаются по карте горизонта +5; голубым (бирюзовым) — разрывные нарушения, выявленные по геофизическим материалам, которые не отслеживаются по карте горизонта +5; желтым — постметаморфические разрывные нарушения, с проявлениями катаклаза, милонитизации, метасоматоза и внедрением линзовидно-прожилковых инъекций кальцит-кварц-полевошпатового состава; зеленым — дайки первого этапа внедрения; фиолетовым — зоны сцементированных тектонических брекчий

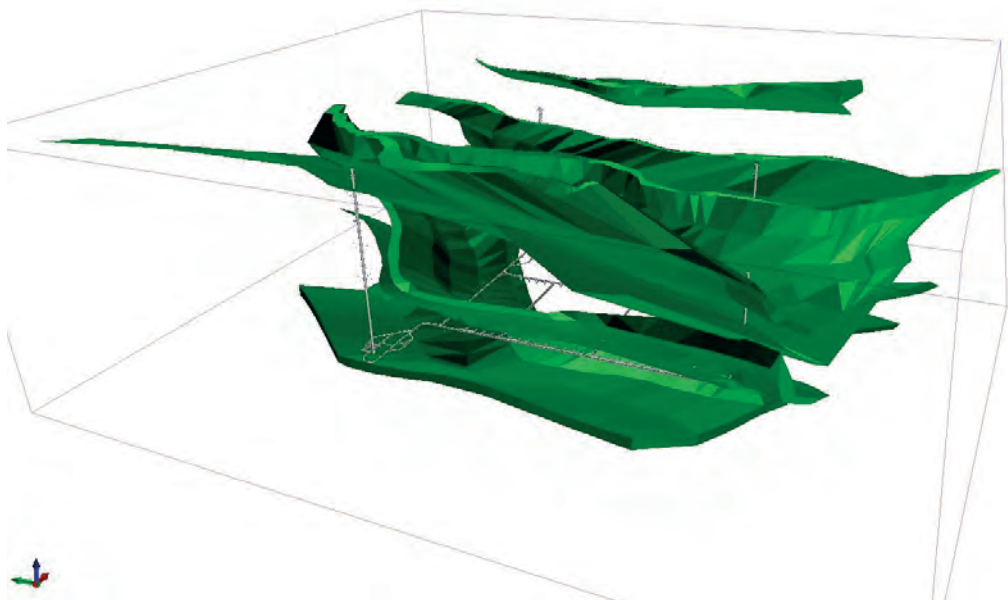


Рис. 5.15. Дайковый комплекс метадолеритов
Условные обозначения: см. рис. 5.14

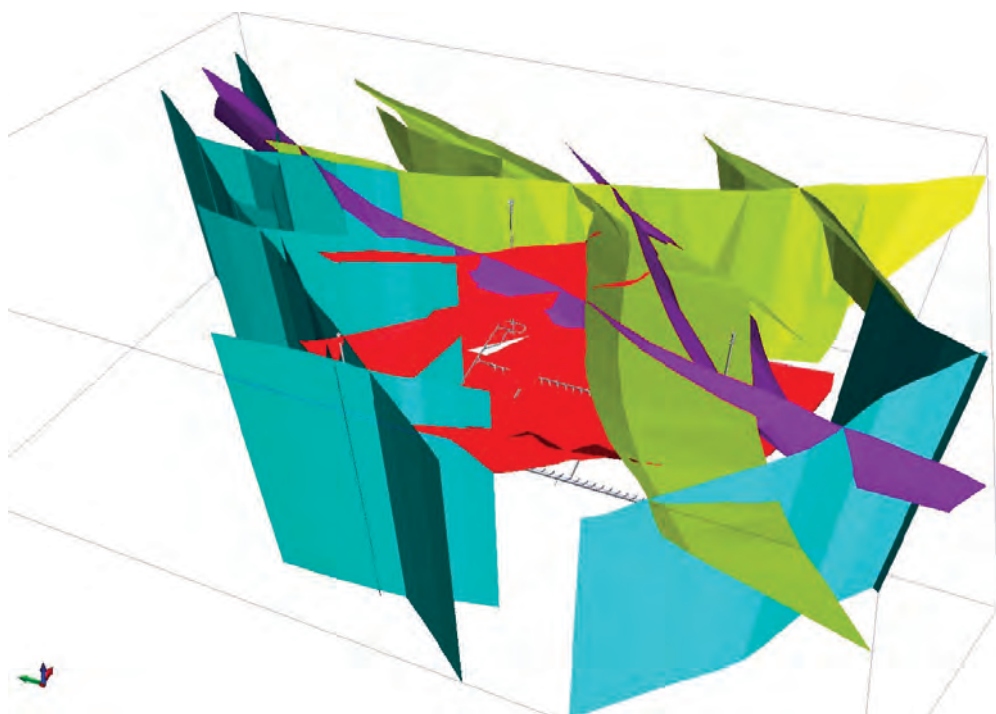


Рис. 5.16. Основные разрывные нарушения
Условные обозначения: см. рис. 5.14

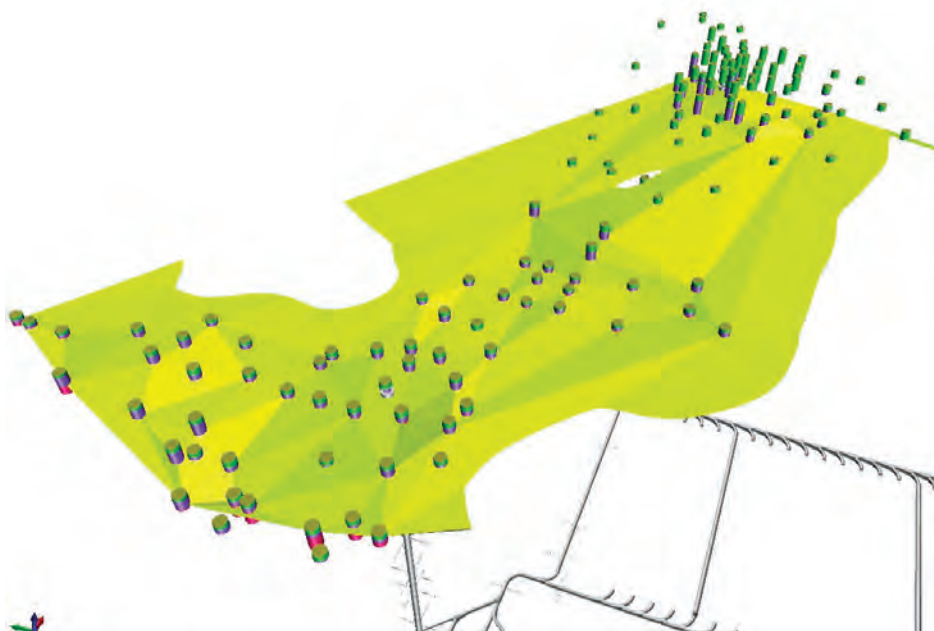


Рис. 5.17. Поверхность коренных пород (гнейсы, желтое поле), отрисованная по данным инженерно-геологических скважин (цилиндры)
Условные обозначения: см. рис. 5.14

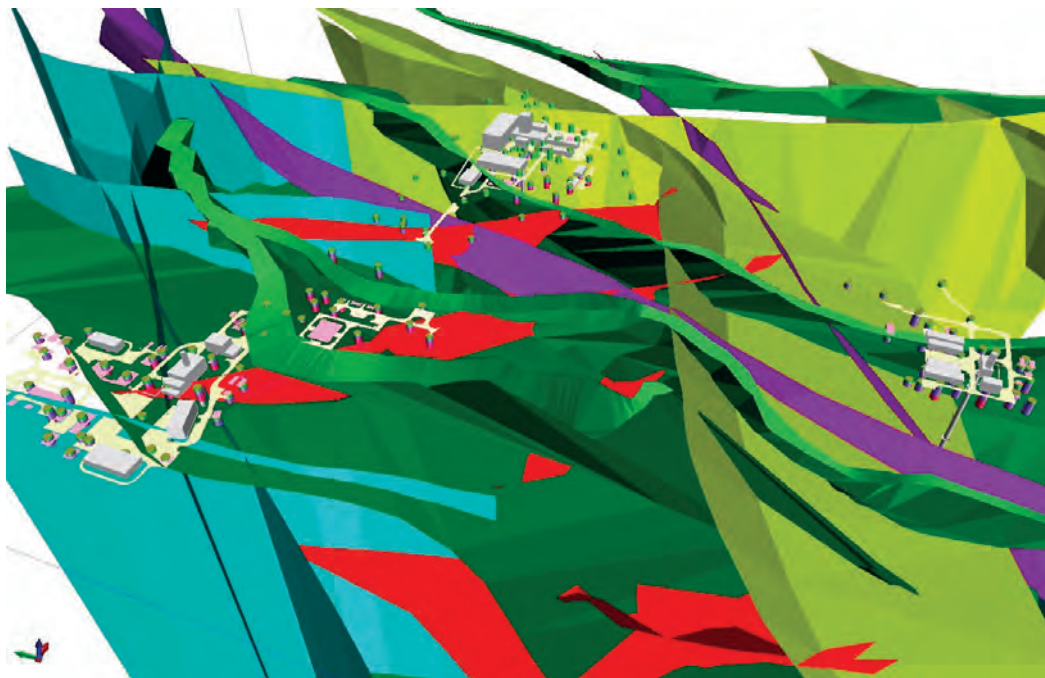


Рис. 5.18. Расположение проектируемых наземных сооружений относительно геологических тел
Условные обозначения: см. рис. 5.14

Визуализация альтернативных геолого-структурных построений

Этот вариант трехмерной геологической модели участка Енисейский построен по результатам авторской переинтерпретации данных, полученных «Красноярскгеология» в ходе поисковых и оценочных работ [3, 4, 14].

Исходный материал и методика работ были следующие. Скважины образуют редкую нерегулярную буровую сеть, образованную четырьмя ломаными профилями, ориентированными в субширотном направлении. Среднее расстояние между профилями — 513,1 м, между скважинами в профиле — 441,9 м, средняя длина профиля — 883,9 м. Учтены данные по 24 скважинам глубиной 51,0–700,3 м с общим объемом бурения 11161,1 м, средняя глубина скважины — 465,0 м. В переинтерпретации использованы данные первичной геологической документации керна, результаты геофизических исследований скважин (ГИС) — электрического, магнитного, плотностного гамма-гамма-каротажа (ГГК-П) [g, h] — и детальной площадной магнитной съемки [i] по сети 10 × 5 м с оцифровкой и анализом магнитометрических данных, а также составлением схемы их геологической интерпретации.

Составлены обновленные (относительно рис. 5.5 [14]) схематическая геологическая карта дочетвертичной поверхности масштаба 1:10 000 на площадь 3,6 км² (рис. 5.19), геологические разрезы (рис. 5.20), схема геологического строения целевого горизонта (рис. 5.21). Увязка геологических тел и структур на разрезах и в плане производилась на основании данных об углах встречи контактов тел (структур) с осью керна. Для учета в модели регионального структурного плана использованы изданные государственные геологические карты масштабов 1:1 000 000 — 1:200 000 [22, 28] и тематические исследования. Все это позволило произвести новые геолого-структурные построения и представить их визуализацию в виде элементов трехмерной геологической модели участка Енисейский [29], осуществить на этой основе геолого-структурное районирование участка на уровне целевого горизонта [j].

В ходе переинтерпретации предполагалось, что основное структурообразующее значение имеют зоны дробления (рис. 5.22). В материалах геологической документации керна скважин выделено 297 зон дробления, среди них преобладают зоны со стволовой мощностью 0,1–0,7 м. Доля более мощных зон дробления со средней мощностью 4,6 м — 20,5 %. В северо-восточной части участка выделяется линзообразное тело разрушенных пород мощностью около 30 м. В разрезе отмечается наличие участков сгущения и разрежения зон дробления, характерное для тектонических структур сколовой кинематики. Дроблением затронуты все докембрийские образования вплоть до наиболее поздних даек трахидолеритов.

В пределах изученного блока, согласно характеру распространенности, выделяются главные и второстепенные разрывные нарушения.

Главные разрывные нарушения пересекают всю площадь блока и представлены главным образом зонами дробления. К их числу относятся разломы, получившие авторские названия — Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский и Меркурьевский (рис. 5.23).

Разлом Верхнешумихинский расположен в восточной части площади, простираясь в субмеридиональном направлении вдоль верховьев р. Шумихи. Нарушение прослеживается с юга на север от скв. Р-2, Р-2-2 через скв. Р-8 до скв. Р-3. Оно простирается субпараллельно разлому Меридиональный, выделенному ранее по геофизическим данным [30] [k] в 700–1000 м восточнее (см. выше рис. 4.18). В 3D-модели разлом имеет извилистую, выпуклую в восточном направлении форму. Азимут падения изменяется от В85° до ВЮВ115°, угол падения — от 55 до 76°.

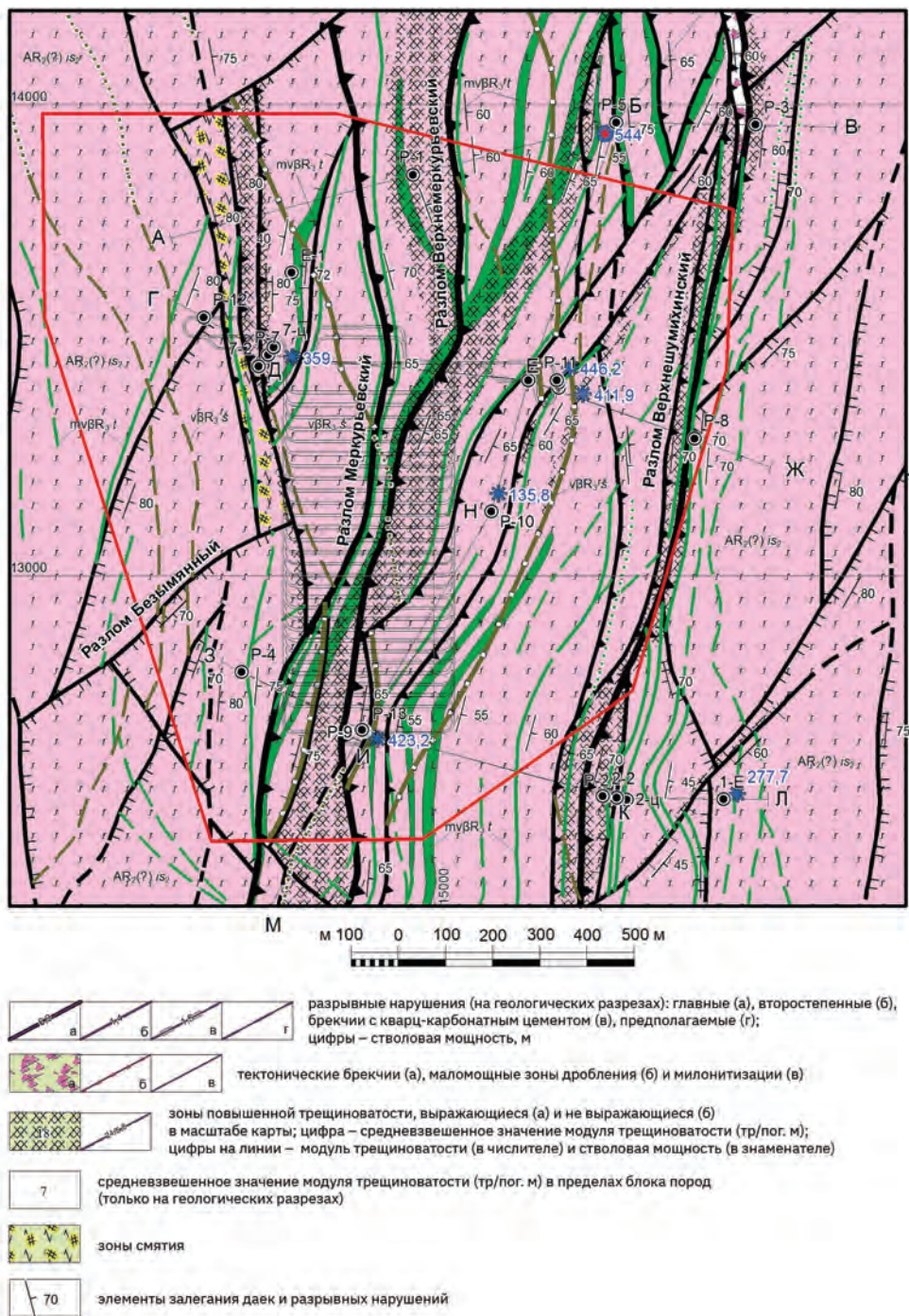
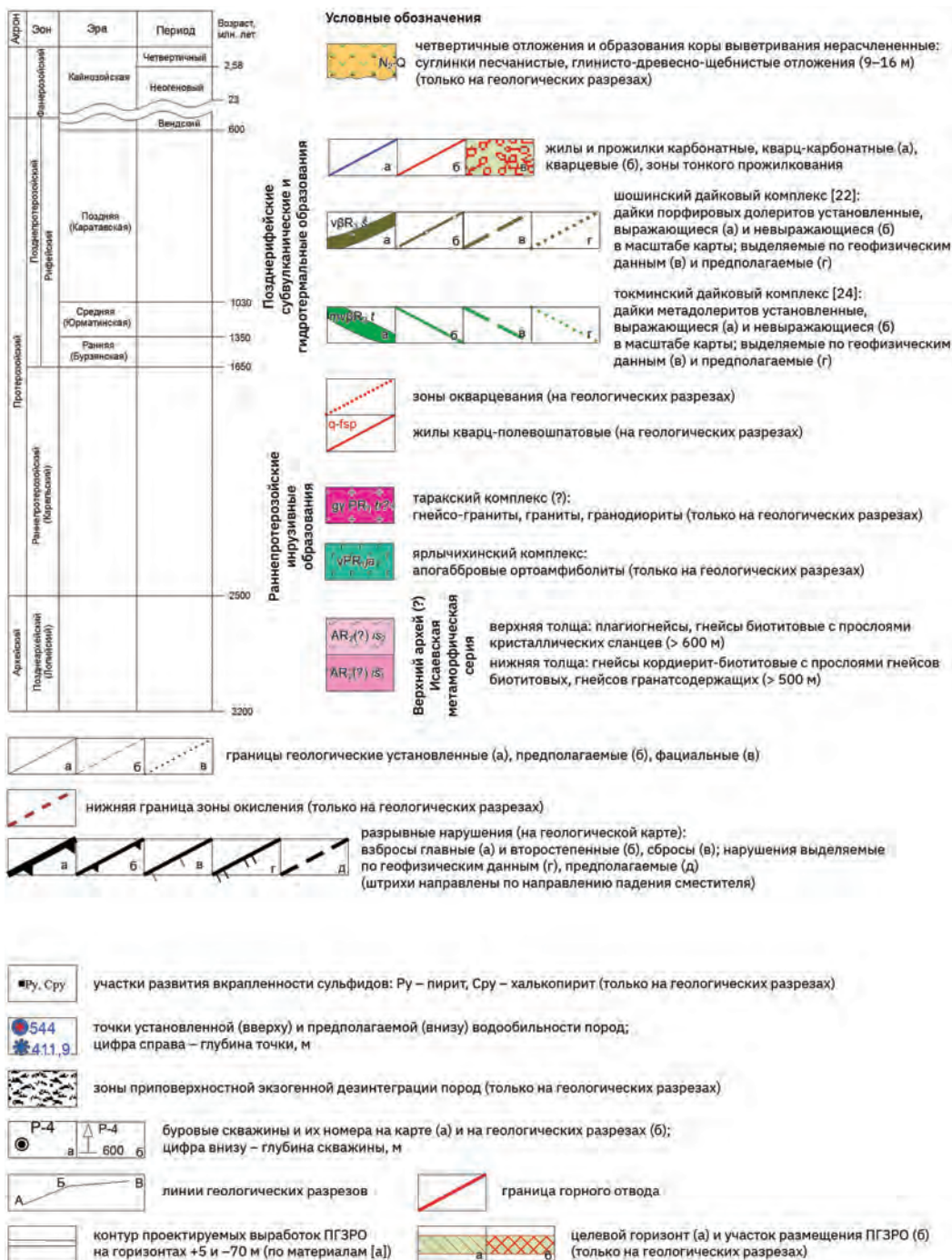


Рис. 5.19. Геологическая карта дочетвертичных образований участка (О. А. Морозов)



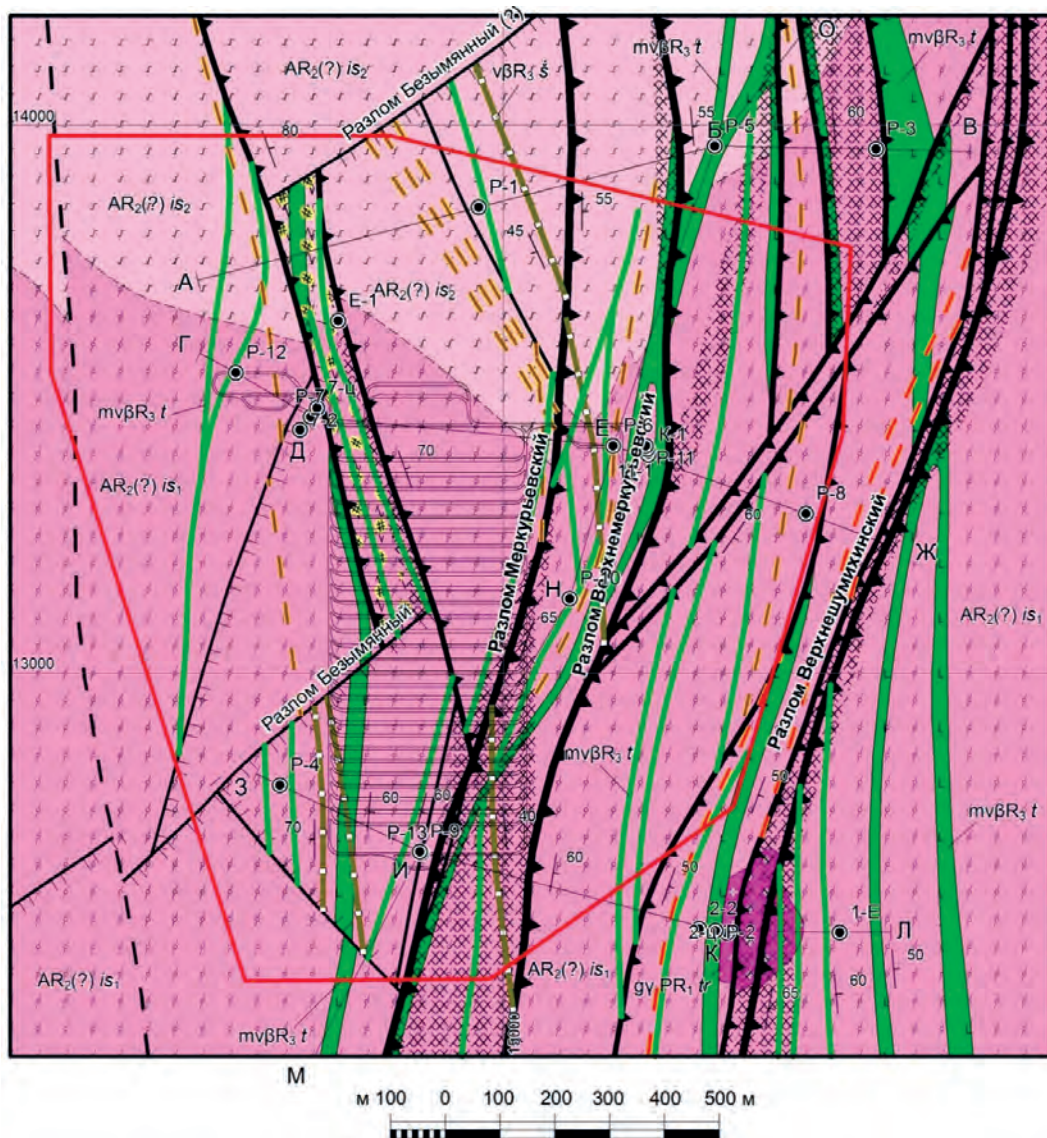


Рис. 5.21. Схема геологического строения на горизонте – 70 м (О. А. Морозов)
Условные обозначения: см. рис. 5.19



Скв. Р-6, инт. 636,4—652,2 м



Скв. Р-10, инт. 597,4—605,0 м

Рис. 5.22. Некоторые интервалы развития зон дробления в керне буровых скважин [g, k]

Разлом выражен преимущественно зоной дробления гнейсов, ортоамфиболитов, гнейсо-гранитов, метадолеритов. К зальбандам зоны приурочены участки милонитизации, иногда — рассланцевания пород. Далее в стороны от плоскости сместителя в породах развита зона повышенной трещиноватости с модулем трещиноватости до 35° тр/пог. м. Дополнительными критериями выделения разрывного нарушения выступают данные ГИС. В районе скв. Р-3 разлом в своей верхней части (до глубины 65,2 м) располагается в пределах зоны экзогенной дезинтеграции. Однако поверхности обломков пород здесь штриховато-ступенчатые, хлоритизированные, что указывает на их тектоническое происхождение. Глубокое развитие гипергенных процессов обусловлено на этом участке предшествующей тектонической переработкой пород.

Истинная мощность зоны разрывного нарушения достигает наибольшего значения в северной части площади — 37,6 м, в центральной части она уменьшается до 2,4 м, а южной вновь возрастает до 3,2 м, испытывая местами линзообразное сужение до 0,5 м, вырождаясь в зону милонитизации и рассланцевания.

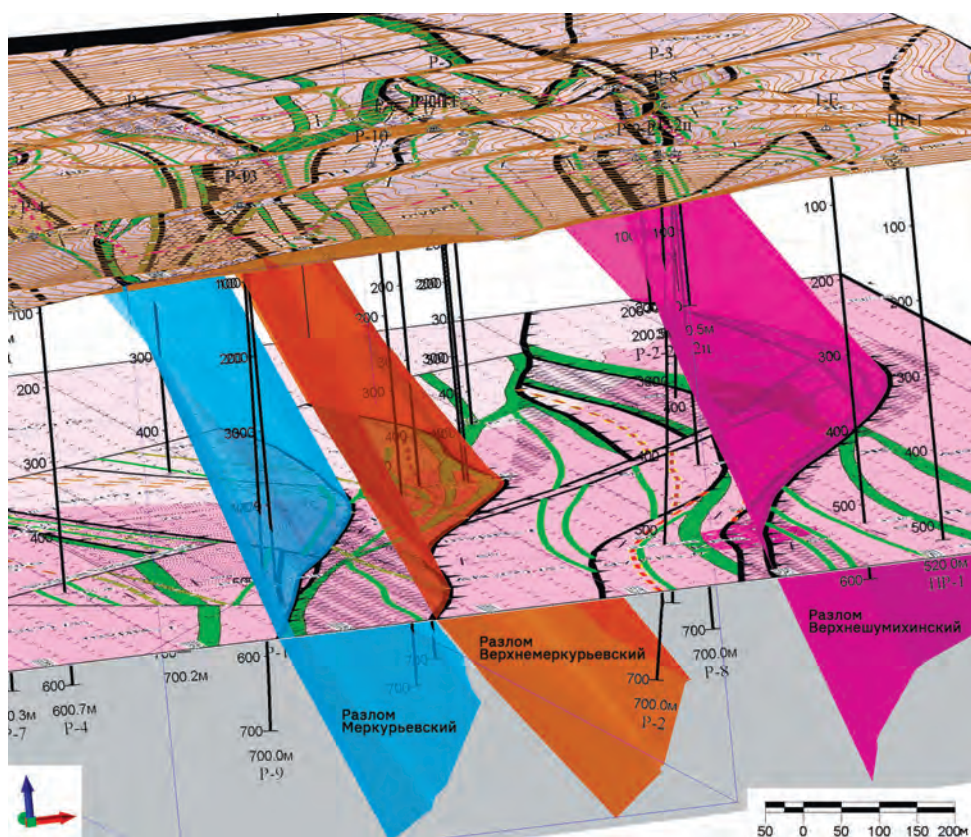


Рис. 5.23. 3D-вид главных разрывных нарушений

В состав зоны этого разрывного нарушения входят и более мелкие сопровождающие его разрывные структуры, развитые в центральной и южной частях площади. Это приводит к увеличению общей ширины разломной зоны до 50–130 м вблизи дневной поверхности и до 20–50 м на горизонте –70 м, что отвечает истинной мощности 45–120 и 18–45 м соответственно. По данным геологических разрезов по каждому из сместителей разломной зоны предполагаются взбросовые (сдвиго-взбросовые?) перемещения с амплитудой от 10 до 60 м. Суммарная амплитуда по сместителю достигает 40–95 м (вертикальная амплитуда 36–86 м, горизонтальное перекрытие — 17–40 м).

Разлом Верхнемеркурьевский расположен в центральной части площади, простираясь в субмеридиальном направлении, пересекает истоки ручья Меркурьев. Он прослеживается с юга на север от скважины P-13 через скважины P-6, P-10, P-11-1 до скважины P-5. В скважине P-9, близко расположенной по отношению к скважине P-13, соответствующие интервалы раздробленных пород не задокументированы. Причины этого не ясны.

В 3D-модели разлом Верхнемеркурьевский имеет извилистую, выпуклую в восточном направлении форму. Азимут падения изменяется от В90° до ВЮВ110°, угол падения — от 50 до 70°, поверхность сместителя выполаживается с глубиной. Разлом выражен дроблением, милонитизацией гнейсов, метадолеритов и трахи-долеритов, сопровождается развитием каверн, аномальными значениями КС (кажущихся удельных сопротивлений) и ГГК-П (объемных плотностей).

На отдельных участках выделяются брекчированные породы с сетью тонких разноориентированных карбонатных прожилков, подновленных более поздними тектоническими движениями. Истинная мощность достигает 5,6 м. Предполагаются взбросовые смещения, амплитуда которых по сместителю, по данным геологических разрезов, составляет 100–145 м, что соответствует горизонтальной амплитуде 40–60 м (перекрытие), вертикальной амплитуде 90–130 м. В связи с появлением на глубине 408,9–411,9 м (скв. Р-11) и 445,7–446,2 м (скв. Р-11-1) гидроксидов железа, а также задокументированного водопритока в скв. Р-5 (инт. 537,1–544,0 м), приуроченных к зоне разрывного нарушения, разлом Верхнемеркурьевский отнесен автором к числу водопроводящих структур.

Разлом Меркурьевский прослеживается в субмеридиональном направлении с юга на север от скважин Р-9, Р-13 через скважины Р-10, Р-6 до скважины Р-1. Он развит в гнейсах, метадолеритах и трахидолеритах и выражен дроблением, катаклазом, милонитизацией пород, кавернами, аномальными значениями физических параметров по данным ГИС. Стволовая мощность 1,6–21,0 м. По своей морфологии аналогичен разлому Верхнемеркурьевский (взброс), но характеризуется меньшей величиной перемещений по сместителю (15–30 м). В связи с развитием в скважине Р-13 гидроксидов железа на интервале 415,4–423,2 м разлом Меркурьевский также отнесен к числу водопроводящих.

К числу главных разрывных нарушений может относиться и *разлом Безымянный*, выделенный по геофизическим данным в 2005 г. и проходящий в юго-западной части площади в северо-восточном направлении вдоль ручья Меркурьев. Существующими скважинами разлом не вскрывается. Возможно, разлом продолжается в центральной и северо-восточной частях площади, где он также выделяется по геофизическим данным (см. рис. 5.19).

Второстепенные разрывные нарушения имеют северо-восточное, субмеридиональное и северо-западное простирания, незначительную протяженность и выполняют роль внутриблоковых структур (рис. 5.24). Они выделяются как по результатам геологической документации керна, так и по геофизическим данным, но прослеживаются в плане менее уверенно в связи с редкой сетью буровых скважин. Концентрация нарушений наиболее высока внутри блока, ограниченного Верхнешумихинским и Верхнемеркурьевским разломами. Нарушения северо-восточного простирания являются, по-видимому, структурами, оперяющими главные разрывные структуры. С мелкими разрывами субмеридионального простирания ассоциируют зоны смятия в гнейсах. Разрывные нарушения северо-западного простирания развиты фрагментарно, истинная мощность зон нарушений достигает 3,7 м.

Трещины развиты во всех скальных породах. В керне скважин они имеют протяженность от первых сантиметров до 1,2 м. Направление падения трещин не установлено. Выделяются три системы трещин, различающиеся величиной угла встречи по отношению к оси керна: крутопадающие трещины (угол к оси керна 0–30°), трещины среднего падения (30–60°), пологозалегающие трещины (60–90°).

Морфология всех выделенных систем свидетельствует о тектоническом происхождении и принадлежности трещин к кинематическому типу трещин скалывания. Все они характеризуются прямолинейной или слабоизвилистой формой, развитием зеркал, штрихов и борозд скольжения, глинки трения, пересекают не только гнейсы, но и прорывающие их дайковые тела. Вдоль пологозалегающих трещин местами отмечаются ступенчатые сдвиги крутого контакта метадолеритов с гнейсами (скв. Р-8, инт. 63,0–63,2 м). Вместе с тем иногда при геологической документации пологозалегающие трещины диагностировались в качестве трещин отрыва (скв. Р-13, инт. 248,5–257,7 м), что указывает на многостадийное образование трещиноватости.

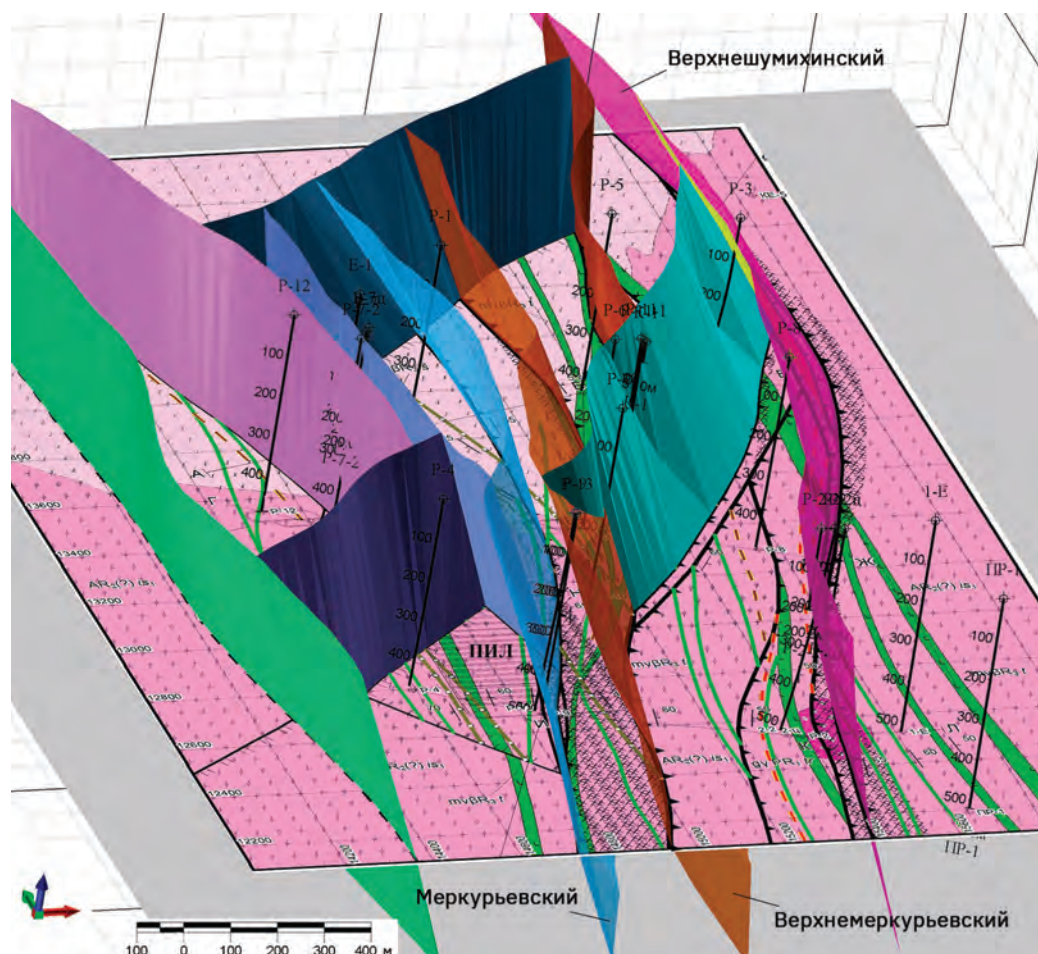


Рис. 5.24. Главные и второстепенные нарушения участка. Дневная поверхность не показана. На секущей горизонтальной плоскости показана геологическая схема горизонта (–70 м)

В отчетах [4, 14] были отмечены многочисленные «зонки выветривания», развитые вдоль трещин вплоть до глубины 669,9 м, значительно превышающей глубину подошвы зоны приповерхностного окисления. В таких зонах породы разрушены до дресвяно-глинистого состояния (скв. Р-2, инт. 264,9–270,2 м; скв. Р-11-1, инт. 383,1–397,9 м; скв. Р-1, инт. 342,5–346,2 м, 442,5–459,0 м и др.). Мощность зон 0,1–0,4 м, иногда они формируют серию зон общей протяженностью до 25,3 м. По мнению автора раздела, такие интервалы обязаны своим происхождением не экзогенным процессам выветривания, а процессам выщелачивания пород, связанным с циркуляцией подземных вод. В материалах геологической документации керна выделяется 95 интервалов проявления выщелачивания пород в 14 скважинах. Преимущественным направлением развития этих структур являются полого-залегающие трещины. Участки выщелачивания пород тяготеют к бортовым частям зон дробления.

Зоны повышенной трещиноватости (ЗПТ) выделяются по значению модуля трещиноватости — количеству трещин на 1 пог. м керна $M_{тр} > 10$ тр/пог. м. Более 35 % протяженности скважин проходит через такие зоны, в пределах которых величина $M_{тр}$ достигает 45 тр/пог. м при среднем значении 24 тр/пог. м. Выделяется 137 зон, из которых около 65 % характеризуются стволовой мощностью более 10 м при величине $M_{тр} = 21–25$ тр/пог. м. Наиболее протяженные (21,3–57,9 м) интервалы интенсивно трещиноватых пород развиты в скважинах Р-3, 4, 5, 6, 7, 7-2, 8, 9, 10, 13; максимальная величина ЗПТ (71,3 м) приурочена к интервалу 615,0–686,3 м в скважине Р-8. Ширина сближенных зон повышенной трещиноватости пород составляет 45–210 м. Зоны трещиноватости пород развиты по всему разрезу (рис. 5.25) и пространственно тесно связаны с зонами дробления, развиваясь в их крыльях. Иногда ЗПТ развиты обособленно, трассируя собой не сформировавшиеся зоны дробления.

Геолого-структурные условия размещения ПИЛ. Развитые в пределах участка разрывные нарушения и зоны повышенной трещиноватости разграничивают блоки пород, различающиеся между собой по степени тектонической нарушенности. На уровне целевого горизонта среди этих блоков достаточно условно можно выделить относительно монолитные (М), тектонически нарушенные (Т) и практически не изученные (Н) (рис. 5.26). Их доля составляет 14,9–31,0–54,1 % от площади участка соответственно.

Относительно монолитные блоки М-1 и М-2 расположены к западу от Меркурьевского разлома (примерно западнее линии, соединяющей скважины Р-1 и Р-9).

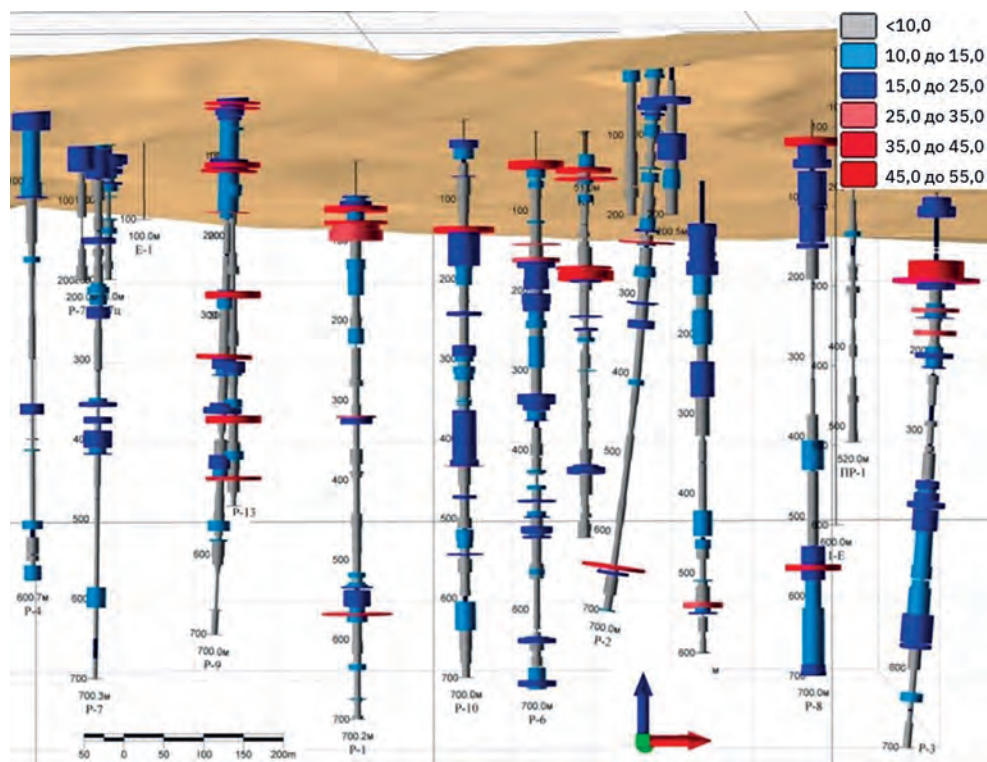


Рис. 5.25. Распределение модуля трещиноватости в породах по стволу скважин. Проекция 3D-вида на северо-северо-восток

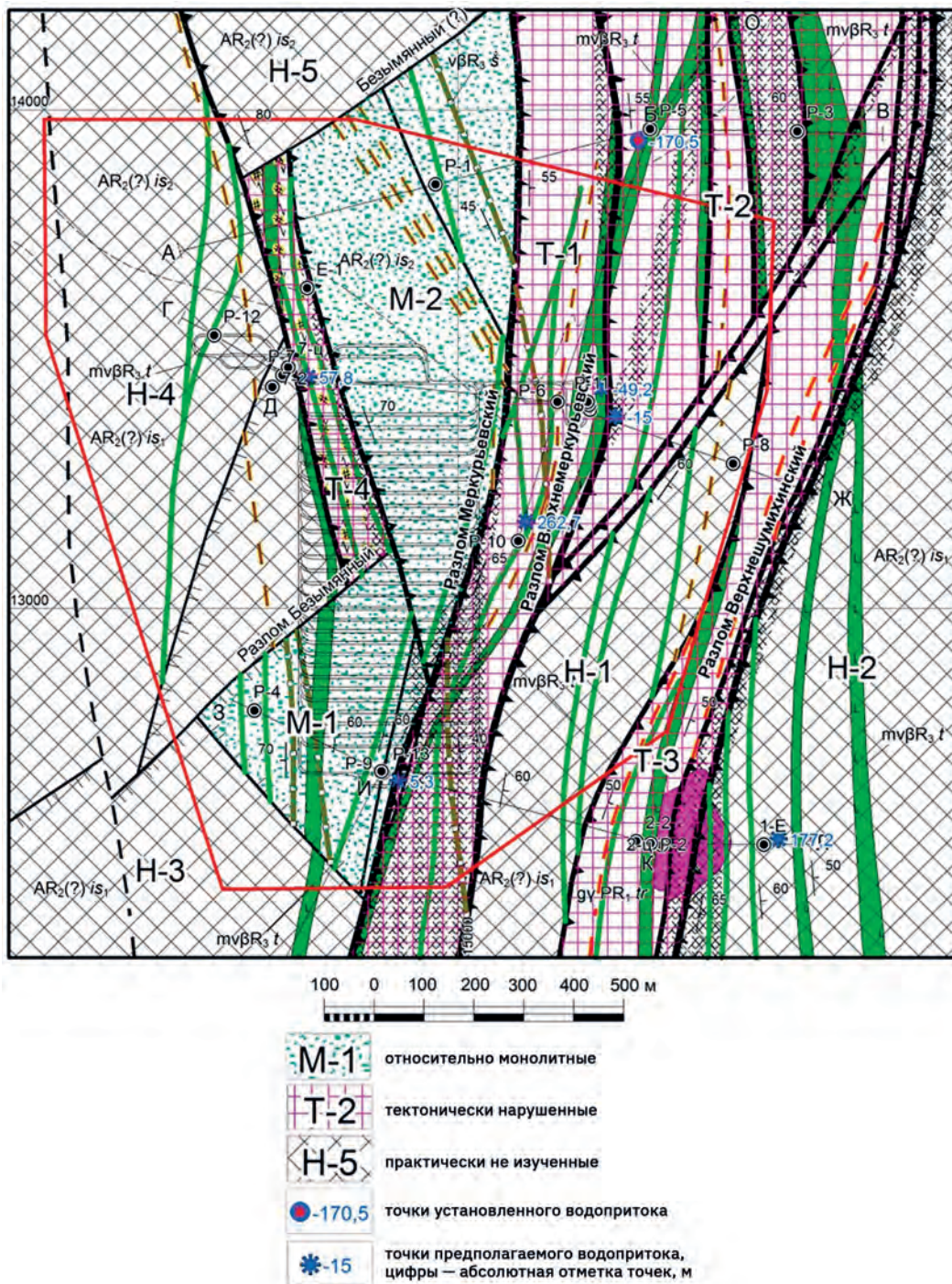


Рис. 5.26. Геолого-структурное районирование участка на горизонте -70 м (О. А. Морозов)
Остальные условные обозначения: см. рис. 5.19

Блок М-1 выделяется в южной части участка (по линии скв. Р-4 — Р-9). Он характеризуется неправильной вытянутой в северо-восточном направлении формой, имеет размер 450 × 350 м, ограничен по флангам разрывными нарушениями. Строение блока осложнено развитием разновозрастных дайковых тел и наличием участка предполагаемой циркуляции подземных вод на его юго-восточной границе в скв. Р-9 на инт. 415,4—423,2 м. В северной части этого блока скважины отсутствуют.

Относительно монолитный блок М-2 треугольной формы намечается в районе скважин Р-1, Р-6, Р-7. Он вытянут в субмеридиональном направлении на расстояние около 1000 м при ширине в средней части около 350 м. На востоке блок М-2 ограничен Меркурьевским разломом, на севере — смещенным продолжением (?) разлома Безымянный, на западе — зоной смятия с участком предполагаемой повышенной водопроницаемости в скважине Р-7 на интервале 353,8—359,0 м (блок Т-4). Внутреннее строение блока М-2 осложнено дайками и мелкими разрывными нарушениями в северной части, характеризуется недостаточностью геологических данных в центральной и южной частях, где буровые скважины отсутствуют, а расстояние между скважинами Р-7 и Р-6 велико и составляет 540 м.

Относительно монолитные блоки М-1 и М-2 занимают около 65 % площади проектируемой ПИЛ, но их геологическая изученность недостаточна, что определяет условность их выделения.

Восточная часть участка (к востоку от скв. Р-9) характеризуется сближенным расположением Меркурьевского и Верхнемеркурьевского разломов, пространство между которыми в значительной степени относится к категории зон повышенной трещиноватости, развитием более мощного и сложно построенного Верхнешумихинского разлома, второстепенных северо-восточных и субмеридиональных тектонических структур. Восточнее линии Р-3 — Р-8 — 1-Е скважины отсутствуют, что определяет полное отсутствие геологических данных о строении этих блоков. Крайние юго-западная, западная и северная части участка (блоки Н-3, 4, 5) также характеризуются недостаточностью или отсутствием прямых данных о геологическом строении недр.

В альтернативной геологической модели участка Енисейский получили отражение разрывные нарушения, зоны повышенной трещиноватости, пространственное распределение модуля трещиноватости. Главные разрывные нарушения имеют субмеридиональное простирание, пересекают весь блок, изученный глубокими скважинами, в том числе блок ПИЛ, и прослеживаются на всем интервале глубин. Второстепенные разрывные нарушения имеют северо-восточное, субмеридиональное и северо-западное простирания, незначительную протяженность и выполняют роль внутриблоковых структур. Относительно монолитные блоки на уровне целевого горизонта занимают 14,9 % площади участка или 65 % площади проектируемой ПИЛ. В пределах участка велика роль (54,2 %) практически неизученных блоков. Нерешенные вопросы геологического строения участка Енисейский предстоит выяснять на основе проведения буровых и горных работ, направленных на минимизацию имеющихся неопределенностей.

5.2. Гидрогеологические условия*

5.2.1. Общая характеристика

По стратиграфическим, петрографическим и структурным особенностям пород, величинам их проницаемости и обводненности, а также по условиям формирования, распространения и движения подземных вод на участке Енисейском выделены следующие гидрогеологические подразделения (сверху вниз):

- локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений;
- относительно водоносная зона экзогенной трещиноватости раннеархейских пород;
- условно водонепроницаемая зона раннеархейских пород.

Опытно-фильтрационные работы показали, что зоны тектонических нарушений не имеют явных отличий фильтрационных свойств по сравнению с окружающими породами. В связи с этим не возникло основание для выделения отдельного гидрогеологического подразделения, связанного с зонами дизъюнктивных нарушений.

Разделение пород по водопроницаемости принято согласно [18]: породы с коэффициентом фильтрации ниже 0,005 м/сут считаются водонепроницаемыми, а при коэффициенте фильтрации от 0,005 до 0,3 м/сут — слабопроницаемыми. Гидрогеологическая съемка на участке не проводилась, что дает возможность составить только лишь схематическую гидрогеологическую карту раннеархейских пород (рис. 5.27).

Локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений (edQ) распространен с поверхности до глубины 41,3 м. Покровные отложения не образуют выдержанного по всей площади горизонта. Постоянно они обводнены в долинах ручьев и других глубоких эрозионных врезов. Литологический состав горизонта представлен суглинками, супесями и песками с включениями дресвы и щебня. Средняя мощность покровных отложений 17,8 м. В скважине Р-10 мощность покровных суглинков равна 7,7 м, в скважине Р-6 — 14 м, в скважине Р-9 суглинки практически отсутствуют, и покровные отложения представлены элювиальной песчано-дресвяной корой выветривания. Максимальная мощность покровных отложений 41,3 м наблюдается в скважине Р-5, высокую мощность (более 10 м) отложения имеют в скважинах Р-1 и Р-8, в остальных скважинах их мощность невелика — около 5 м.

Проницаемость отложений была изучена при проведении инженерных изысканий для строительства наземных сооружений и коммуникаций шестью скважинами и четырьмя шурфами, пройденными в период зимней межени, проведением четырех откачек и 31 налива. По результатам инженерных изысканий на изучаемой площади можно выделить два типа гидрогеологического разреза покровных отложений.

Первый тип приурочен к возвышенностям и прилегающим к ним некрутым склонам. Преимущественно это маломощные (до 5 м) породы, не содержащие скоплений гравитационной воды. Обводнение здесь возникает спорадически, после таяние снега и сильных затяжных осадков, а в остальное время породы входят в зону аэрации вместе с подстилающими коренными образованиями.

* По данным [3, 4, 14].

Второй тип приурочен к склонам долин ручьев и к понижениям рельефа. Мощность рыхлых отложений на этих участках достигает 45 м. Разрез сложен суглинками, глинистыми песками, дресвой и интенсивно выветрелыми гнейсами и долеритами. В понижениях рельефа породы, как правило, обводнены. По лабораторным определениям средний коэффициент фильтрации (K_{ϕ}) в суглинках значительно выше, чем при полевых определениях проницаемости. По лабораторным определениям коэффициент фильтрации составляет 1,9–23 м/сут, по откачкам и наливам в скважины 0,004–0,82 м/сут, по наливам в шурфы 2–12 м/сут.

В меженные периоды породы второго типа обводнены локально, линзами, в основном вблизи местных понижений рельефа, а также на тех участках, где подстилающая относительно водоносная зона имеет высокие отметки уровней подземных вод. Питание горизонта происходит преимущественно за счет атмосферных осадков и, возможно, перетоков из подстилающих пород, разгрузка осуществляется в подстилающие отложения, а также в виде подземного и поверхностного стока в долинах ручьев. Воды пресные гидрокарбонатные кальциевые. Химический состав подземных вод обусловлен непродолжительным периодом фильтрации атмосферных осадков в характеризующейся зоне.

Естественная радиоактивность подземных вод горизонта находится ниже аналитической чувствительности (α -активность $< 0,01$ Бк/л; β -активность $< 0,1$ Бк/л).

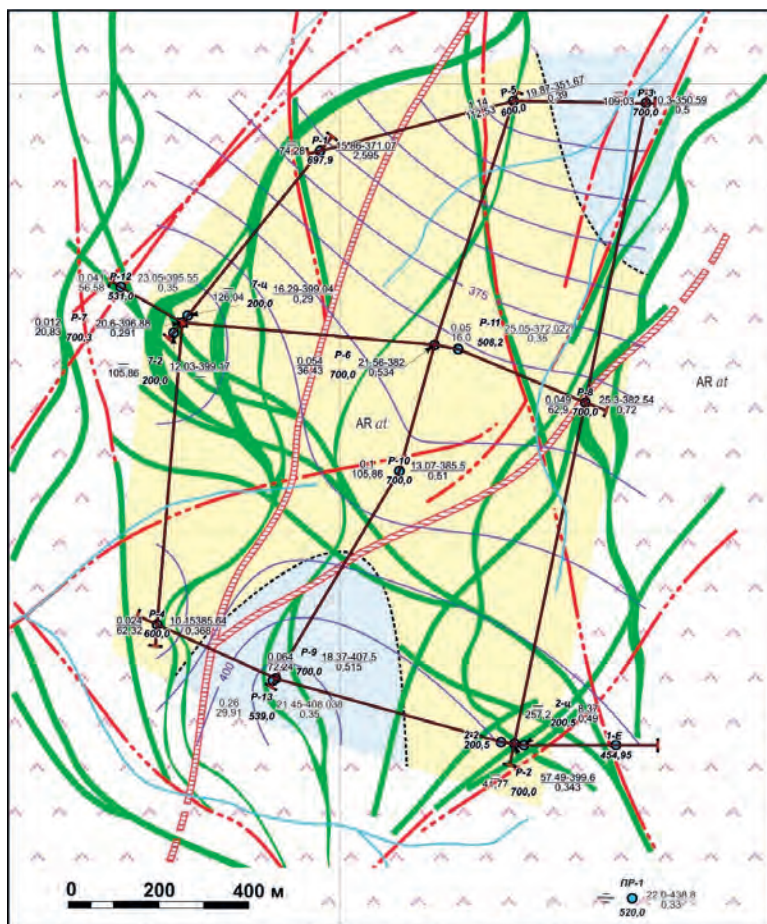
Водоносный горизонт существенного влияния на условия строительства горных выработок не окажет, так как его ресурсы крайне незначительны, и он будет сдренирован на первых этапах строительства.

Гидрогеологические подразделения в массиве коренных пород (относительно водоносная зона экзогенной трещиноватости раннеархейских пород и водонепроницаемая зона раннеархейских пород) были выделены формально, только по сложившейся традиции, принятой при изучении гидрогеологических массивов. Четких критериев, по которым можно было бы провести границу между этими зонами, не имеется. При этом водонепроницаемая зона раннеархейских пород на большей площади участка залегает первой от поверхности (рис. 5.27). Более проницаемых пород в коренных породах Енисейского участка не обнаружено [31, 32].

Выделение двух гидрогеологических подразделений (зон по степени трещиноватости) было выполнено по геолого-геофизическим материалам. Верхняя слабопроницаемая зона трещиноватости приурочена к открытой экзогенной и эндогенной трещиноватости, распространенной от поверхности до глубин 50–100 м. В обеих зонах преобладающими являются водонепроницаемые породы с коэффициентом фильтрации до 0,005 м/сут, при этом почти 70 % всех значений коэффициентов фильтрации принадлежит к интервалу значений 0,0001–0,001 м/сут (рис. 5.28).

Свой вклад в условность выделения гидрогеологических подразделений вносит низкорельеф участка. Гипсометрическое положение устьев скважин различается почти на 100 м, располагаясь в интервале высот 350–445 м. Распределение коэффициентов фильтрации в зависимости от абсолютного гипсометрического положения опробованных интервалов показывает, что единичные высокие значения K_{ϕ} , соответствующие слабопроницаемым породам с K_{ϕ} от 0,005 до 0,3 м/сут, встречаются только выше абсолютного горизонта +120 м БС. Глубже проявляется незакономерно флуктуирующий водонепроницаемый геофильтрационный «фон», значения которого не превышают 0,005 м/сут (рис. 5.29).

По-видимому, абсолютная высота +120 м БС, контролирующая появление аномально высоких значений коэффициента фильтрации, определяется гипсометрическим положением регионального базиса дренирования — русла Енисея, протекающего в 4–5 км западнее участка.



Распространение гидрогеологических подразделений и структурных элементов

- зоны слабодопроницаемых и водонепроницаемых раннеархейских пород: гнейсы, кристаллические сланцы
- дайки первого и второго этапов внедрения: метадолериты, долериты, габбро-диабазы
- зоны сцементированных тектонических брекчий древнего заложения
- постметаморфические разрывные нарушения

скважина: сверху — номер; слева в числителе — дебит, л/с; в знаменателе — понижение, м; справа в числителе — статический уровень при откачке и отметка уровня на 30.03.11 г. в знаменателе — минерализация воды, г/дм³; внизу — глубина скважины, м

Гидрогеодинамические элементы

- зона слабодопроницаемых пород, коэффициент фильтрации более 0,005 м/сут
- зона водонепроницаемых пород, коэффициент фильтрации менее 0,005 м/сут
- гидроизогипсы, число — абсолютная отметка, м

Прочие знаки

- граница зон различной проницаемости
- линия гидрогеологического разреза

Рис. 5.27. Схематическая гидрогеологическая карта (составил В. А. Караулов, 2015 [14])

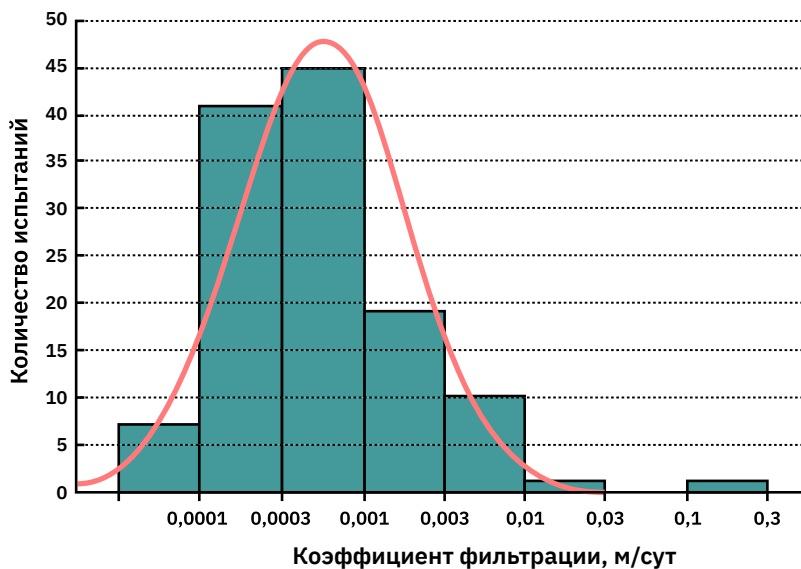


Рис. 5.28. Гистограмма распределения коэффициента фильтрации [31, 32]

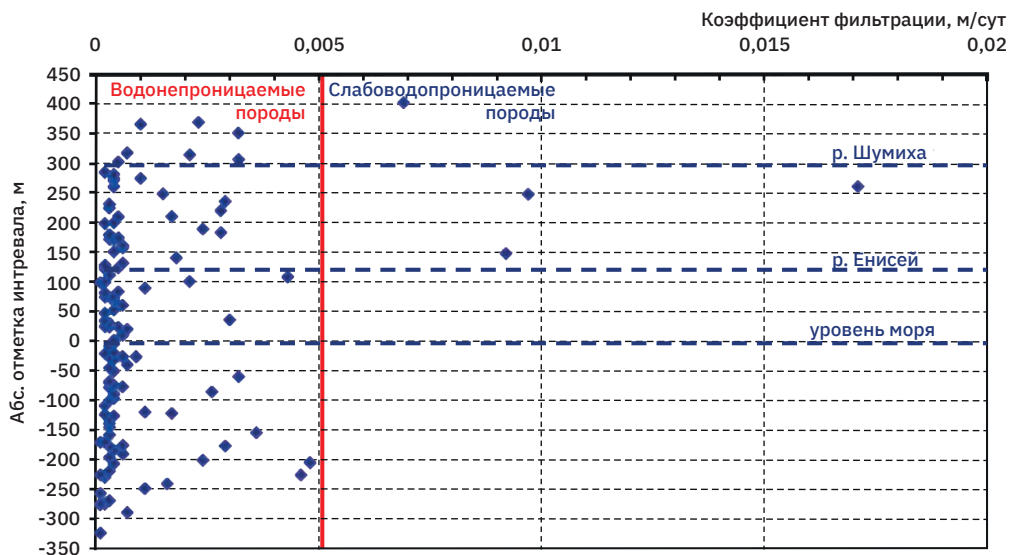


Рис. 5.29. Распределение коэффициентов фильтрации в зависимости от гипсометрического положения интервалов глубин [31, 32]

Местный базис дренирования для участка Енисейского (р. Шумиха), имеющий абсолютную отметку + 300 м БС, соответствует отметкам выхода небольших рек и ручьев (притоков Енисея) за пределы участка.

5.2.2. Результаты опытно-фильтрационных работ

Анализ распределения коэффициентов фильтрации в зависимости от высотного положения опробованных интервалов позволяет выявить закономерности в высотной поясности коэффициентов фильтрации. Верхний пояс, расположенный выше местного базиса эрозии, характеризуется самыми высокими средними и медианными значениями коэффициента фильтрации, его однородным распределением, наличием слабоводоносных пород (K_f более 0,005 м/сут). Для среднего пояса, расположенного между местным и региональным базисами эрозии (300–120 м), характерно существенное снижение среднего и медианного значений коэффициента фильтрации, его неоднородное распределение и наличие слабоводоносных пород. В двух поясах, расположенных глубже регионального базиса эрозии, происходит стабилизация распределения коэффициента фильтрации до приблизительно одинаковых средних, медианных, минимальных и максимальных значений, все породы в этих поясах относятся к водонепроницаемым (табл. 5.6). Уровнепроводность в верхнем поясе составила 1620 м²/сут, в среднем — 5×10^4 м²/сут.

Таким образом, высотная поясность массива пород проявляется в закономерном снижении коэффициентов фильтрации до уровня, соответствующего региональному базису эрозии. Формирование повышенных коэффициентов фильтрации в верхнем и среднем поясах массива вероятно происходит по системе открытых трещин под влиянием инфильтрации атмосферных осадков (см. табл. 5.6).

При поинтервальном опробовании в скважинах основные петрографические разности пород (гнейсы и метадолериты) опробовались суммарно. Различия в их фильтрационных свойствах были выявлены при лабораторных исследованиях (табл. 5.7). Первым существенным различием между этими породами является различная открытая пористость. Все породы изученного массива обладают очень низкими значениями открытой пористости, ни в одном случае не превышающими 1 %. Но по средним значениям открытая пористость гнейсов (0,35 %) почти в 1,5 раза выше пористости метадолеритов (0,25 %). Хотя поровые подземные воды и занимают менее 0,5 % от объема пространства, однако, учитывая общую водоотдачу, определенную по результатам опытно-фильтрационных работ (0,25–1,6 %), даже такой весьма небольшой объем порового пространства становится достаточно значимым в общей обводненности массива.

Таблица 5.6. Высотная поясность проницаемости массива архейских пород, м/сут

Гипсометрический пояс	Альтитуда пояса, м БС	Коэффициент фильтрации, м/сут	
		Среднее	Медиана
Верхний, выше местного базиса дренирования	> 300	0,0025	0,0023
Средний, между местным и региональным базисами дренирования	300...120	0,0018	0,0005
Нижний, между региональным и глобальным базисами дренирования	120...0	0,0007	0,0004
Глубинный, глубже глобального базиса дренирования	0... – 350	0,0008	0,0004

Примерно такие же отличия характерны для проницаемости пород, которая в гнейсах примерно в два раза выше, чем в метадолеритах. При этом по условиям проницаемости гнейсы анизотропны, тогда как геофильтрационная среда долеритов изотропна (см. табл. 5.7).

Таблица 5.7. Средние открытая пористость и проницаемость в образцах архейских пород

Породы, количество анализов	Открытая пористость, %	Газопроницаемость, мД / коэффициент фильтрации, м/сут*	
		Параллельно полосчатости	Перпендикулярно полосчатости
Гнейсы, N=24	0,35	0,020 / $1,2 \cdot 10^{-5}$	0,014 / $8,3 \cdot 10^{-6}$
Метадолериты, N=8	0,25	0,009 / $5,4 \cdot 10^{-6}$	0,009 / $5,4 \cdot 10^{-6}$

* Коэффициент фильтрации рассчитан для температуры подземных вод 6 °С.

Анализы пород показали, что ведущее значение в формировании геофильтрационной среды имеют гнейсы, тогда как дайки метадолеритов образуют «более водоупорные» пласты в общем массиве водонепроницаемых пород. В связи с особенностями залегания гнейсовой толщи анизотропия проницаемости создает преимущество для горизонтальной фильтрации над вертикальной.

Анализ напоров (давлений) в соседних скважинах говорит о том, что фильтрационное поле верхнего и среднего поясов массива можно представить в виде микроскопических по мощности относительно водопроводящих зон субгоризонтального направления, образованных за счет микротрещиноватости, возникшей в результате внутреннего напряженного состояния массива. Перемещение масс подземных вод в нижнем и глубинном поясах, по-видимому, происходит исключительно по зонам повышенной проницаемости, ведущее значение среди которых принадлежит зонам брекчирования пород на контактах гнейсов и даек второго этапа внедрения. При этом весь водонепроницаемый массив образует сложную единую гидравлическую систему, гидростатическое давление в пределах которой передается сверху вниз на всю изученную мощность. Поэтому структура «подземного потока», точнее, структура гидростатических давлений во всех поясах контролируется рельефом земной поверхности. Гидравлические градиенты горизонтальной фильтрации во всех поясах изменяются от 0,02—0,045 в северо-восточном направлении до 0,05—0,08 в направлении енисейской долины (на запад). При таких значениях градиента скорости фильтрации не превышают 0,2 мм/сут в верхнем поясе и 0,06 мм/сут — в нижнем и глубинном.

Поинтервальное изменение напоров (давлений) с глубиной не проявляет выраженных тенденций, в каждой из скважин эпюра напоров имеет специфический характер. В отдельных случаях наблюдается снижение напоров с глубиной, что обычно объясняется потерями на преодоление фильтрационного сопротивления пород. В других случаях напоры возрастают с глубиной. По-видимому, у различных интервалов разреза имеются различные источники питания, расположенные на разных гипсометрических отметках. Чем выше расположен источник питания данного интервала, тем больший в нем возникает напор (рис. 5.30).

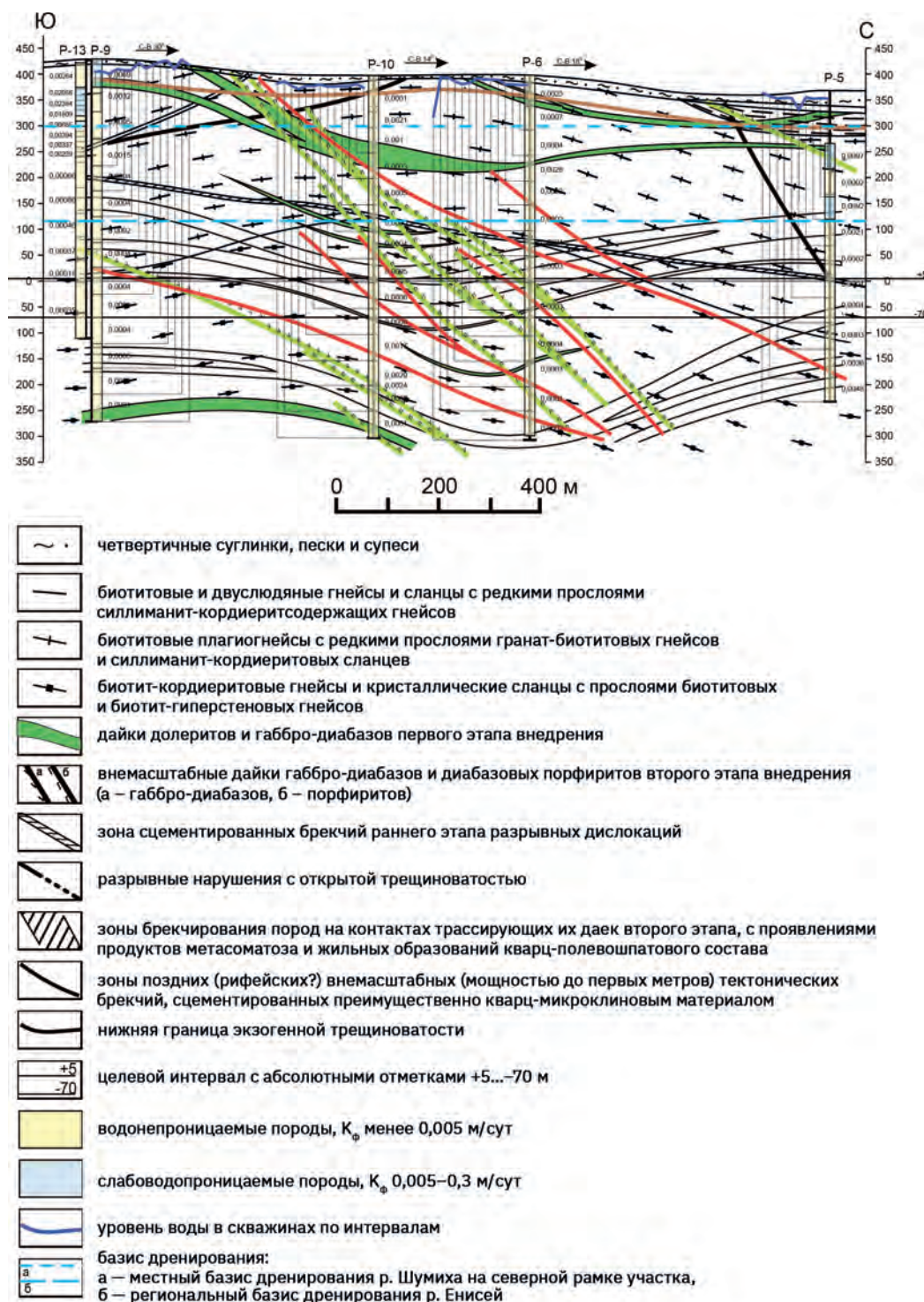


Рис. 5.30. Субмеридиональный гидрогеологический разрез (Караулов, Заблоцкий, 2015 [14])

В вертикальном разрезе до глубин 250—300 м преобладает нисходящий вектор фильтрации, который сменяется на преобладание восходящего вектора в интервале 300—450 м. Глубже 450 м наблюдаются разнонаправленные соотношения давлений и только на такой большой глубине встречаются нормальные значения вертикальных градиентов давлений. При этом рядом с интервалом нормального (или повышенного для условий участка) градиента давления, как правило, соседствуют интервалы с противоположным знаком градиента. То есть инфильтрационные воды, поступающие в глубинный интервал по относительно раскрытой трещинной системе, перераспределяются в соседние интервалы по другим трещинам [33, 34].

Гидравлические градиенты вертикальной фильтрации, измеренные между соседними интервалами, характеризуются аномально низкими значениями, характеризующиеся медианами градиентов давления 0,0008 МПа/м для восходящего движения и 0,0007 МПа/м — для нисходящего. Нормальный вертикальный градиент гидростатического давления равен 0,01 МПа/м. В природной обстановке градиенты пластового давления обычно изменяются в пределах от 0,008 до 0,025 МПа/м, а более высокие или низкие градиенты считаются аномальными. Поэтому в природной ненарушенной обстановке в массиве преобладают, по-видимому, вязкостное и капиллярное вертикальные перемещения воды, а господствующим направлением ее перемещения является латеральное.

5.2.3. Гидрогеохимические условия участка

Гидрогеологический массив архейских метаморфических пород является практически водонепроницаемым геологическим телом с крайне ограниченными возможностями взаимодействия пород с водной средой. Однако небольшое количество гравитационной воды все же содержится в микротрещинном пространстве. Крайне низкие фильтрационные и емкостные свойства пород обеспечивают достаточно долговременный контакт инфильтрующихся атмосферных осадков с крайне слабо растворимой силикатной матрицей пород и формирование типичных пресных вод зоны выщелачивания [35].

Весьма малое количество воды, содержащейся в породах, создает существенные сложности при гидрогеохимическом опробовании. При опытных откачках из скважин и создании большого понижения (100 м и более) в опробуемых интервалах создается депрессия, в которую привлекаются воды из все более высоко расположенных интервалов и, в конце концов, из приповерхностных грунтовых вод. Последние содержатся в некоторой доле во всех пробах воды из глубоких интервалов, что несколько искажает полученные результаты. Так, почти во всех пробах воды из специально изолированного интервала скважины ПР-1 с глубины 491—520 м был обнаружен тритий в концентрациях 19—45 Бк/л, что говорит о поступлении в интервал приповерхностных вод. Например, в р. Большая Тель в 3—5 км севернее участка Енисейского концентрации трития изменяются от 3,7 до 40 Бк/л [36].

Для изучения условий формирования химического состава подземных вод, исключающих искажающее влияние притока приповерхностных вод, были выполнены анализы водных вытяжек из пород, отобранных из различных скважин с разных глубин. Полученные результаты были систематизированы в табл. 5.8 в соответствии с геофильтрационной поясностью массива, приведенной табл. 5.6.

Анализы водных вытяжек показали, что породы массива характеризуются крайне низкой растворимостью, которая в среднем равна 550 мг/кг (0,055 %). Вытяжки имеют щелочную реакцию с рН от 7,8 до 9,2 и в среднем гидрокарбонатный калиево-натриевый состав.

Как и коэффициенты фильтрации, концентрации главных ионов закономерно снижаются с глубиной. В верхнем поясе в составе катионов преобладает калий, который только в следующем по глубине поясе уступает лидирующую позицию натрию. В нижнем поясе натрий становится единственным доминирующим катионом.

Состав водных вытяжек и закономерности его изменений с глубиной по поясам показывают, что ведущим процессом формирования состава подземных вод является углекислотное гидролитическое выщелачивание алюмосиликатов, причем наиболее подвержены гидролизу калиевые и натриевые полевые шпаты. Поясность массива, проявляющаяся в результатах анализов водных вытяжек, отражает степень разложения алюмосиликатов (полевых шпатов) агентами выветривания. Степень разложения и готовность пород к растворению тем выше, чем выше гипсометрическое положение пояса и проницаемость.

Результаты процесса более или менее активного гидролитического разложения алюмосиликатов отчетливо наблюдаются до нижнего пояса (до абсолютной глубины ± 0 м). Породы глубинного пояса противостоят гидролизу, что проявляется в существенном снижении растворимости пород и концентраций главных ионов [37].

Закономерности формирования химического состава подземных вод, выявленные при изучении водных вытяжек из пород, находят свое отражение в гидрогеохимических условиях массива. Минерализация подземных вод изменяется от 140 до 641 мг/дм³, составляя в среднем 367 мг/дм³. Средний водородный показатель pH по полевым определениям составляет 8,0, а среднее значение Eh равно –44,8 мВ. Таким образом, в массиве преобладают щелочные воды с восстановительной обстановкой. По газовому составу подземные воды относятся к углекисло-азотным ($N_2=77,6$; $CO_2=16$; $O_2=5,9$ об.%). Углекислый газ, вероятно, имеет реликтовое метаморфическое происхождение, что подтверждается ростом концентраций свободной углекислоты с глубиной (табл. 5.9).

Средний состав подземных вод массива в целом и верхнего пояса гидрокарбонатный кальциевый, ниже сменяющийся на натриево-кальциевый. В вертикальном разрезе массива также проявляются закономерные поясные гидрогеохимические изменения. Как и в анализах водных вытяжек, главной их особенностью является существенное отличие глубинного пояса от трех верхних. В глубинном поясе минерализация и концентрации главных ионов существенно ниже, чем в трех верхних поясах, что отражает устойчивость пород пояса к растворению и гидролитическому разложению силикатов.

В отличие от вытяжек в подземных водах калий не входит в число главных ионов. По-видимому, калий, растворяющийся из пород, участвует в ионном обмене с продуктами разложения полевых шпатов и в подземных водах он замещается кальцием.

Для трех верхних поясов характерно нарастание минерализации и концентраций главных ионов до абсолютной глубины ± 0 м (табл. 5.9), хотя в водных вытяжках наблюдается противоположный процесс (см. табл. 5.8). Рост концентраций ионов и минерализации является следствием концентрирования, которое происходит по мере вертикальной нисходящей фильтрации, накопления ионов в воде и, соответственно, нарастания ее ионной силы. Крайне небольшое количество подземных вод, объем которых в 50–500 раз ниже объема пород, а также очень низкая проницаемость пород способствуют усилению концентрирования [33].

Таблица 5.8. Поясность среднего химического состава водных вытяжек, мг/кг сухой породы

Компоненты	Пояса массива			
	Верхний	Средний	Нижний	Глубинный
CO_3^{2-}	6,0	9,0	14,5	6,0
HCO_3^-	398	377	371	280
Cl^-	9	8	9	8
SO_4^{2-}	17	20	18	20
Ca^{2+}	23	16	12	14
Mg^{2+}	7	4	3	3
Na^+	62	96	131	71
K^+	114	82	30	53
Fe^{3+}	0	1	4	4
Сумма ионов	637	614	595	462

Таблица 5.9. Поясность среднего химического состава подземных вод, мг/дм³

Компоненты	Пояса массива			
	Верхний	Средний	Нижний	Глубинный
HCO_3^-	220,4	232,1	247,2	215,2
Cl^-	4,2	5,1	6,0	5,0
SO_4^{2-}	19,1	25,5	21,2	15,6
Ca^{2+}	56,4	41,9	54,3	44,4
Mg^{2+}	11,0	9,9	11,8	9,2
Na^+	19,2	32,6	26,0	25,2
K^+	2,6	2,7	2,6	2,7
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	1,4	4,4	3,1	4,1
$\text{CO}_{2\text{св}}$	6,0	7,4	9,4	10,6
SiO_2	6,9	6,4	8,0	7,4
ХПК _{Мн} (перманганатная окисляемость)	2,3	2,8	2,4	3,0
Минерализация	369,3	376,9	394,2	343,5

Факторный анализ результатов лабораторных анализов главных ионов, выполненный методом главных компонент, в общем подтверждает рассмотренные выше закономерности (табл. 5.10). Первый фактор с учтенной дисперсией 26 % показывает, что основным процессом, формирующим минерализацию и гидрокарбонатный кальциевый состав подземных вод, является углекислотное гидролитическое выщелачивание.

Второй фактор показывает большую роль окисления акцессорных сульфидов (пирита) как источника сульфатов и железа. В третьем факторе нашла отражение карбонатная система подземных вод, а в четвертом — растворение акцессорных хлоридов натрия [38, 39].

Нормируемые микрокомпоненты изучались количественными химическими анализами в 12 пробах подземных вод для интервала глубин 350–601,6 м с целью оценки качества будущего дренажа [8]. Из 25 проанализированных микрокомпонентов только 14 характеризуются устойчивым присутствием, при котором встречаемость значимых концентраций превышает 50 %. Фоновые концентрации этих элементов характеризуются медианами выборки (табл. 5.11). Не были обнаружены As, Sb, U, а В (0,11 мг/л), Hg (0,00025 мг/л) и Se (0,0015 мг/л) были найдены в одной пробе каждый. В трех-четырех пробах встречены, в мг/л: Ag 0,003–0,0092; Be 0,0001–0,0003; Cd 0,0006–0,001; Pb 0,0058–0,0093, фосфаты 0,023–0,041.

Высотная поясность кристаллического массива не проявляется в средних концентрациях подавляющего большинства микроэлементов (Ag, B, Cu, Li, Ni, Pb, Ti, Mo). Убыванием с глубиной характеризуются концентрации бария (от 0,68 до 0,26 мг/л) и стронция (от 0,45 до 0,28 мг/л), а концентрация цинка (0,18 мг/л) максимальна в глубинном поясе. Для марганца характерны те же изменения концентраций, как для главных ионов. В трех верхних зонах происходит его концентрирование с 0,17 до 0,23 мг/л, а в глубинной зоне концентрация снижается до 0,21 мг/л.

Фоновые концентрации часто встречающихся элементов характеризуют подземные воды массива как экологически неблагоприятные, непригодные для питья и требующие очистки при сбросе дренажа в гидрографическую сеть.

Результаты изучения гидрогеологических условий участка за 2009–2014 гг. отражены на соответствующих картах, разрезах и в таблицах и дают параметры среды и путей миграции радионуклидов. Опытнo-фильтрационные работы на участке Енисейский показали, что зоны тектонических нарушений не имеют явных отличий фильтрационных свойств по сравнению с окружающими породами. В нижней части разреза (глубже 50–100 м от поверхности) преобладающими являются водонепроницаемые породы с коэффициентом фильтрации до 0,005 м/сут, при этом почти 70 % всех значений коэффициентов фильтрации принадлежит к интервалу значений 0,0001–0,001 м/сут. При этом проницаемость гнейсов примерно в два раза выше, чем метадолеритов. Поинтервальное изменение напоров (давлений) с глубиной не проявляет выраженных тенденций. В отдельных случаях наблюдается снижение напоров с глубиной, в других случаях напоры возрастают с глубиной. Это главная неопределенность, обусловившая создание альтернативных гидрогеологических моделей коллективами ИБРАЭ РАН и СПбО ИГЭ РАН.

Таблица 5.10. Результаты факторного анализа макрокомпонентного состава подземных вод

Компоненты	Факторы			
	I	II	III	IV
pH	-0,23	0,37	-0,76	0,37
Cl ⁻	0,16	-0,21	-0,01	0,82
SO ₄ ²⁻	0,34	0,72	-0,06	-0,06
HCO ₃ ⁻	0,91	-0,10	-0,02	0,08
Na ⁺	-0,28	0,32	-0,28	0,75
Mg ²⁺	0,93	-0,21	0,06	-0,15
Ca ²⁺	0,89	-0,16	0,13	-0,27
Fe ²⁺	-0,27	0,87	-0,21	-0,03
Fe ³⁺	-0,32	0,75	0,23	0,03
CO ₂ своб.	0,20	-0,03	0,88	-0,09
ХПК _{Мн} (перманганатная окисляемость)	-0,29	0,33	0,70	0,18
Минерализация	0,95	0,12	0,05	0,15
Дисперсия, %	26	17	13	12

Примечание: жирным выделены значимые факторные нагрузки, компоненты с незначимыми факторными нагрузками не показаны.

Таблица 5.11. Фоновый микроэлементный состав подземных вод, мг/л

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Al	0,76	Mo	0,05
Ba	0,18	Ni	0,01
Co	0,004	Si	5,13
Cr	0,12	Sr	0,36
Cu	0,03	Ti	0,01
Li	0,005	V	0,0015
Mn	0,36	Zn	0,57

5.3. Гидрогеологические модели

5.3.1. Модель ИБРАЗ РАН

Фильтрующая среда и структура фильтрационного потока

Фильтрационные свойства водовмещающей среды рассматриваемого участка во многом определяются трещиноватостью, связанной с основными структурными элементами: разрывными нарушениями (представленными преимущественно зонами дробления) и дайками.

В гидрогеологическом отношении на участке выделяются обводненный горизонт рыхлых отложений и зона скальных архейских и протерозойских пород. Водопроницаемость скальных образований характеризуется значениями коэффициента фильтрации (K_{ϕ}), установленными по результатам опытно-фильтрационных работ в скважинах Р-1—Р-10 [3, 4]. Для получения фильтрационных параметров были проведены откачки в отдельных интервалах, отделенных пакерами. Интервалы были довольно большие — до 50 м. В большинстве случаев коэффициенты фильтрации имеют незначительную величину (до 9×10^{-4} м/сут). Однако 41,3 % определений показывают наличие повышенных значений K_{ϕ} , достигающих $(26,5–171,5) \times 10^{-4}$ м/сут, что определяет неравномерность пространственного распределения водопроницаемых участков ниже зоны экзогенной дезинтеграции пород вплоть до глубоких горизонтов (рис. 5.31).

Представление о структуре потока подземных вод дают две группы данных. Первая группа — разовые замеры напоров в отдельных интервалах, отделенных пакерами. Такие замеры, согласно [3, 4, 14], проводились перед проведением опытно-фильтрационных работ.

Вторая группа — данные мониторинга повторяющихся замеров, которые проводились в скважинах с открытыми интервалами, длина которых L достигает сотен метров (см. табл. 5.8). Поэтому абсолютные отметки уровней H , измеряемых в скважинах, являются средними напорами для открытого интервала и связаны с поинтервальными замерами напоров $h(z)$ следующим образом:

$$H = h_{\text{ср}} = \frac{1}{L} \int_0^L h(z) dz. \quad (5.3.1)$$

В табл. 5.12 показано, что абсолютные значения уровней в скважинах H на межень 2013 г. хорошо совпадают со средними значениями напоров $h_{\text{ср}}$, полученных при пакерных исследованиях. Хорошее совпадение уровней в скважинах H со средними напорами $h_{\text{ср}}$ приведено также на графике разброса (рис. 5.32). Это позволяет считать данные о замерах напоров, полученные при пакерных исследованиях, вполне удовлетворительными.

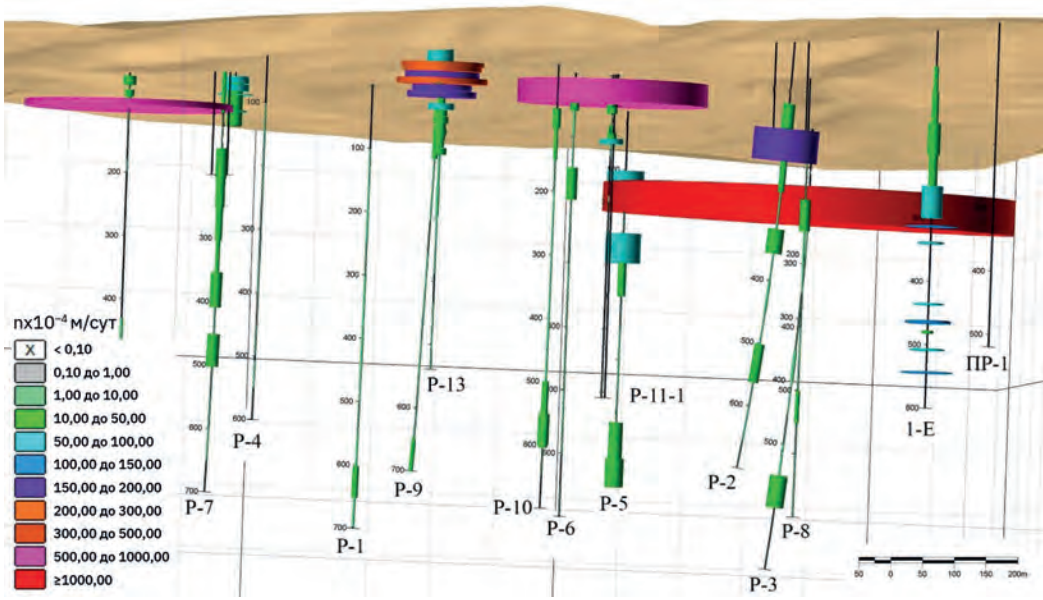


Рис. 5.31. Распределение коэффициента фильтрации в породах по стволам скважин

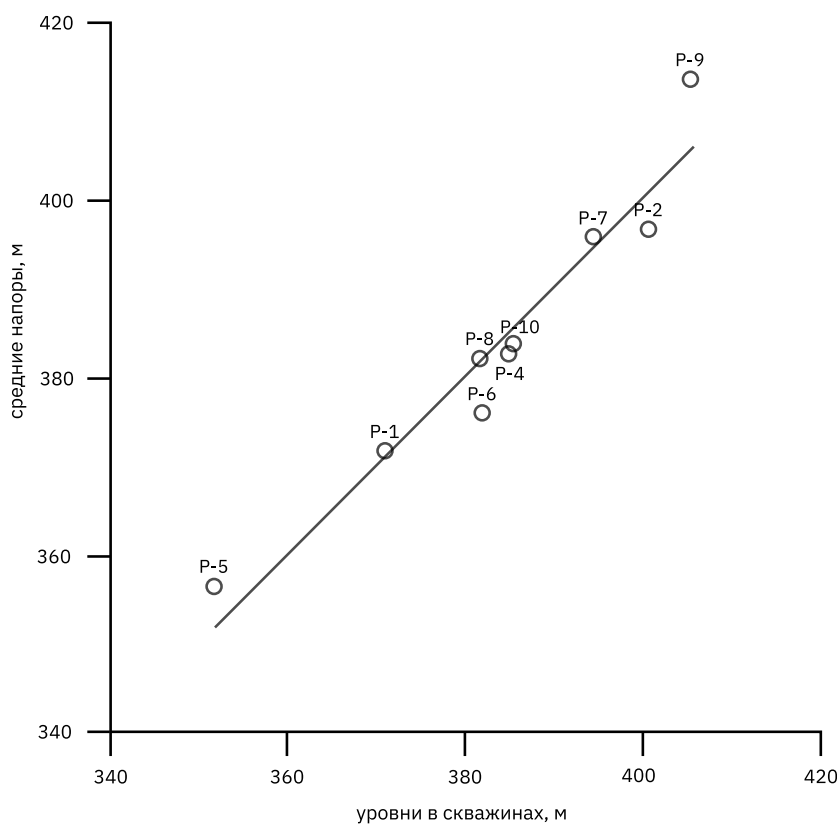


Рис. 5.32. Сопоставление абсолютных значений уровней в скважинах на 29.01.2013 со средними значениями напоров h_{cp} , полученных при пакерных исследованиях

Анализ распределения напоров при поинтервальных исследованиях позволил построить гидрогеологическую карту для горизонта –70 м и отразить распределение напоров на продольном геолого-гидрогеологическом разрезе (рис. 5.33). Полученные результаты соответствуют пространственному распределению напоров и показывают, что направление потока подземных вод коррелирует с простиранием основных тектонических структур участка, ориентировано в плане на северо-северо-восток, а его разгрузка приурочена к локальной дрене — р. Шумихе. От общего направления потока зафиксировано одно отклонение на северо-запад, в направлении разлома Безымянный. Это связано со структурной неоднородностью фильтрационных свойств пород, которую необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований.

Результаты предварительного моделирования потока подземных вод

Двумерная плановая модель

Изучение гидрогеологических условий в районе ПИЛ, которые представлены на гидрогеологических карте и разрезе (см. рис. 5.33), позволяет считать, что основные структурные элементы имеют северное простирание и с углом падения 70°. Это дает возможность приближенно реализовать их на двумерной плановой фильтрационной модели. В плановом приближении принимается, что падение структурных элементов вертикальное. Другое приближение, которое приходится принять при создании плановой модели, связано с тем, что для характеристики движения подземных вод берется единый по вертикали уровень и средний коэффициент фильтрации. Чтобы проверить такую модель, необходимы замеры уровней в полевых условиях. Для верификации модели были выбраны значения уровней, измеренные в межень 29.01.2013 в 9 скважинах [1]. Все они имели открытый интервал более 500 м и промерялись в течение нескольких лет. Данные, по которым была проведена верификация, приведены в табл. 5.12.

Разработка плановой модели проводилась на основе метода аналитических элементов (МАЭ) — самого гибкого метода для решения задач двумерной стационарной фильтрации [40]. На основе МАЭ была подготовлена региональная модель (рис. 5.34) в программном пакете GFLOW [40]. Частью ее, в пределах которой более детально были учтены варианты неоднородности, является площадка ПИЛ.

Дискретизация в МАЭ позволяет задать: полилиниями — водотоки и полигонами — структурные элементы (зоны неоднородности). Общее количество элементов составило 845. Для задания структурных элементов, представленных на этом рисунке, была использована геологическая карта для горизонта –70 м (см. рис. 5.33).

Далее, как показано в табл. 5.13, были выполнены еще шесть вариантов расчетов, при которых последовательно добавлялись структурные элементы: дайки, зоны повышенной трещиноватости и разрывные нарушения. Дайки задавались с коэффициентами фильтрации на порядок ниже окружающих пород, а зоны повышенной трещиноватости и разрывные нарушения — в два раза выше. При проведении расчетов фиксировали, насколько новый вариант приближает модель к фактическим данным, приведенным в табл. 5.8.

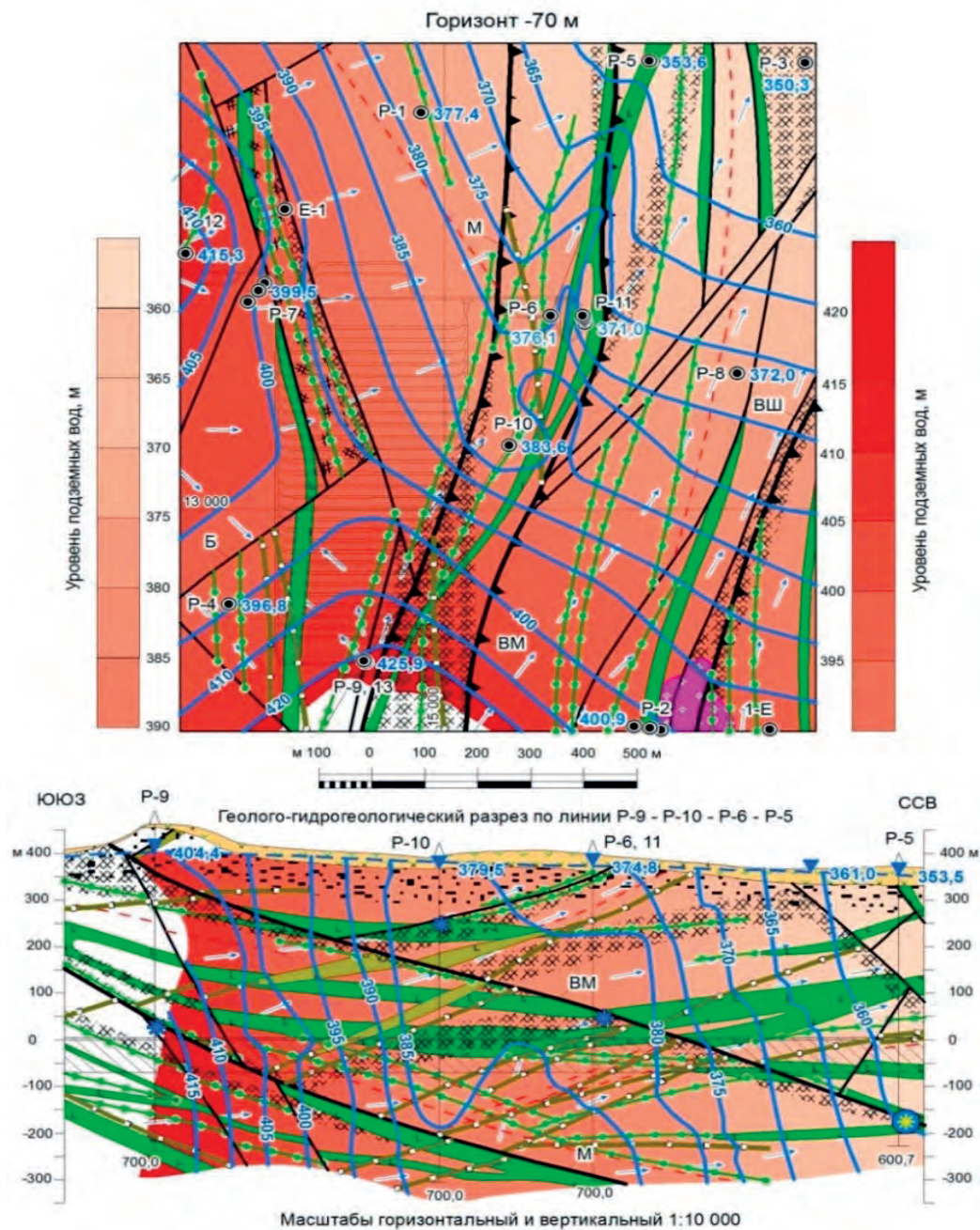


Рис. 5.33. Геолого-гидрогеологическая карта для горизонта -70 м и геолого-гидрогеологический разрез по линии скв. Р-9 – Р-10 – Р-6 – Р-5.

Основные элементы геологического строения

-  плиоцен-четвертичные отложения нерасчлененные
- Интрузивные образования в толще гнейсов**
-  дайки трахидолеритов
-  дайки трахидолеритов вне масштаба
-  метадолериты
-  метадолериты вне масштаба
-  гнейсо-граниты
-  геологические границы и линия разреза
-  разрывные нарушения главные
-  разрывные нарушения второстепенные
-  зоны повышенной трещиноватости
-  зоны повышенной трещиноватости внемасштабные
-  зоны смятия
-  уровень подземных вод
-  гидроизопьезы, м
-  абсолютные отметки уровня подземных и поверхностных вод, м
-  направление потока подземных вод
-  участки установленного водопритока
-  участки предполагаемого водопритока
-  зона приповерхностного окисления пород
-  буровые скважины на схеме
-  буровые скважины на разрезе, цифры на забое — глубина скважины, м
-  контур проектируемого ПГЗРО
-  целевой горизонт

Буквами обозначены разломы

Б — Безымянный, ВМ — Верхнемеркурьевский, М — Меркурьевский

Таблица 5.12. Сопоставление уровней, полученных при мониторинге со средними напорами, полученными по данным пакерных исследований

Номер скважины	Открытый интервал, глубины от — до, L, м	Абсолютная отметка уровня в скважине на 29.01.2013, Н, м	Средний абсолютный напор по данным поинтервальных исследований, h_{cp} , м
P-1	96–700	371,04	371,89
P-2	120–700	400,68	396,88
P-4	101,8–700	384,9	382,68
P-5	100–600	351,76	356,57
P-6	27,4–600	381,98	376,12
P-7	46–314,2	394,39	396,03
P-8	56,6–700	381,64	382,19
P-9	100–700	405,67	413,87
P-10	50,7–700	385,51	384,09

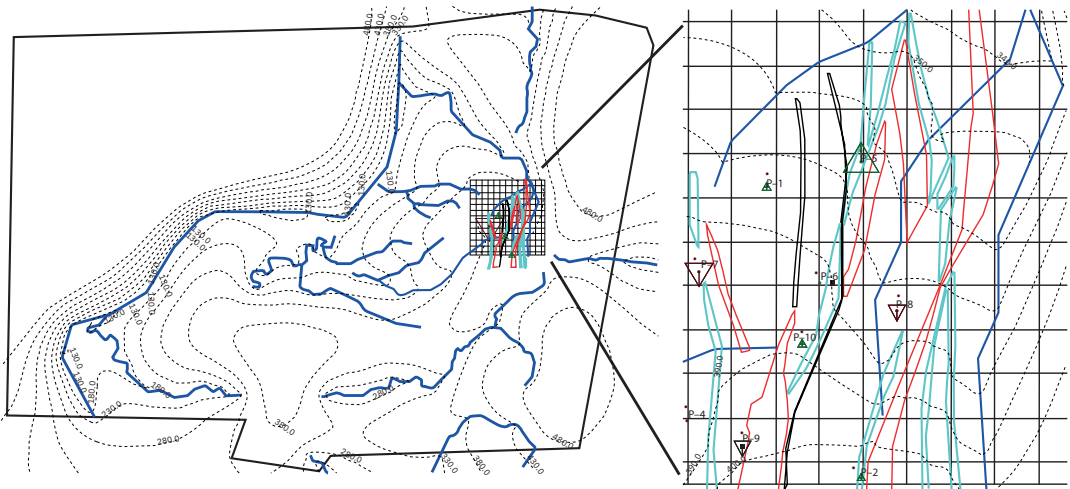


Рис. 5.34. Региональная модель с детализацией вблизи площадки ПИЛ
Синие линии — водотоки; голубые линии — дайки; красные линии — зоны повышенной трещиноватости; черные линии — разломы. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

Таблица 5.13. Сопоставление фактических и модельных уровней для различных вариантов задания структурных элементов

№ варианта	Задание структурных элементов	Отношение коэффициента фильтрации структурного элемента к коэффициенту фильтрации окружающих пород (матрицы)	Сумма квадратов отклонений фактических и модельных уровней
1	Однородное строение	—	467,8
2	Дайки	0,1	448,5
3	Зоны повышенной трещиноватости	2	446
4	Дайки	0,1	424
	Зоны повышенной трещиноватости	2	
5	Разломы	2	473,4
6	Дайки	0,1	448
	Разломы	2	
7	Дайки	0,1	425,3
	Разломы	2	
	Зоны повышенной трещиноватости	2	

Проведенные расчеты (см. табл. 5.13) показали, что добавление структурных элементов (в большей степени даек и зон повышенной трещиноватости) ведет к большему соответствию фактических и модельных напоров. Отсюда следует необходимость учета структурных элементов в более точных модельных построениях. Проведенные расчеты позволяют считать, что основное направление подземных вод — на северо-северо-восток в сторону р. Шумихи. Это направление можно выбрать для расчетов на профильной модели, ориентированной вдоль геологического разреза.

Профильная модель

Ниже приведены результаты разработки профильной модели [41, 42] фильтрации и массопереноса с помощью расчетного кода GeRa [43]. На профильной модели, в отличие от плановой, можно учесть неоднородность в плане и разрезе, и изменение напоров по вертикали. Важно, что профильная модель была ориентирована вдоль основного направления потока подземных вод. В соответствии с изложенными выше результатами такое направление выбрано на северо-северо-восток.

Гидрогеологической основой профильной модели был разрез, приведенный на рис. 5.33. На основе анализа опытно-фильтрационных работ были выделены 7 элементов геологического строения, имеющих различные фильтрационные свойства. Это четвертичные отложения, кора выветривания, дайки среднетрещиноватые, дайки монолитные, гнейсы сильнотрещиноватые, гнейсы монолитные, зоны дробления. В схематизированном виде расчетный разрез дан на рис. 5.35.

В ходе моделирования численно решалась стационарная задача напорной фильтрации.

В качестве фактических данных, необходимых для калибровки геофильтрационной модели, использовались напоры, полученные при поинтервальных исследованиях в четырех скважинах, попадающих на расчетный разрез (всего 35 значений напоров подземных вод).

Граничные условия для модели задавались следующим образом:

- правая граница была проведена по линиям тока, замыкающимся на водотоке первого порядка р. Шумихи, линии тока с гидродинамической точки зрения являются непроницаемыми границами 2-го рода;
- нижней границе модели соответствовало условие 2-го рода с нулевым расходом (непроницаемая) в связи с тем, что породы, которые залегают на глубине 700 м от устья скважин, непроницаемы;
- по всей верхней границе задавалось инфильтрационное питание, равное $w = 0,00001$ м/сут, кроме русла р. Шумихи, где было задано условие 1-го рода с абсолютным уровнем 331 м;
- на левой границе в первоначальной версии модели задавался средний напор по скважине Р-9.

Также рассматривался альтернативный вариант учета граничного условия. Так, на левой границе задавалось условие 2-го рода каждого гидрогеологического подразделения (горизонт четвертичных отложений, водоносная зона архейских пород, водонепроницаемая зона архейских пород). Для каждого из соответствующих горизонтов задавался и варьировался в процессе калибровки свой расход.

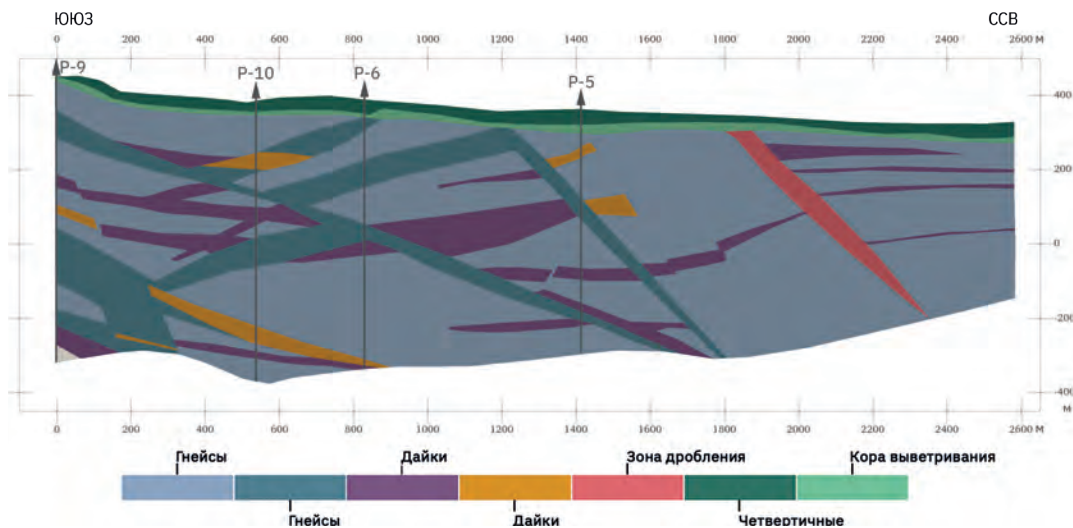


Рис. 5.35. Схематизированный расчетный разрез

Неопределенные и, соответственно, варьировавшиеся в процессе калибровки параметры модели приведены в табл. 5.14. Диапазоны изменения выбирались, исходя из данных исследований и экспертной оценки. Для автоматической калибровки использовался гибридный эвристический алгоритм [44], реализованный в программном комплексе MOUSE [45]. В качестве критерия для сравнения модельных решений и, соответственно, минимизируемой целевой функции использовалось среднеквадратичное отклонение 35 значений рассчитанных напоров от соответствующих значений экспериментальных наблюдений.

$$\text{RMS} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_{m_i} - h_{\phi_i})^2 \right]^{1/2}, \quad (5.3.2)$$

где h_m и h_ϕ — расчетные и фактические напоры, N — общее количество наблюдений.

В результате было получено наименьшее значение среднеквадратичного отклонения $\text{RMS} = 5,55$ для модели с граничным условием 1-го рода. Анализ полученных значений (также в табл. 5.14) позволяет сделать следующие выводы. Коэффициенты фильтрации для пород одного литологического типа с разной степенью трещиноватости существенно отличаются. Это говорит о том, что для построения геофильтрационной модели выделение элементов геологического строения с различными уровнями трещиноватости существенно. Также полученные коэффициенты фильтрации позволяют предположить, что дайки с низкой трещиноватостью будут выступать в роли естественных барьеров безопасности. Распределение напоров, полученных при решении фильтрационной задачи, приведено на рис. 5.36.

Таблица 5.14. Диапазоны варьирования параметров и результаты калибровки

Альтернативные модели		Граничное условие 1-го рода	Граничное условие 2-го рода
Параметр		Диапазон варьирования	Результат калибровки
Напор на левой границе (м)		(370; 420)	402,65
Расход [м³/сут]	Горизонт четвертичных отложений	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-2})$	Только для граничного условия 1-го рода
	Водоносная зона архейских пород	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-2})$	0,00126
	Водонепроницаемая зона архейских пород	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 1 \cdot 10^{-2})$	0,00127
Коэффициент фильтрации [м/сут]	Четвертичные отложения	$(1,0 \cdot 10^{-3}; 5,0 \cdot 10^{-1})$	0,000535
	Кора выветривания	$(1,0 \cdot 10^{-3}; 1)$	Только для граничного условия 2-го рода
	Дайки среднетрешиноватые	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 3,5 \cdot 10^{-2})$	0,127
	Дайки монолитные	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 1,0 \cdot 10^{-2})$	$3,49 \cdot 10^{-2}$
	Плагииогнейсы, гнейсы сильнотрещиноватые	$(5,0 \cdot 10^{-3}; 1,0 \cdot 10^{-1})$	$1,87 \cdot 10^{-6}$
	Зоны дробления	$(1,0 \cdot 10^{-2}; 1,0)$	$5,04 \cdot 10^{-3}$
	Гнейсы монолитные	$(1,0 \cdot 10^{-6}; 1,0 \cdot 10^{-3})$	0,99

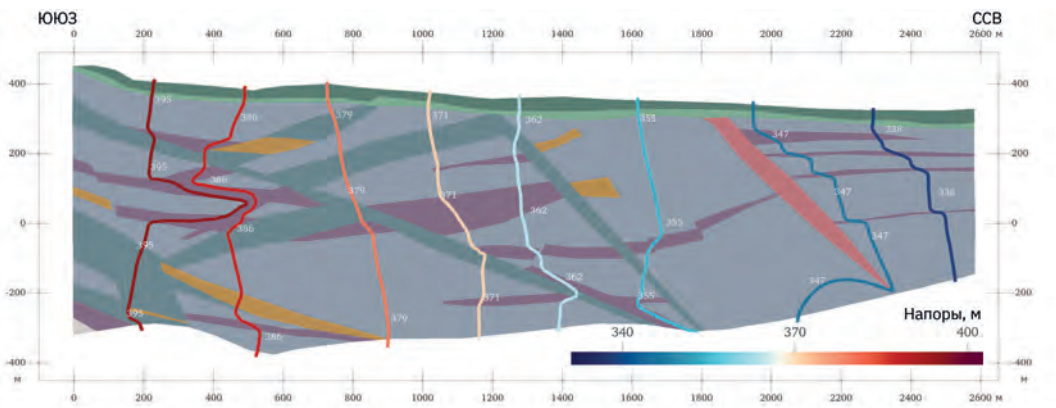


Рис. 5.36. Распределение напоров, полученное на основе моделирования

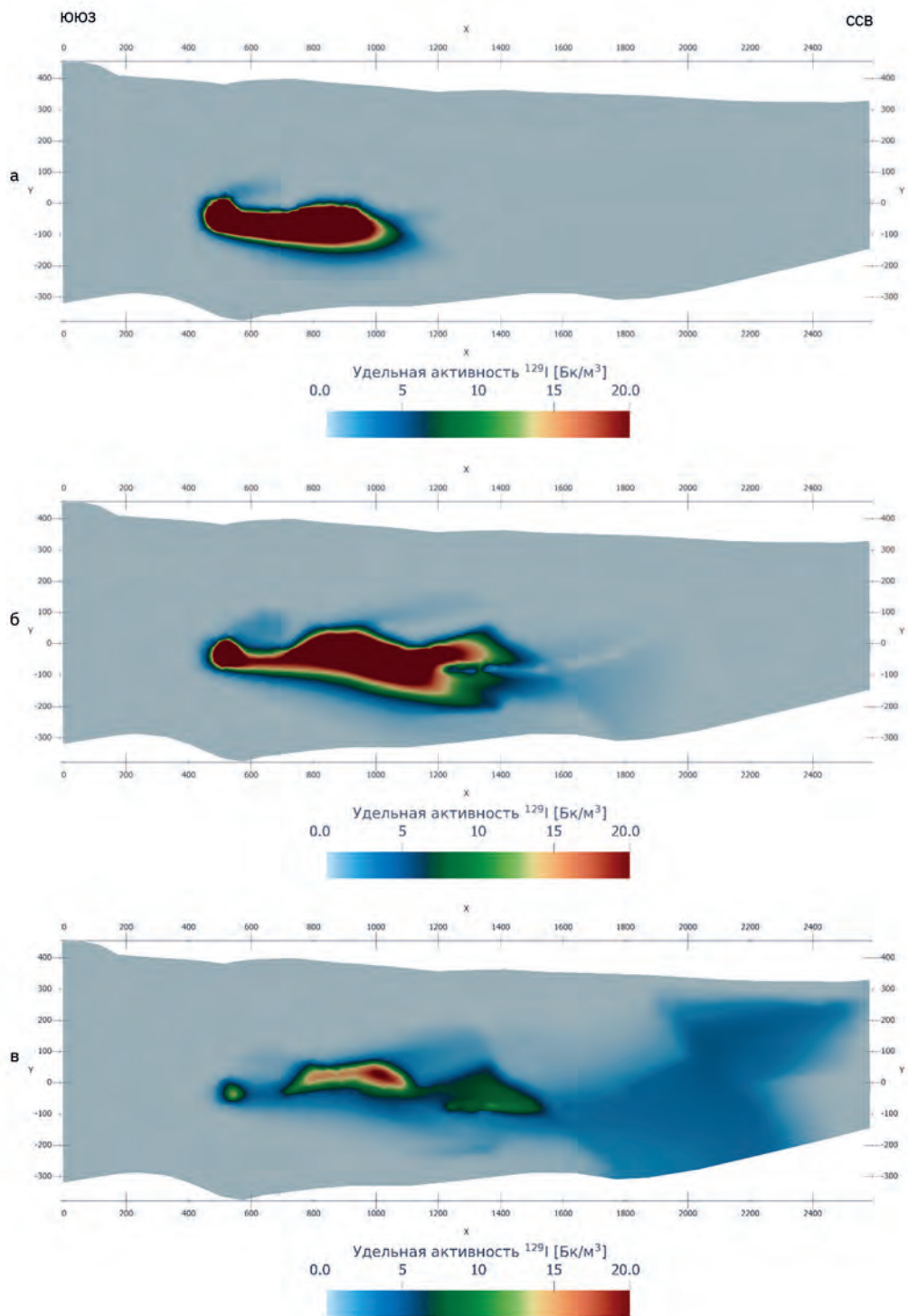


Рис. 5.37. Результаты расчета миграции консервативного трассера (^{129}I) на:
а — 5 тыс. лет; б — 10 тыс. лет; в — 20 тыс. лет

После калибровки геофильтрационной модели были выполнены прогнозы по распространению загрязнителя с учетом цепочек радиоактивного распада, адвекции, диффузии, продольной и поперечной дисперсии, а также сорбции по линейной изотерме [46, 47]. Далее приведены результаты прогнозов при принятых параметрах продольной дисперсивности $\alpha_L = 15,7$ м. и активной пористости $n = 0,03$. Величина поперечной дисперсивности принимается в 10 раз меньше от продольной согласно [47]. На основе представленной модели были проведены расчеты миграции консервативного трассера (^{129}I) на 5, 10 и 20 тыс. лет. Результаты прогнозов в виде ореолов на моменты времени от 5 до 20 тыс. лет даны на рис. 5.37.

Согласно приведенным выше результатам, при миграции консервативного трассера максимальная концентрация в зоне предполагаемой разгрузки подземных вод в р. Шумихе будет достигнута к ~ 22 тыс. лет. Для сорбируемых компонент время достижения максимальной концентрации увеличивается пропорционально фактору задержки.

Трехмерная модель

Трехмерная модель [42] была также разработана на основе расчетного кода GeRa [43], который с использованием неортогональной дискретизации (рис. 5.38) позволяет адекватно отразить геологические особенности строения участка. По вертикали модель дискретизирована на 16 слоев и содержит порядка полумиллиона расчетных ячеек. Первый модельный слой соответствует неоген-четвертичным отложениям. Остальные слои имеют равную мощность в 50 м, такая мощность была выбрана для обеспечения соответствия результатам поинтервальных пакерных опробований. Задача была решена в напорно-безнапорной постановке. Расчетная область соответствует границам водосборных бассейнов, включая ручей Байкал, р. Шумиху, ручей Плоцку, по западной границе проходит русло р. Енисей.

Стоит отметить, что основные структурные элементы, которые учтены на модели, задаются в виде субвертикальных областей неоднородности. Положение даек и разрывных нарушений, реализованных на модели, и связанная с ними дискретизация приведены на рис. 5.39.

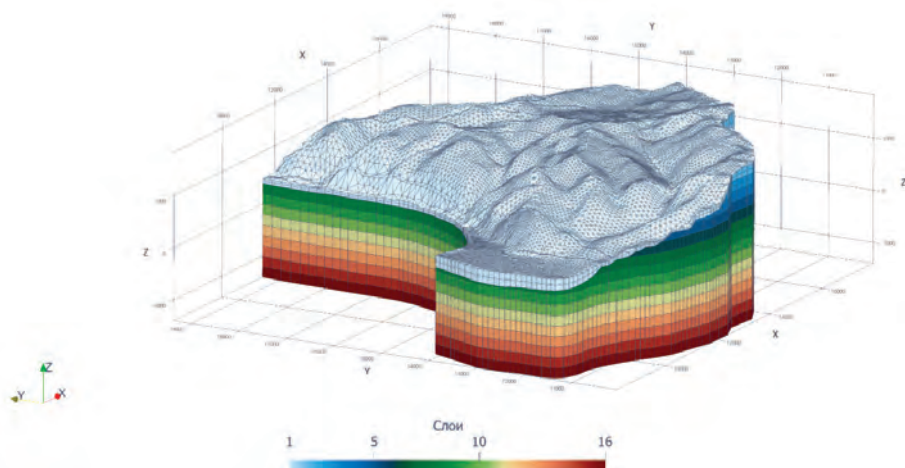


Рис. 5.38. Расчетная область трехмерной модели

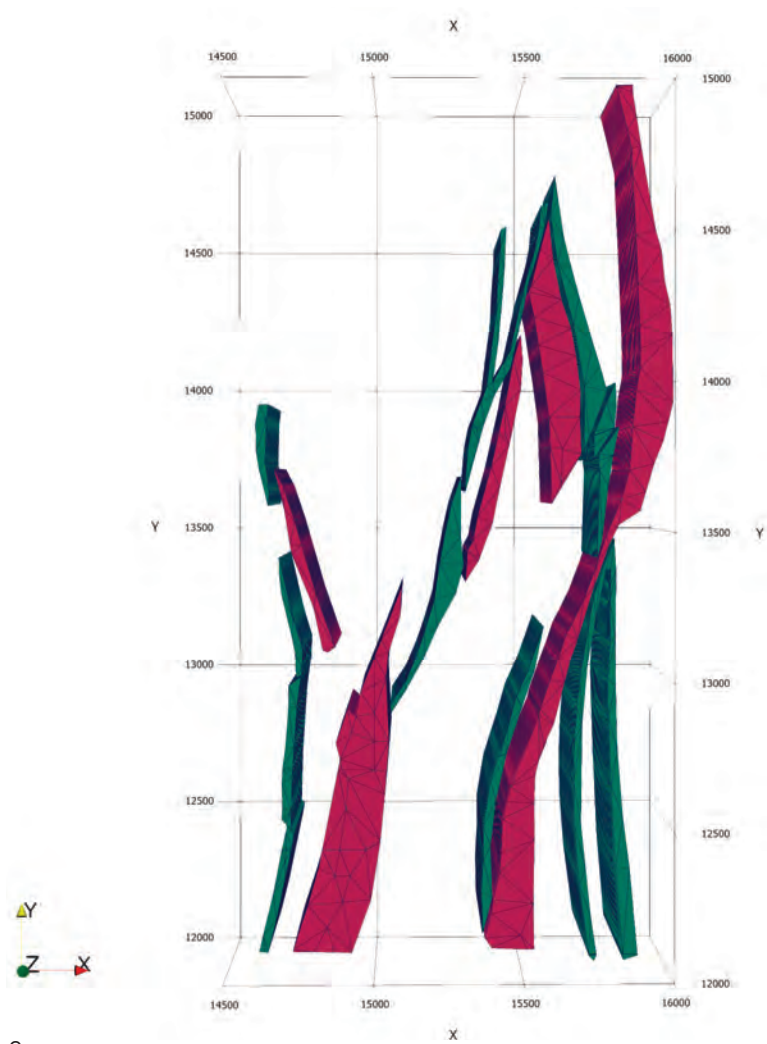


Рис. 5.39. Структурные элементы, реализованные на модели, и адаптированная к ним дискретизация
Зеленым цветом — дайки; красным цветом — зоны повышенной трещиноватости

Таблица 5.15. Параметры модели

Материал	Коэффициент фильтрации, м/сут	Инфильтрационное питание, м/сут
Неоген-четвертичные отложения	0,5	0,00025
Относительно водонепроницаемые участки горных пород	0,0001	
Дайки	0,005	
Разрывные нарушения	0,1	

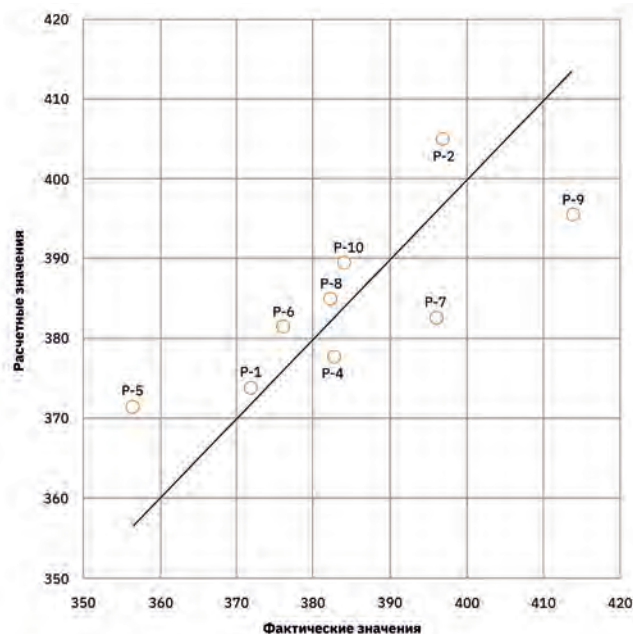


Рис. 5.40. Сопоставление фактических (средний абсолютный напор по данным поинтервальных исследований) и средних расчетных значений напоров

В расчетной области учтены основные водотоки: р. Енисей, р. Шумиха, а также ручьи Студеный, Безымянный, Байкал, Плоцка. В ходе калибровки модели уточнялись коэффициенты фильтрации разрывных нарушений и относительно водонепроницаемых участков горных пород. В табл. 5.15 приведены значения параметров, которые были получены в результате калибровки модели.

Сопоставление средних расчетных и фактических значений напоров показано на рис. 5.40. Можно наблюдать удовлетворительное совпадение модельных и фактических величин.

Результаты моделирования в плане для горизонта -70 м приведены на рис. 5.41. Результаты расчетов показывают, что структурные элементы в значительной степени определяют поток подземных вод. На рис. 5.42 приведен разрез через русло р. Шумихи, проходящий с юга на север — отметим, что основной поток подземных вод проходит через русло этой реки в направлении региональной дрены р. Енисей.

Приведенные выше примеры дают представление о возможностях реализации геолого-структурных особенностей профильной и 3D-моделях. Неоднородность вблизи площадки ПИЛ носит трехмерный характер и ее невозможно точно, без приближений, реализовать в двумерной постановке.

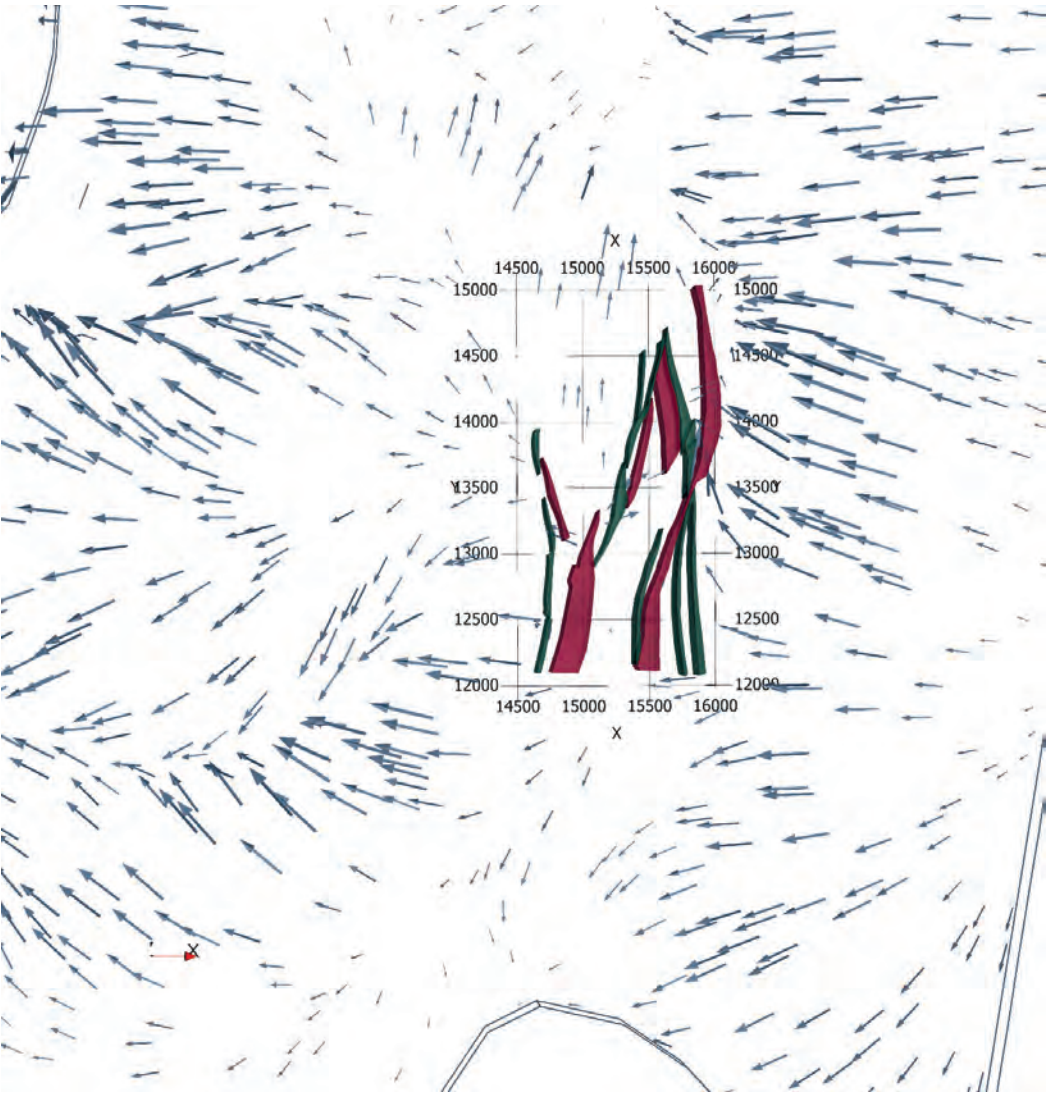


Рис. 5.41. Структура потока (скоростей) для горизонта – 70 м

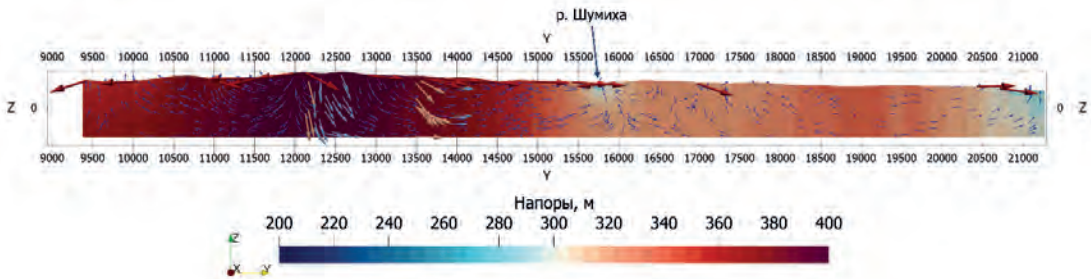


Рис. 5.42. Модельный разрез с юга на север через русло р. Шумихи

В настоящее время существует ряд неопределенностей, свойственных построенной гидрогеологической модели, на минимизацию которых будут направлены дальнейшие исследования. В частности, следующие.

- *Увеличение объема бурения для детального трехмерного представления геологического строения. Знания об этих разрывных нарушениях основываются в том числе и на данных геофизических исследований. Однако необходимо верифицировать истинное положение данных разрывных нарушений и выяснить взаимосвязь с другими разрывами, такая комплексная работа поможет детализировать существующие модельные представления и приблизиться к более точным оценкам.*
- *Уточнение характеристик фильтрационных свойств основных структурных элементов. Знания о фильтрационных характеристиках данных структур являются важной с точки зрения долгосрочной безопасности информацией.*
- *Формирование экспериментально определенных значений миграционных параметров основных структурных элементов.*
- *Создание действующей режимной сети, оборудованной фильтрами на узкие интервалы массива, которые связаны с основными структурными элементами.*

5.3.2. Модель СП60 ИГЭ РАН

Геологические факторы, контролирующие фильтрационную структуру гнейсового массива

Геологическое описание участка Енисейский на локальном уровне основывается на интерпретации данных по 14 глубоким (до 700 м) скважинам, включающих: (1) детальное описание керна; (2) комплексный каротаж скважин; (3) лабораторное исследование образцов керна, отобранных через равномерные интервалы по стволу скважин для характеристики литологии и определения физико-механических свойств пород; (4) специальный комплекс опытно-фильтрационных опробований для изучения гидрогеологических условий и гидрогеологических параметров отложений [3, 4] [к].

Материалы исследования керна были основным источником геологической информации. КERN обследовался визуально и фотографировался для выявления видимых нарушений сплошности пород, залечивания трещин и минеральных ассоциаций на их поверхности.

Выявление зон трещиноватости и дробления пород по керну сопряжено с двумя основными проблемами. Во-первых, трещиноватость естественного происхождения достаточно трудно идентифицировать, так как, например, нельзя исключить, что та или иная область трещиноватости вызвана разрушением пород в процессе бурения или снятием тектонического напряжения. Во-вторых, данных бурения часто недостаточно для определения пространственной ориентации (азимута) и конфигурации трещин.

Для исключения или минимизации недостоверных данных о трещиноватости, т. е. исключения из рассмотрения тех случаев, когда нарушение сплошности пород вызвано искусственными причинами, на использование данных было наложено несколько ограничений. Прежде всего (на первом этапе) из рассмотрения были исключены зоны трещиноватости в начале и в конце керновых колонок, так как именно в этих частях керна его разрушение, вызванное вибрацией, отрывом и прочими эффектами в процессе бурения и отбора керна, максимально. Затем (на втором этапе) были исключены свежие трещины без признаков выветривания или изменения, так как предполагалось, что такие «идеальные» поверхности могут формироваться только под действием искусственных факторов, таких как работа бурового инструмента или снятие напряжения в горном массиве. Третий, последний, этап проверки достоверности данных о природной трещиноватости включал сопоставление данных, полученных после отбраковки на первом и втором этапах, с данными каротажа скважин. В качестве наиболее эффективного среди перечисленных выше методов зарекомендовал себя каротаж сопротивления.

Помимо геофизического каротажа, во всех скважинах были проведены поинтервальные экспресс-опробования, при которых изолированные пакерами необсаженные интервалы выполняли функцию опытных несовершенных по степени вскрытия скважин. В большинстве скважин длина таких интервалов L составляла 50 м, при этом в ряде скважин в верхней части коренных пород она была меньше — от 10 до 40 м. Таким образом, использованная схема опробования не могла обеспечить исследование отдельных зон трещиноватости.

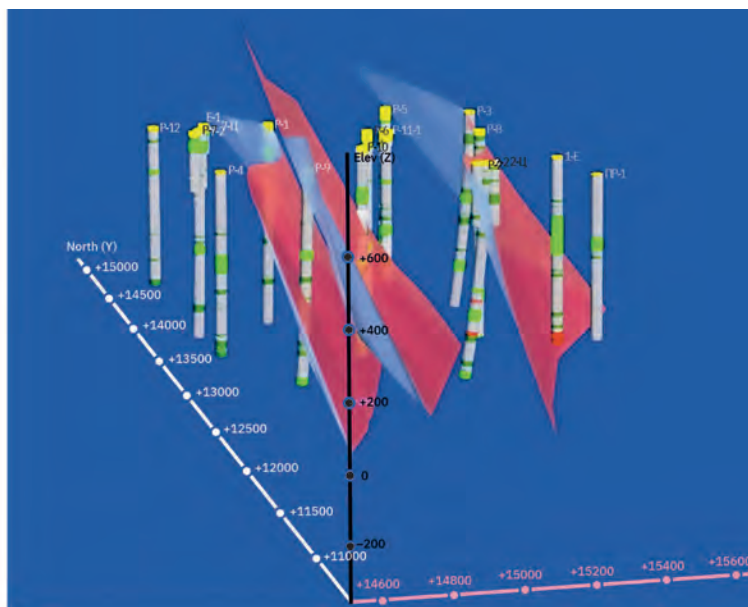
По данным восстановления уровня значение водопроницаемости T_{50} оценивалось по двум аналитическим моделям с использованием известных аналитических зависимостей [48–50]. В значительной части проведенных опробований отчетливо проявилось влияние граничных эффектов, связанных с неполным восстановлением уровня после откачки. Это говорит о том, что исследуемая толща может содержать зоны трещиноватости, слабо связанные между собой.

Гидрогеологические условия участка определяются присутствием локальных зон тектонической нарушенности массива. Под этими зонами понимаются структуры (тела), вдоль которых происходит концентрация пластичных и/или хрупких деформаций, приводящих к нарушению сплошности массива и изменению его водопроницающих свойств. В соответствии с концепцией, принятой в отчетах шведского оператора SKB, которой далее придерживаются авторы, на такого рода участках актуальным является выделение локальных зон деформации двух уровней [51]:

- главные зоны локальных деформаций (разрывные нарушения/разломы, условно относящиеся к структурам 3-го порядка);
- второстепенные зоны локальных деформаций (зоны повышенной трещиноватости, относящиеся к структурам 4-го порядка).

К первому типу структур относятся зоны деформаций с присутствием раздробленных пород. Пространственное положение картируется несколькими скважинами и/или с помощью геофизических методов; гидравлическая связь соответствующих скважинных интервалов подтверждается скважинными фильтрационными тестами (откачками/нагнетаниями в изолированных интервалах). Ко второму типу относятся трещинные зоны без признаков смещений параллельно плоскости трещин. Положение таких зон в пространстве весьма неопределенное, поскольку возможности интерполяции отдельных зон между скважинами ограничены.

а



б

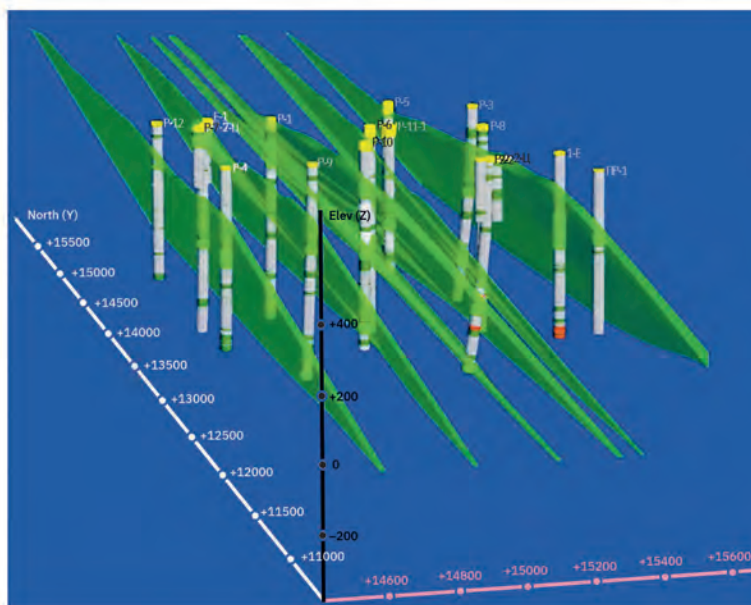


Рис. 5.43. Трехмерная геологическая схема участка Енисейский, отображающая: а — главные разрывные нарушения; б — позднерифейские дайки

Таблица 5.16. Интервалы вскрытия главных разрывных нарушений (ВШ, ВМ и М) разведочными скважинами и результаты изучения их проводимости опытными поинтервальными откачками

Разрывное нарушение		Скв.	Абс. отм., м		m, м	T, м ² /с
Индекс	Элементы залегания		от	до		
ВШ	N5°E65°SE	P-3	329,8	240,7	89,9*	5,8·10 ⁻⁵
		P-8	359,9	354,3	5,6	
		P-2	211,9	203,8	8,1	9,8·10 ⁻⁷
ВМ	N15°E60°SE	P-9	311,5	275,6	35,9	2,9·10 ⁻⁷
		P-13	318,0	316,0	2,0	
		P-10	158,1	149,4	8,7	2,9·10 ⁻⁷
		P-6	68,7	58,4	10,3	2,3·10 ⁻⁷
		P-11	-23,4	-36,7	13,3	8,6·10 ⁻⁸
		P-11-1	-23,3	-36,6	13,3	
		P-5	-163,6	-170,5	6,9	2,1·10 ⁻⁶
М	N10°W70°NE	P-1	129,1	119,2	9,9	2,9·10 ⁻⁷
		P-6	-272,6	-274,2	1,6	1,2·10 ⁻⁷
		P-10	-198,9	-206,6	7,7	1,2·10 ⁻⁷
		P-13	11,3	-9,7	21,0	4,6·10 ⁻⁸
		P-9	13,4	5,6	7,8	2,3·10 ⁻⁷

* Зона выветривания

С точки зрения модельного формализма, такого рода локальные структуры могут иметь как детерминистическое, так и стохастическое представление.

В подразделе 5.1.3 на карте и разрезах зафиксированы три главные зоны деформации в форме разрывных нарушений (см. рис. 5.19) и кластер позднерифейских даек, мощность которых достигает 30 м (см. рис. 5.20). Эти структурные элементы показаны на рис. 5.43.

Возможность отнесения выделенных разрывных нарушений к детерминированным гидрогеологическим («хорошо водопроницающим») структурам оценена посредством анализа данных опытных откачек, выполненных в интервалах, трассирующих эти структуры (табл. 5.16). Полученные (за одним исключением) медиальные значения проводимости T в диапазоне 10^{-7} – 10^{-8} м²/с оказались менее пороговой величины $T_{cr} = 10^{-6}$ м²/с, рекомендованной в отчетах компании Posiva по финскому проекту ПГЗРО [52] в качестве критерия для отнесения линейного геологического объекта к хорошо водопроницающей структуре.

Таким образом, результаты интерпретации фильтрационных опробований не подтверждают вывод о возможности отнесения выделенных главных разрывных нарушений к зонам повышенной проницаемости.

На рассматриваемом участке роль внутриблоковых структур высокого (4-го) порядка играют так называемые второстепенные разрывные нарушения (со смещением или без таковых), представленные зонами трещиноватости (повышенной трещиноватости), которые, следуя терминологии, принятой в работах SKB и Posiva, будем далее обозначать FZ (fracture zones). Они, согласно интерпретации, представленной в подразделе 5.1.3, являясь структурами, опережающими главные субмеридиональные разломы (ВШ — Верхнешумихинский, ВМ — Верхнемеркурьевский, М — Меркурьевский), имеют также преимущественно субмеридиональное простирание и крутые углы падения. Менее очевидно существование подобных структур субширотного простирания, о чем далее будет сказано отдельно.

В ряде случаев зоны повышенной трещиноватости имеют двухзонное строение — центральная часть представлена зоной дробления (crush zone) или милонитизации, а периферийная (переходная) — породами массива с повышенной относительно фоновой трещиноватостью. Модуль трещиноватости ненарушенного массива обычно составляет около одной трети от модуля трещиноватости зоны деформаций [51]. При наличии разрушенного ядра трещиноватая зона обозначается FZC (fault zone conductor). Зоны дробления, имея резкий контакт с ненарушенной породой, могут формировать и самостоятельные структурные единицы. Мощность зон дробления на участке Енисейский меняется от нескольких сантиметров до нескольких метров. Чаще всего встречаются зоны дробления мощностью от 0,1 до 0,3 м. Переходная зона обрамляющих трещин, принадлежащих к типу трещин скалывания, может достигать нескольких метров.

Присутствие зон повышенной трещиноватости также отмечается на контакте с дайками. Зоны трещиноватости в интервалах бурения, приуроченных к таким контактам, представляют собой систему субпараллельных «обычных» трещин, находящихся под определенным (близким к падению даек) углом к оси ствола скважины.

Наконец, концентрация в массиве напряжений растяжения может способствовать формированию так называемых зон расщепления (также относящихся к классу разрывных структур). Существование линейных зон расщепления в качестве самостоятельных тектонических структур для участка Енисейский не является строго доказанным фактом, но они установлены на соседнем участке ГХК, расположенном в 3 км восточнее участка Енисейский. Плоскости падения зон расщепления, сложенных катаклазированными гнейсами с плитчатой отдельностью (от 1–2 до 25 см), ориентированы во многих случаях ортогонально направлению смещения тектонических блоков, разделенных субгоризонтальными тектоническими разломами. Эти зоны характеризуются простиранием на запад-северо-запад (240–290°), т. е. могут быть отнесены к зонам субширотного простирания, и падением на север-северо-восток под углами 60–70°.

Для изучения мелких деформационных зон как исходной структуры, обеспечивающей преимущественные пути движения флюидов как вблизи даек, так и в других зонах трещиноватости, были проанализированы данные исследований керна с целью получения следующих параметров: 1) видимого расстояния между открытыми трещинами (любой ориентации), L_f (м), которое представляет собой расстояние между соседними трещинами с известным (измеренным) углом падения (β); 2) видимой линейной частоты открытых трещин (количество трещин на 1 м керна), P_{10} (м^{-1}), с разрешением (длиной интервала измерения) от 5 до 10 м в зависимости от цикла бурения; 3) видимого расстояния между ближайшими FZC, L_s (м); 4) видимой мощности FZC, отнесенной к мощности отложений при разрешении (длине интервала измерения) 10 м, PC_{10} (м/10 м), то есть суммарной мощности зон дробления на 10 м – интервал скважины.

Вследствие неопределенности ориентации плоскостей реальных зон трещиноватости, линейные (L_f и L_s) и частотные (P_{10} и PC_{10}) характеристики представляют собой эффективные или видимые параметры. Интервалы скважин с $P_{10} > 10\text{--}12 \text{ м}^{-1}$ рассматриваются как FZ; значения $P_{10} < 5\text{--}7 \text{ м}^{-1}$ характерны для ненарушенного трещиноватого массива, представленного фоновой трещиноватостью. Параметр PC_{10} может принимать значение равное 0 в случае, если в пределах интервала зоны дробления не обнаружены.

Количественный анализ имеющихся данных начался с рассмотрения диаграмм, иллюстрирующих изменение P_{10} и PC_{10} по глубине скважины (рис. 5.44). Эти диаграммы показывают, что породы в стволе скважины имеют умеренную трещиноватость, и в каждой скважине имеют место несколько отчетливых зон пород с повышенной трещиноватостью FZ ($P_{10} > 10\text{--}12 \text{ м}^{-1}$), а также интервалы с нулевыми значениями PC_{10} .

С использованием стандартных статистических методов были получены частотные гистограммы распределения отдельных трещин (как зон трещиноватости, так и основного массива пород) и зон дробления; характеристики этих распределений приведены в табл. 5.17.

Таблица 5.17. Сводная статистика для логнормального распределения мелкомасштабных деформационных структур

Тип нарушения	Характеристики	Единицы	μ_Y	σ_Y^2
Обычные трещины (вне FZC)	Плотность, P_{10}	м^{-1}	2,08	0,46
	Расстояние, L_f	м	–1,98	0,32
FZC	Плотность, PC_{10}	м/10 м	–1,47	0,94
	Расстояние, L_s	м	1,00	2,19
	Мощность, m_s	м	–2,09	0,37

Примечание: μ_Y — среднее значение логарифма случайной величины Z ($Y = \ln Z$); σ_Y^2 — дисперсия логарифма случайной величины Z

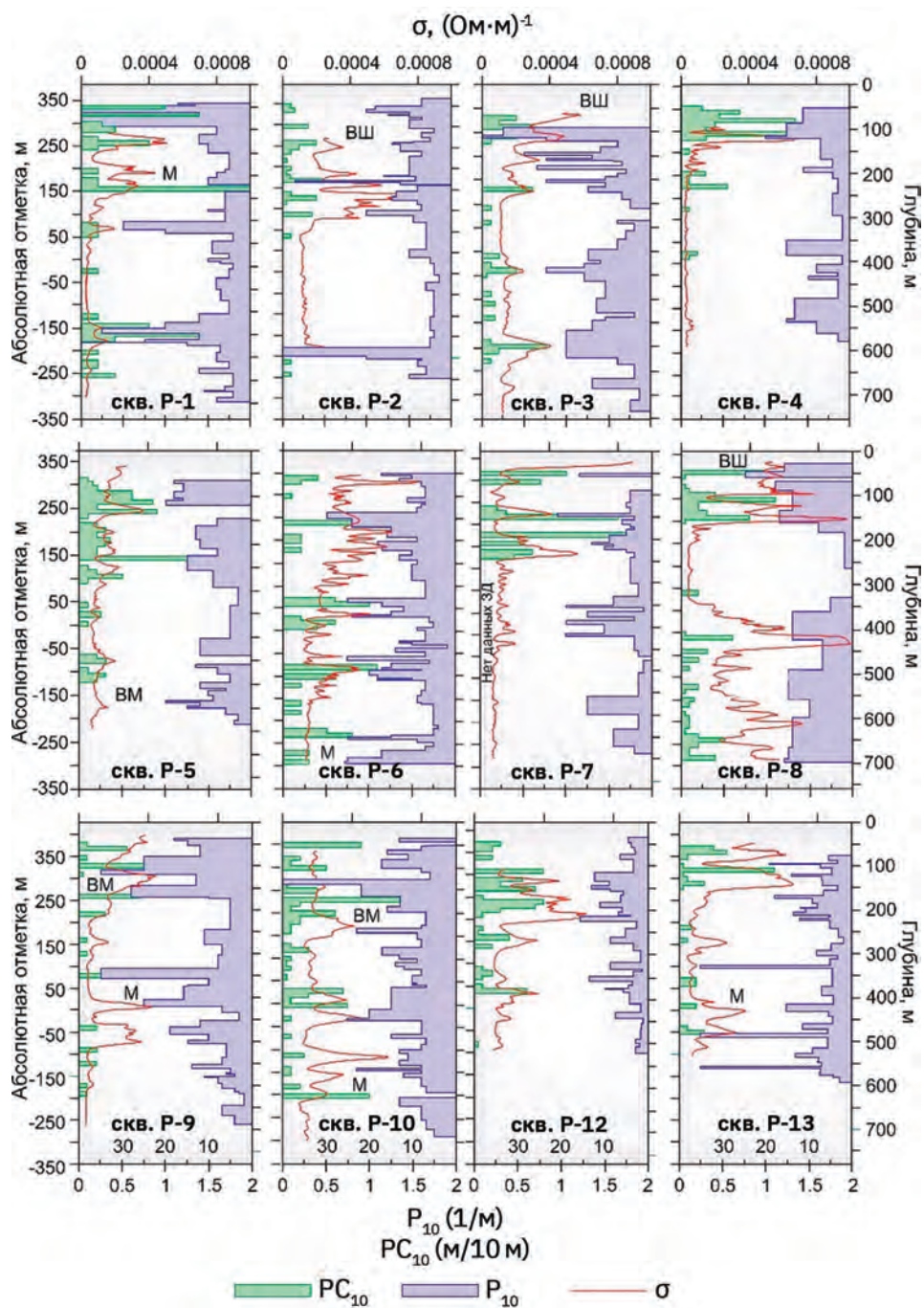


Рис. 5.44. Выявление потенциально проводящих зон по данным анализа керна и каротажа сопротивления скважин

Корреляционная структура водопроводящей системы трещин

Предполагаемые водопроводящие зоны. Большинство каротажных методов (электрический, радиоактивный, расходомерия и кавернометрия) продемонстрировали низкую чувствительность в отношении зон тектонической дезинтеграции пород, связанных с изменением P_{10} и PC_{10} , за исключением данных по кажущемуся сопротивлению ρ , для удобства переведенному в электропроводность σ (обратная величина к ρ). Действительно, каротажные данные по величине σ на тех же графиках изменения P_{10} и PC_{10} по глубине (см. рис. 5.44) указывают на присутствие многочисленных электропроводящих зон. Также на комбинированных графиках заметна весьма хорошая положительная корреляция между интервалами с $PC_{10} > 0$ и пиками электропроводности. Отмечается также корреляция профилей изменения с глубиной P_{10} .

Такая корреляция вполне объяснима, если принимать во внимание, что при бурении скважины происходит проникновение буровых растворов с высокой электропроводностью в трещины и зоны дробления [53]. Данный вид корреляционной зависимости между P_{10} (PC_{10}) и σ был отмечен в скважинах, вскрывших гранитный массив на участке размещения пункта захоронения ОЯТ Форсмарк в Швеции [54].

Более того, было отмечено, что многие электрические аномалии, проявлявшие себя как пики на кривой электропроводности, приурочены к зонам контакта магматических даек и гнейсов, характеризующимся повышенной плотностью трещин.

Полученные результаты могут рассматриваться как своего рода верификация применимости метода сопротивлений для выявления гидравлически проницаемых зон (Hydraulically Conductive Zones, HCZ) по керну в пределах изучаемой гнейсовой формации. Абсолютные значения PC_{10} в пределах интервалов, идентифицированных как HCZ, не коррелируются со значениями электропроводности σ , что может объясняться тем, что амплитуда кривой на графике σ зависит от типа заполнения зон дробления, материала залечивания трещин и многих других факторов.

Наконец, практически все интервалы скважин, трассирующие субвертикальные зоны деформаций 3-го порядка (ВШ, ВМ и М), хорошо диагностируются положительными аномалиями на графиках $\sigma(z)$. Однако, как видно на рис. 5.45, полученные распределения вероятностей проводимости этих геологических объектов (рис. 5.45, а) статистически неотличимы от семейства распределения проводимости массива в целом (рис. 5.45, б). Поэтому, как уже отмечалось, возможность выделения зон деформаций 3-го порядка в качестве высокопроницаемых детерминированных структур остается пока под вопросом.

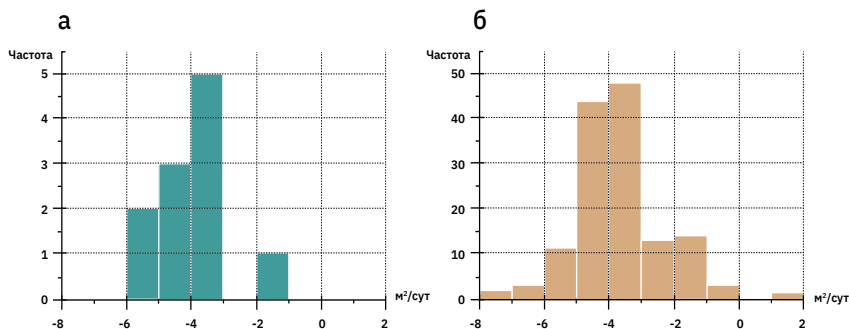


Рис. 5.45. Частотные диаграммы проводимостей 50-метровых интервалов: а — трассирующих разрывных нарушений ВШ, ВМ и М, выделенных по геологическим признакам; б — всех выполненных поинтервальных опытно-фильтрационных опробований

Исходя из имеющихся данных, можно заключить, что поток концентрируется в ограниченном числе зон НСЗ, находящихся на расстоянии 20–60 м друг от друга. Этот параметр может быть более детально изучен методами геостатистики.

Каждая НСЗ, состоящая из проводящих элементов микромасштаба (трещин и зон дробления), осредненных по 10-метровому интервалу, представляет собой первый уровень неоднородности. Его интегральный масштаб корреляции составляет около 1 м, λ_1 . Следующий интегральный масштаб корреляции (меж-НСЗ-уровень) λ_2 , в пределах которого имеет смысл осреднение параметров трещинной системы НСЗ, составляет порядка 10–100 м. Принимая во внимание, что масштаб корреляции мелких зон неоднородностей (λ_1) существенно меньше масштаба осреднения (10 м), распределение фильтрационных и миграционных параметров такой трещинной системы НСЗ может моделироваться путем концептуализации трещиноватой породы как стохастического континуума [55].

Индикаторные вариограммы и распределение зон трещиноватости (НСЗ).

В настоящем исследовании мы использовали вариограммный анализ [56, 57] для описания пространственной структуры изменчивости данных по водопроницающей трещинной системе, представленной зонами НСЗ, а также матрице гнейсового массива. Индикаторная формализация использовалась для того, чтобы показать контраст между потоком в ненарушенном массиве пород и в зонах деформаций.

Индикаторные вариограммы как измеритель пространственной корреляции для категориальных данных сходны с традиционными вариограммами, за исключением того момента, что они рассчитываются по значениям индикатора, а не самой переменной [58, 59]. В нашем случае значение индикатора (1 или 0) показывает, относится ли точка к водопроницающей зоне (НСЗ) (значение индикатора = 1) или же эта точка принадлежит к ненарушенному массиву пород (значение индикатора = 0). Таким образом, распределение НСЗ в гнейсовой формации может быть описано некоторой индикаторной функцией, $I_k(\mathbf{x})$, а именно:

$$I_k(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{если } k\text{-я зона деформации расположена в точке } \mathbf{x}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5.3.3)$$

Экспериментальная индикаторная полувариограмма I_k определяется как

$$\gamma_{ks}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{i,j \in N(\mathbf{h})} [I_{ki} - I_{kj}]^2, \quad (5.3.4)$$

где N — количество пар точек; $\mathbf{h}$ — лаг (англ.: lag, вектор, разделяющий пару точек); I_{ki} и I_{kj} — значения индикатора в точках i и j соответственно; суммирование проводится по всем парам i, j с заданным лагом. Параметры, используемые при моделировании вариограмм: самородок (англ.: nugget) — характеризует значения вариограммы вблизи нуля; плато (англ.: sill) — характеризует значения вариограммы на больших расстояниях; корреляционный масштаб (англ.: correlation range) — расстояние достижения вариограммой постоянного значения.

Индикаторные полувариограммы обычно нормализуются на дисперсию с отклонением значений индикатора таким образом, что

$$\gamma_{kn}(\mathbf{h}) = \gamma_{ks}(\mathbf{h}) / \sigma_p^2; \sum_k p_k = 1, \text{ чтобы значение sill было равным 1 для всех вариограмм.}$$

Для построения индикаторных вариограмм и последующего моделирования стохастической неоднородности использовался программный комплекс SGeMS (The Stanford Geostatistical Modeling Software) [60].

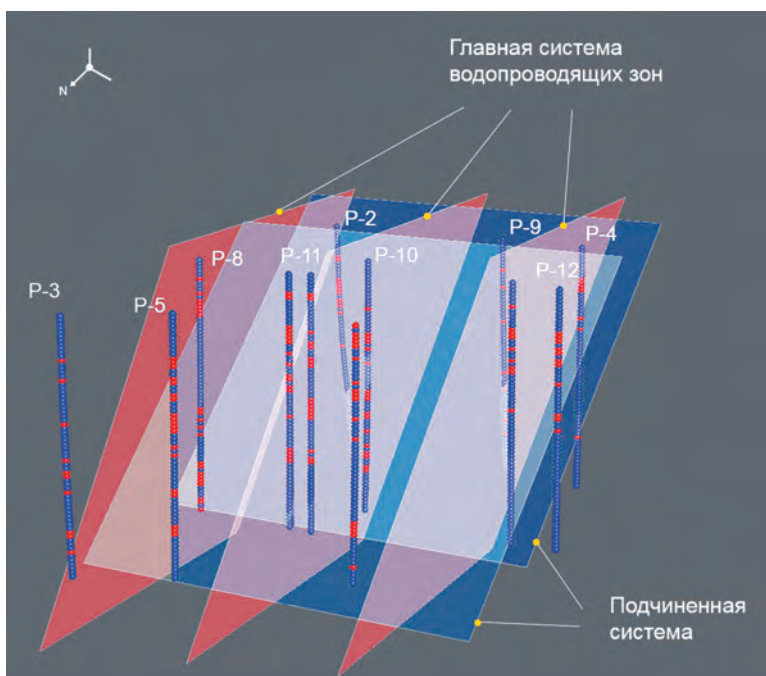


Рис. 5.46. Ориентация главной и подчиненной систем ориентировки зон дробления на участке Енисейский
Красным отмечены зоны дробления; синим — вмещающий массив

Формально мы можем использовать только данные, полученные по скважинам (hard data) для построения вариограмм. Однако на практике этого бывает недостаточно. Во многих работах делается вывод о том, что подключение знаний о региональных геологических трендах (soft data) способно значительно повысить достоверность вариограммного анализа, и всегда должно быть частью любого исследования. Особенно это касается участка Енисейский, где наблюдается острый дефицит данных, способных детализировать пространственную ориентацию и структуру водопроводящей сети.

Для построения вариограмм водопроводящей сети трещин на участке Енисейский привлекались некоторые априорные знания о пространственной корреляции. Одно из таких знаний основывается на предпосылке сходства пространственной ориентации зон дробления высокого (4-го) порядка и более низких (3-го и 2-го) порядков. Таким образом, в исследуемой области было выделено две системы изменчивости с различной пространственной ориентацией. Одна из них — главная система с крутым с углом падения (до 70°) в восточном направлении. Вторая — подчиненная система, соответствующая зонам деформации с углами падения до 50° в северо-северо-восточном направлении (рис. 5.46).

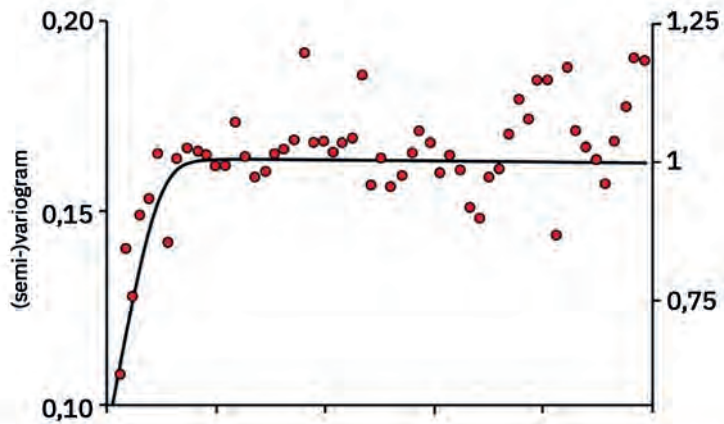
Вариограммы для главной системы были построены в трех направлениях (рис. 5.47): по падению ($X_{\max}$), простиранию ($Y_{\max}$) и вкрест плоскости падения ($Z_{\min}$). Они строились с шагом 10 м, а угол поиска составлял $22,5^\circ$.

По падению (Ox_{max})

Nugget: 0,09

Sill: 0,16

Lag: 95 м

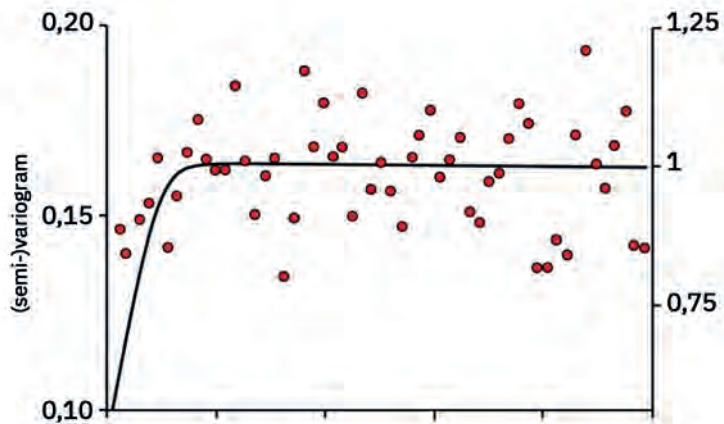


По простиранию (Oy_{max})

Nugget: 0,09

Sill: 0,16

Lag: 95 м



Поперек падения (Oz_{min})

Nugget: 0,16

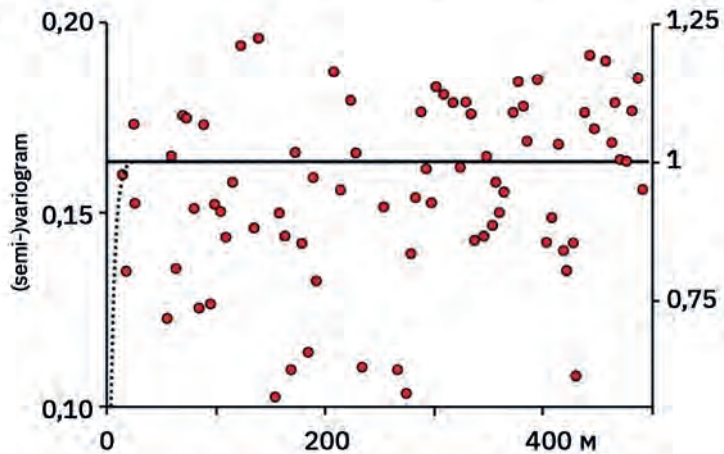


Рис. 5.47. Индикаторные вариограммы главной системы водопроводящих зон, построенные по трем направлениям

Как и ожидалось, график в ортогональной плоскости ($Z_{\min}$) иллюстрирует высокую степень неопределенности в оценке пространственных корреляционных шкал. Поэтому на экспертном уровне было принято, что корреляционный масштаб водопрводящих зон в плоскости минимума протяженности ($Z_{\min}$) примерно в 5 раз меньше, чем выявленный масштаб в ортогональной плоскости (табл. 5.18).

Структура поля проницаемости гнейсового массива

Коэффициенты фильтрации НСЗ. Исследуемые породы являются относительно низкопроницаемыми и неоднородными. В средней и нижней части толщи гнейсов (на глубине более 100–150 м от поверхности), которая была детально изучена поинтервальными пакерными опробованиями, величина k_e варьирует в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-3} м/сут. Проведенные поинтервальные опытно-фильтрационные опробования с шагом 50 м показали отсутствие связи между выявленными в стволе скважин зонами трещиноватости/дробления и проницаемостью исследуемого интервала. Свидетельства о слабой корреляции между количеством трещин в скальных массивах и их водопрводящей способностью также отмечались и на других экспериментальных участках [55].

Чтобы привести значения коэффициентов фильтрации, полученные из 50-метровых интервалов опробования, к масштабу используемой модели (10 м), была проведена процедура даунскейлинга. Для этого принималось, что проводимость (T_j) каждого j -го 10-метрового интервала пропорциональна общей проводимости 50-метрового интервала опробования (T_L), а также доли водопрводящих зон (НСЗ) j -го интервала.

Базовые определения и физическая интерпретация. Будем считать далее, что сеть НСЗ представляет собой гидравлически связную (в той или иной степени) систему, которая проявляет стохастические свойства как в отношении геометрии и пространственной ориентации водопрводящих зон, так и в отношении изменения фильтрационных свойств внутри этих зон. Данный подход позволяет рассматривать прямые измерения свойств пород как пространственно-коррелируемые случайные поля, тем самым устраняя необходимость получения детальной информации о свойствах или геометрии отдельных трещин [55, 61, 62].

Такое коррелированное случайное поле неоднородности для участка Енисейский было получено с использованием мультимодальной гибридной модели с использованием подхода, предложенного в работах [57, 63]. Формально данный подход использует суперпозицию двух различных атрибутов, сгенерированных отдельно для: 1) геометрии водопрводящих зон (НСЗ) I_k ; 2) для распределения коэффициента фильтрации внутри k -й зоны НСЗ ($k = 1, 2, \dots, M-1$) и вмещающей матрицы ($k = M$), Y_k .

Таблица 5.18. Параметры аппроксимации вариограмм сферической моделью

Система водопрводящих зон	Ориентировка	Доля, д.е.	Дисперсия	Самородок	Порог	Корреляционный масштаб		Стохастическое моделирование
		ρ	σ_I^2	$h \rightarrow 0$	$h \geq a$	$Z_{\min}$	$X_{\max} = Y_{\max}$	
						$a_{\min}$	$a_{\max}$	
Главная	N5°E 70°SE	0,1	0,16	0,56	1	20	95	Условное*
Подчиненная	N65°W 50°NE	0,04	0,038	1	1	20	95	Безусловное**

*Conditioned; **Unconditioned

При маленькой доле водопроводящих зон, p , увеличение или уменьшение дисперсии фильтрационных свойств внутри водопроводящих зон σ_f^2 или матрицы σ_m^2 оказывает слабое влияние на общую дисперсию σ_v^2 , т. е. контраст между зонами с высокой и низкой проводимостью является основным источником неоднородности, а влияние неоднородности внутри этих зон вторично [64, 65].

Методика и результаты моделирования. Целью численных (модельных) экспериментов по фильтрации жидкости в искусственно сгенерированном объеме массива трещиноватых пород с заданными на основе экспериментальных данных стохастическими характеристиками являлось исследование перколяционных свойств массива, в частности возможности привлечения для описания фильтрации моделей эквивалентной пористой среды.

Матрицы водопроводящих зон (HCZ) с эффективными параметрами среды могут быть получены с помощью стохастической индикаторной модели на основе анизотропных вариограмм, построенных с использованием прямых и косвенных данных (см. табл. 5.18). На основе такого подхода была сгенерирована матрица фильтрационной неоднородности $1600 \times 1200 \times 700 \text{ м}^3$ с размерами блоков $10 \times 10 \times 10 \text{ м}^3$.

На упрощенной бинарной модели каждая из двух систем водопроводящих зон (главная и подчиненная) были сгенерированы независимо друг от друга путем последовательного индикаторного моделирования [66]. Результирующая структура поля неоднородности представлена на рис. 5.48.

Тензоры эквивалентной проницаемости среды были оценены путем измерения на модели расходов потока через вертикальные плоскости модели. Нами исследовались два направления: с юга на север и с востока на запад. На противоположные границы модели попарно задавалось граничное условие с постоянным напором таким образом, что гидравлический градиент потока составлял от 0,06 до 0,08 м/м, в зависимости от исследуемого направления.

В настоящем разделе основное внимание сосредоточено на изучении: 1) вклада фильтрации в матрице пород (с первичной трещиноватостью) и водопроводящей системе трещин в общий поток через грани модели; 2) возможности формирования взаимосвязанных путей фильтрации через водопроводящие зоны с образованием каналов быстрого переноса.

Моделирование движения потока жидкости через стохастически сгенерированную матрицу неоднородности выполнялось с программного обеспечения MODFLOW [67, 68].

Вначале нами были выполнены модельные эксперименты по изучению условий фильтрации через бинарную среду, представленную стохастической водопроводящей системой (с коэффициентом фильтрации равным среднему значению $k_{ff} \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/сут}$ (см. рис. 5.48) во вмещающем породном массиве с коэффициентом фильтрации k_m . Значение последнего варьировалось в модельных реализациях, существенно отличаясь от вышеприведенного (базового) значения коэффициента фильтрации водопроводящей системы, так что отношение $v = k_{ff}/k_m$ являлось переменной величиной, изменяемой от опыта к опыту и рассматриваемой как аргумент функции расхода через грани модельной области, Q . Этот расход был приведен к максимальному расходу $Q_{\max}$ для базового значения коэффициента фильтрации k_{ff} , и таким образом, приведенный (безразмерный) расход $\bar{Q} = Q/Q_{\min}$ равен приведенному (безразмерному) коэффициенту фильтрации $\bar{k} = k_{eff}/k_{ff}$.

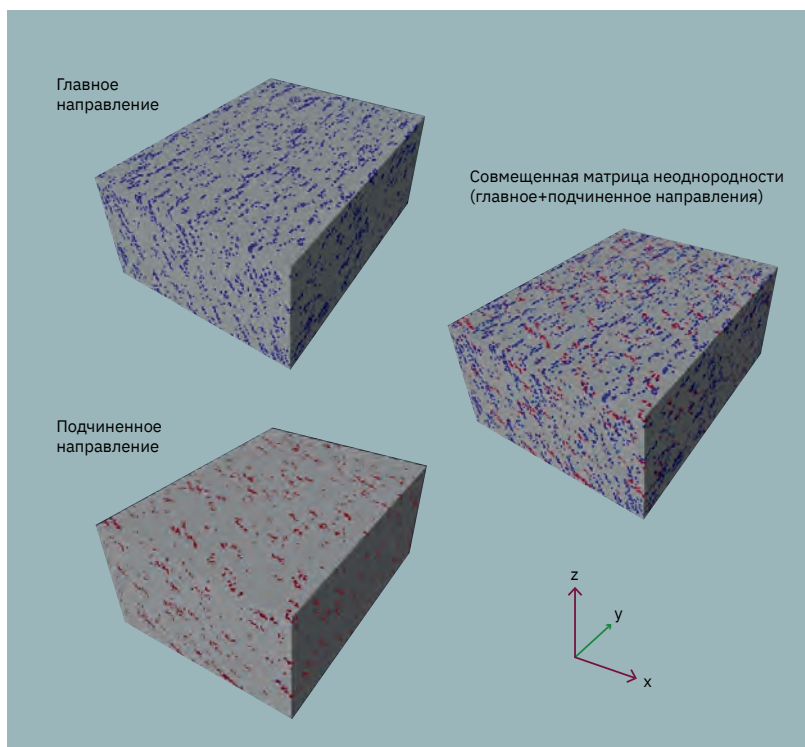


Рис. 5.48. Сгенерированные системы неоднородности — примеры единичных реализаций трехмерного бимодального коррелированного индикаторного поля

Результаты гидродинамических расчетов удобно представить в форме графиков $\bar{Q} = f(v)$, на которых, в соответствии с теоретическими представлениями, может быть диагностирован один из следующих режимов фильтрации: 1) режим «разбавленного» («diluted») потока, определяемый преимущественной фильтрацией через матрицу первичных трещин, когда трещинные зоны повышенной проницаемости (НСЗ) не образуют взаимосвязанную систему проводящих каналов (в масштабе модельной области); в этом случае функция $\bar{Q} = f(v)$ имеет линейный, монотонно падающий вид; 2) режим «фокусированной» («channeled» или «connected flow») фильтрации, когда роль матричной фильтрации пренебрежимо мала и поток фокусируется в хорошо проницаемых зонах трещиноватости, соединяющих входную и выходную границы модели; в этом случае при фиксированной величине p кривая $\bar{Q} = f(v)$, начиная с определенного значения v , выполаживается, так что приведенный расход слабо зависит от, собственно, проницаемости трещинной матрицы k_m ; 3) промежуточный режим.

Следуя изложенной выше логике, мы нанесли результаты численных экспериментов на индикаторный график $\bar{Q} = f(v)$, как это показано на рис. 5.49. На нем отчетливо просматривается линейный тренд, показывающий, что по мере уменьшения коэффициента фильтрации матрицы вмещающих пород (k_m) происходит постепенное снижение эффективной проницаемости модельной среды. Стабилизации расхода $\bar{Q}$, характерной при каналовой фильтрации в зонах трещиноватости, не наблюдается. Это свидетельствует о том, что плотности зон трещиноватости ($p = 0,14$) и их протяженности недостаточно, чтобы образовать связную систему каналов фильтрации, не зависящую от проницаемости матрицы.

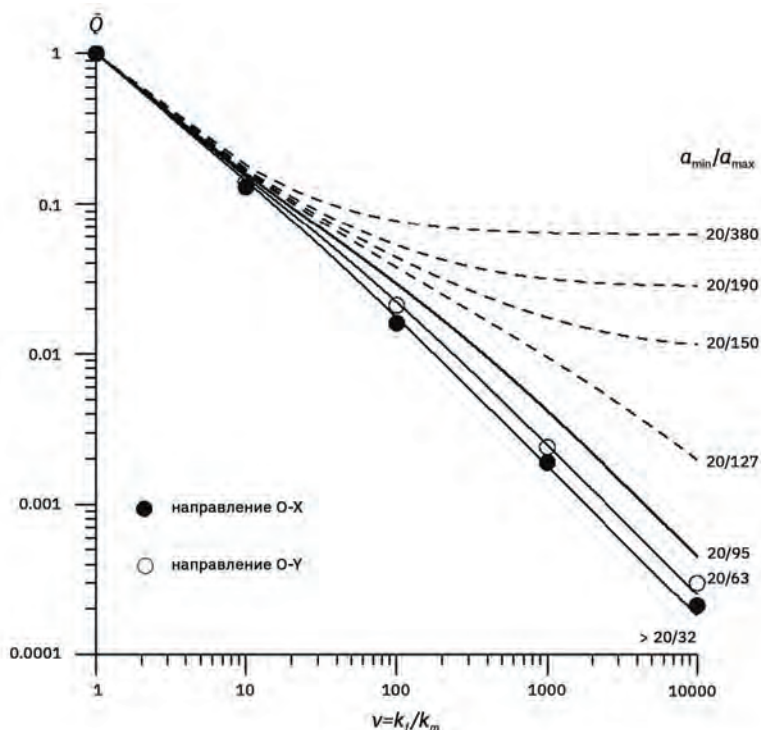


Рис. 5.49. График эффективного коэффициента фильтрации бинарного стохастического поля. Точки — численные эксперименты на модели (MODFLOW); кривые — аналитическая модель бинарной некоррелируемой трещиноватой среды [69], где НСЗ представлены сфероидами с соотношением главных осей (числа на графиках)

Полученные на численной модели значения эффективного коэффициента фильтрации (k_{eff}) достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов на аналитической модели идеализированной трехмерной бинарной системы, представленной проводящими включениями (сфероидами), равномерно (случайным образом) распределенными в менее проницаемой среде [69].

Экспериментальные точки на графике хорошо аппроксимируются кривыми (сплошные линии на графике), полученными при $p=0,14$, и $a_{min}=20$ и $a_{max}=95$, что не противоречит вариограммному анализу. Интересно отметить, что при фиксированном $a_{min}=20$ и двух-трехкратном увеличении a_{max} теоретические кривые выполаживаются, что свидетельствует о фокусировании основного потока в НСЗ. Грубо говоря, если с доверием относиться к стохастическому моделированию, то наличие НСЗ протяженностью в несколько сотен метров могло бы изменить представление о структуре фильтрационного потока на участке Енисейский. Пока же таких предпосылок нет, а результаты моделирования дают основание полагать, что установленная плотность водопроводящих трещинных зон (НСЗ) и корреляционные интегральные масштабы изменчивости не достаточны для образования связанных путей миграции. Иными словами, критерий перколяции массива не достигается, а процессы фильтрации и массопереноса допустимо рассматривать в рамках моделей эквивалентной пористой среды (ЕРМ), о чем пойдет речь в следующем подразделе.

Фрагментация фильтрационных потоков и режим фильтрации

Геологическое строение и геоморфология ландшафта в сочетании с гидрологическими и климатическими факторами определяют основные черты региональной подземной гидродинамики района. В геоморфологическом отношении этот объект находится на водоразделе между двумя региональными дренами — реками Енисей и Кан (рис. 5.50), имеющими примерно одинаковые абсолютные отметки уреза речных долин (116–121 м). С гидрологических позиций их можно считать реками первого порядка, водосборные площади которых находятся в пределах Нижнеканского гидрогеологического массива.

На рассматриваемой территории массив по условиям дренирования делится на два гидрогеологических бассейна трещинных вод — Енисейский и Канский. В таком представлении поверхностные и подземные площади водосборных бассейнов можно считать совпадающими.

Как видно на рис. 5.50, бассейны имеют резко асимметричную форму относительно водораздельной линии, проходящей примерно с юга на север в районе расположения объекта: профиль долины р. Енисей характеризуется относительно крутопадающими бортами речной долины, так что здесь следует ожидать значительных плановых гидравлических градиентов потока подземных вод. Наоборот, бассейн р. Кан отличается пологим уклоном поверхности водоносных пород, прорезаемых в верхней своей части неглубокими речными долинами.

Основная область питания бассейнов, формирующих региональный поток подземных вод, — водораздел в междуречье Енисея и Кана, представленный поднятым участком Енисейский (абсолютные отметки 380–570 м). Здесь же берет начало ряд рек второго и третьего порядка, являющихся притоками главных рек, Енисея и Кана. Они служат локальными областями разгрузки поверхностного стока и подземных вод верхней зоны гидрогеологического разреза.

Таким образом, в рассматриваемой гидрогеологической структуре, представленной двумя бассейнами трещинных вод, выделяются две профильные зоны (снизу вверх) — замедленного и активного водообмена. В ними связаны два типа фильтрационных потоков, выделение которых является принципиальным моментом гидрогеологической схематизации в свете рассматриваемой здесь проблемы безопасности эксплуатации проектируемого объекта (см. рис. 5.50):

- региональный поток подземных вод, контролируемый разгрузкой в региональные дрена — пойменные и подрусловые отложения рек Енисей и Кан;
- локальные потоки подземных вод с неглубоким залеганием уровня, контролируемые локальными формами рельефа и разгружающиеся в реки второго и третьего порядка.

Существование такого рода профильно деформированной структуры течения воды в горных породах отвечает классическим представлениям гидродинамики открытых гидрогеологических структур, получающих площадное инфильтрационное питание (жидкие атмосферные осадки в летне-осенний период и снеготаяние в весенний период). Характеристики регионального и локального фильтрационных потоков, в частности геометрия формируемых ими профильных зон захвата, определяются распределением проницаемости массива, величиной инфильтрации, степенью гидродинамического несовершенства поверхностных водотоков.

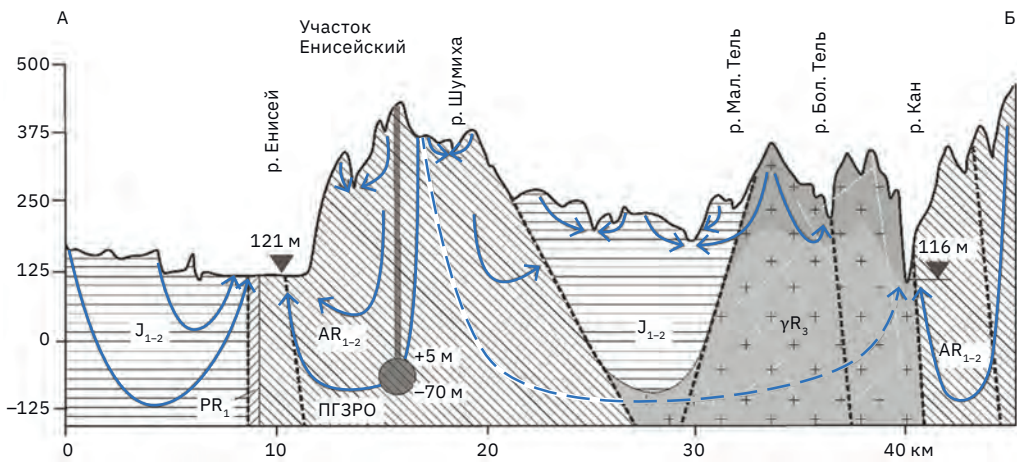


Рис. 5.50. Схематический геологический разрез, показывающий общую тектоно-стратиграфическую архитектуру юго-западной окраины Ангаро-Канского выступа
Синие линии — концептуальные линии тока

Проектируемый объект смещен от водораздельной линии в сторону Енисейского бассейна. Анализ материалов гидрогеологической разведки (см. раздел 5.2) позволил получить определенные доказательства справедливости представленного выше качественного анализа, нашедшего отражение на гидрогеологическом схематическом разрезе (см. рис. 5.50).

Первое. Профильная деформация сетки движения подземных вод на водораздельном участке вблизи проектируемого объекта подтверждается анализом данных наблюдений за распределением напоров в соседних скважинах, вскрывших различные интервалы обводненного массива, указывающих на падение напоров с глубиной (табл. 5.19).

Таблица 5.19. Сопоставление напоров в соседних скважинах, вскрывших различные интервалы обводненного массива

Куст	Скважина	Глубина скважины/ глубина обсадки, м	Дата замера уровня	Абсолютная отметка уровня, м
Р-2–2-2	Р-2	700/120	30.08.2010	399,77
	2-2	200/5,1		439,96
Р-7–7-2	Р-7	700/56,6	30.08.2010	398,73
	7-2	200/12,5		404,32
Р-11–Р-11-1	Р-11-1	509/299	01.09.2013	373,76
	Р-11	508/50,3		375,98

С другой стороны, такое распределение напоров говорит о том, что место создания объекта находится в зоне питания подземных вод, что делает невозможным миграцию радионуклидов «вверх», а это значит, что грунтовые воды и поверхностные водотоки участка защищены от загрязнения. Такие же закономерности распределения напоров по глубине были отмечены гидрогеологами на ГХК (см. раздел 4.4).

Второе. Наличие локальных потоков, контролируемых дренажным эффектом речной сети, в верхней зоне разреза подтверждается хорошей корреляцией абсолютных отметок поверхности рельефа и отметок поверхности подземных вод, установленной замерами уровня воды при проходке верхних интервалов скважин (рис. 5.51).

На график нанесены, помимо замеров уровня воды в скважинах участка Енисейский, данные режимных наблюдений за подземными водами в районе ГХК, а также на участке проектируемого водозабора в верховье р. Шумихи (2014 г.) — см. рис. 5.52.

Схематизация гидрогеологических условий фильтрации и обоснование параметров

Инфильтрационное питание подземных вод. Одной из главных характеристик, задаваемых в модели, является инфильтрационное питание подземных вод. Для его определения был проанализирован доступный фондовый материал и литературные источники информации регионального характера, а также использованы данные первого этапа водно-балансовых исследований.

Полученные данные режимных воднобалансовых наблюдений [м], анализ типов питания поверхностных водотоков, оценка изменений уровней воды в скважинах, гидрометрическая съемка, а также особенности ландшафтов использовались для построения карты распределения величины инфильтрационного питания (рис. 5.52).

Границы модели и режим фильтрации. Внешние (плановые) гидродинамические границы определяются структурой фильтрационного потока и расположением региональных зон разгрузки (см. рис. 5.52).

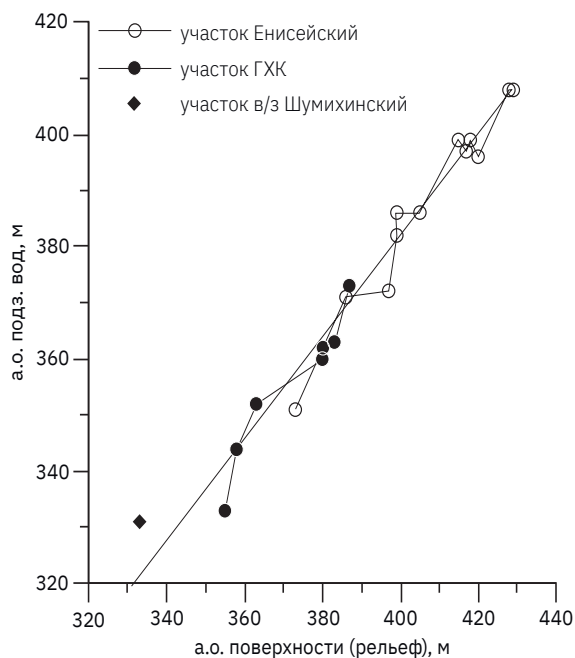


Рис. 5.51. Связь абсолютной отметки уровня подземных вод и абсолютной отметки рельефа

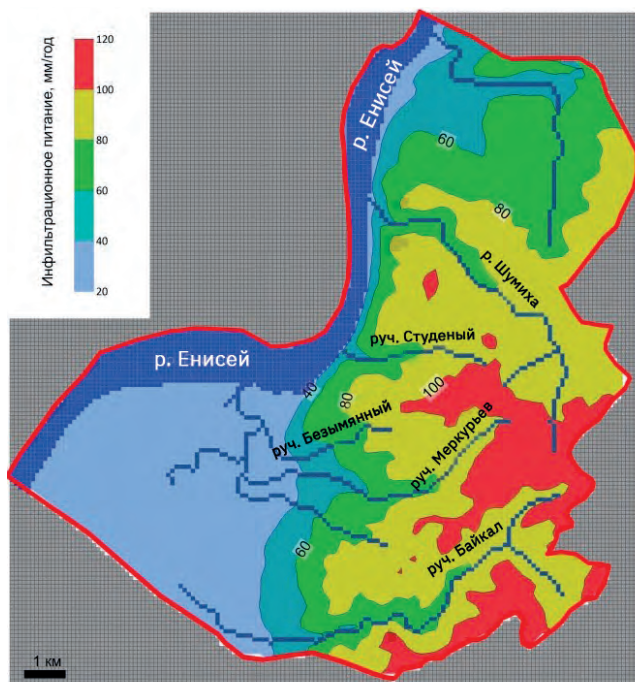


Рис. 5.52. Карта-схема инфильтрационного питания территории на 2019 г.

Исследование фильтрации подземных вод на математической модели

Описание модели. Для решения геофильтрационной задачи использовался программный комплекс Processing Modflow [70], включающий в себя модули MODFLOW [71] и MODPATH [68].

Профиль проницаемости данной трехмерной модели аппроксимировался пятью слоями (рис. 5.53), фильтрационные свойства которых в плане оставались неизменными. Этот профиль корректировался в процессе калибровки модели. Кровля и подошва каждого из слоев не являлись горизонтальными плоскостями: их абсолютные отметки задавались линейно коррелированными с абсолютными отметками рельефа поверхности, так что мощности слоев варьировали в довольно широком диапазоне значений.

Результаты предварительного моделирования потока подземных вод

Модельная структура фильтрационного потока. На рис. 5.54 представлены послойные карты пьезоизогипс, характеризующие распределение напоров на различных абсолютных отметках. Хорошо видно, что река Шумиха и ручей Байкал, а также ручьи Безымянный, Студеный, Меркурьев оказывают дренажное влияние на водоносные породы в верхней части разреза. На более низких абсолютных отметках, в частности, совпадающих с проектными отметками заложения инженерного объекта (ПГЗРО), такое влияние не доказано. Подземные воды, вероятно, транзитом проходят этот участок и разгружаются в р. Енисей.

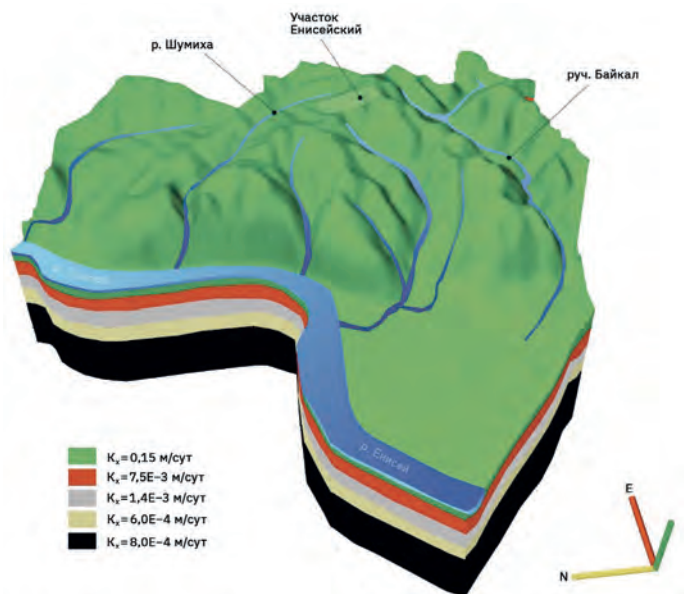


Рис. 5.53. 3D-представление модельной области

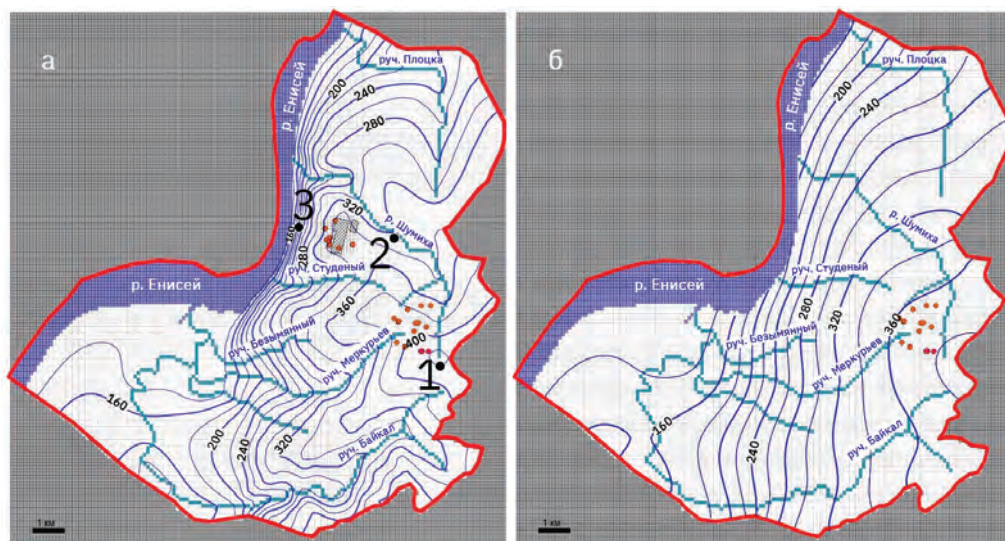


Рис. 5.54. Распределение напоров:
а — в верхнем слое модели; б — на целевом интервале ПГЗРО
1, 2, 3 — контрольные точки

Главным выводом данного раздела является доказательство отсутствия восходящего потока подземных вод на участке размещения объекта, который мог бы потенциально повлиять на мелкую речную сеть. Областью разгрузки растворов, формирующихся после закрытия объекта, будет приурочена к долине р. Енисей. Очевидно, что при такой фильтрационной картине наличие субвертикальных зон с резко повышенной проницаемостью (например, связанных с контактом даек и гнейсов) не должно сколько-нибудь заметно снизить показатели защищенности грунтовых вод при радиоактивном загрязнении нижних зон разреза на постэксплуатационной стадии.

5.4. Результаты инструментальных наблюдений за современными движениями земной коры

Геодинамические наблюдения с использованием высокоточного нивелирования, а в последние 20 лет и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) убедительно показали соответствие между скоростями современных вертикальных и горизонтальных движений земной коры (СДЗК), формами рельефа земной поверхности и ее структурным расчленением (по крайней мере в четвертичное время). Регистрируемые смещения земной поверхности по своей сути являются картиной, интерференционно отражающей силовое воздействие на верхнюю часть земной коры различных по масштабу и времени эндогенных и экзогенных геодинамических источников.

Исследование вертикальных СДЗК в регионе активно началось [n—u] в конце 1980-х и начале 1990-х гг. В 1989—1991 гг. по четырем маршрутам, пересекающим Муратовский разлом, было проведено высокоточное нивелирование по программе 1-го класса точности [n]. Длина профилей составляла от 1,0 до 3,0 км, количество реперов в профиле — от 4 до 5. Расхождение в измеренных превышениях между реперами профилей не выходило за предел точности измерений. При этом прослеживалась закономерность опускания западного крыла Красноярского разлома относительно восточного крыла по профилям 1 и 3 и обратная закономерность по профилю 4. Величина «опускания» по всем трем профилям за период 1989—1991 гг. составила ~3 мм. С 1985 по 1991 г. на полигоне заправки ЖРО «Северный» был проведен 31 цикл геодезических наблюдений [o], которые показали, что движения по разлому, упирающемуся с запада в Правобережный разлом, не превышают $\pm 1,0$ мм/год. Методика нивелирования позволяла оценивать вертикальные движения с точностью $\pm 0,5$ мм/1 км. По профилям, пересекающим Муратовский, Первый Красноярский, Правобережный и Большетельский тектонические разломы, были получены вертикальные смещения, также не превышающие точности метода. По профилю, пересекаемому Атамановским разломом, за 1996—2002 гг. установлено опускание западного крыла блока относительно восточного со скоростью $v_{\text{верт}} = -2,4$ мм/год.

В 2002 г. силами ФГУП «КГПИИ «ВНИПИЭТ» были проведены наблюдения за вертикальными СДЗК [r] по профилю 1 длиной 33 км, пересекающему основные тектонические нарушения района (рис. 5.55). В 2006 г. было выполнено повторное нивелирование того же профиля. В итоге — по контролируемому участку Правобережного разлома за 1997—2006 гг. зарегистрировано опускание западного крыла относительно восточного. Величина смещения составила 3,8 мм, а среднегодовая скорость — 0,4 мм/год.

По одному из участков, пересекающих Муратовский разлом, за период с 1990 по 2006 г. было отмечено опускание западного крыла разлома относительно восточного. Величина смещения составила 8,4 мм, скорость 0,5 мм/год [q]. В 1998 г. на поверхности площадки ГХК было заложено пять планово-высотных наблюдательных пунктов, в 1999 г. выполнен нулевой цикл, а в 2002–2003 гг. — 1-й цикл измерений. Надежно фиксируемые скорости деформаций получены в пределах $\pm 0,5$ –1,0 мм/год [s]. В 2012–2016 гг. сотрудниками ООО «Геолком» были возобновлены геодезические наблюдения за СДЗК методами высокоточного повторного нивелирования и ГНСС-методом (рис. 5.55) [72] [v]. Было проведено еще четыре цикла наблюдений.

Детальные данные об амплитудах вертикальных СДЗК по нивелировочным профилям приведены в соответствующих отчетах [w–z]. Субширотный профиль 1 пересекает район с запада на восток до восточного крыла Большетельского сброса (см. рис. 5.55).

На рис. 5.56 приведены результаты, которые были получены путем обобщения ряда отчетов. Наиболее интересны графики по участку от Правобережного до Муратовского разлома. Всего по профилю измерения были выполнены семь циклов наблюдений: нулевой цикл в 2002 г. и затем еще шесть циклов по 2015 г. включительно. Превышения между пунктами наблюдательной сети при нивелировании 1-го класса точности были определены с ошибкой $\pm 0,7$ мм/км. Оценка вертикальных СДЗК проводилась путем сопоставления превышений между репером *Rp* 24 профиля, расположенного в восточном крыле Правобережного разлома, принятого за «нулевой», и реперами по профилю в западном направлении.

Из рис. 5.56 видно, что вертикальные движения, как правило, имеют разнонаправленный характер во времени. Закономерных однонаправленных движений, по величине значительно превосходящих точность измерений, за период наблюдений с 2002 по 2015 г. не зафиксировано. Тектонические структурные блоки, содержащие наблюдательные пункты *Rp* 26 и *Rp* 0197, испытывали разнонаправленные вертикальные движения относительно пункта *Rp* 24. И в том и в другом случае преобладали периоды опускания, на фоне которых имеются периоды положительных движений разной продолжительности. Однако из рис. 5.57 видно, что имеется общий тренд опускания западного крыла Правобережного разлома относительно восточного с суммарной амплитудой около 5 мм за тринадцать лет, то есть в среднем на 0,4–0,5 мм/год. Далее на запад по профилю 1 в 2002–2006 гг. отмечалось незначительное опускание западного крыла блока (*Rp* 0197), ограниченного с востока Правобережным и с запада Атамановским нарушениями, относительно восточного крыла блока (*Rp* 26), а в интервале 2006–2011 гг., наоборот, — поднятие. Такое поведение связано с известным фундаментальным свойством геодинамических движений — цикличностью [73, 74].

Исследование горизонтальных СДЗК с использованием спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС проводилось Геофизическим центром РАН с перерывами с 2010 по 2019 г. [73–77]. В 2010 г. были выполнены наблюдения на 10 пунктах в пределах участка Енисейский (эпоха 0), а затем в 2012–2016 и 2019 гг. (эпохи 1–6) работы проводились на полноценном геодинамическом полигоне, созданном силами ГХК и ООО «Геолком», состоящего из 30 капитальных пунктов.

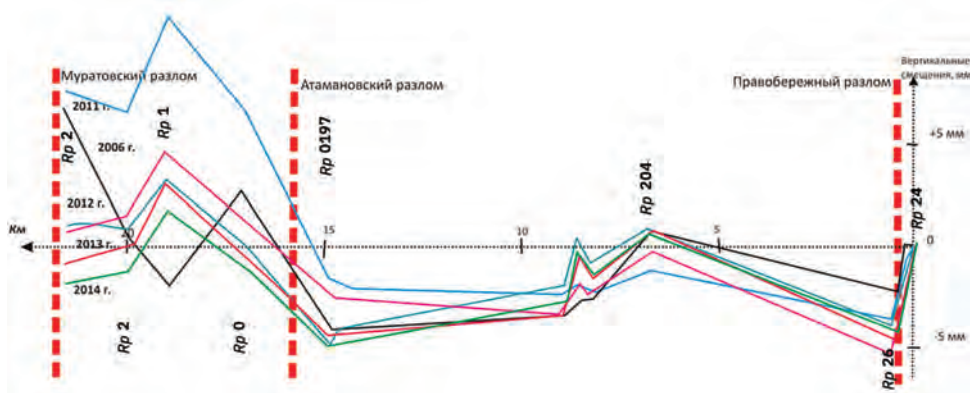


Рис. 5.56. Графики изменения превышений реперных пунктов по данным нивелирования 1-го класса за 2002–2015 гг. [v]

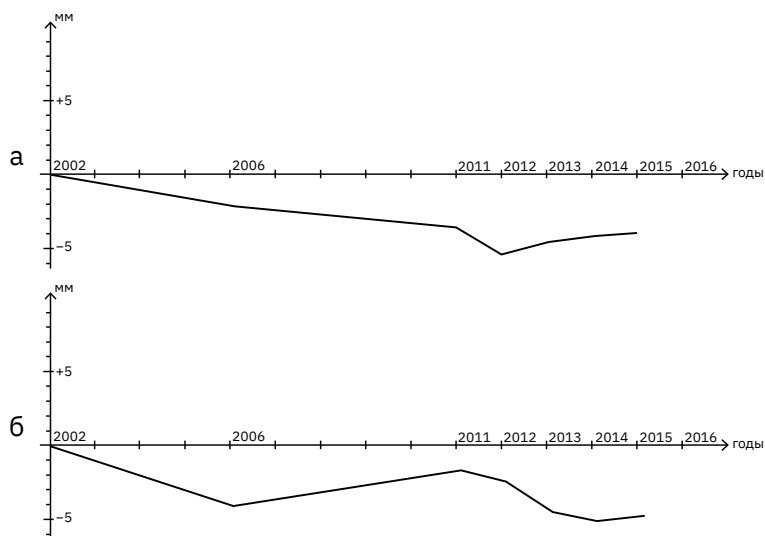


Рис. 5.57. Графики вертикальных перемещений репера Rp 26 (а) и репера Rp 0197 (б) относительно репера Rp 24 с 2002 по 2012 г. [73]

Для определения векторов смещений и деформаций были использованы подходы и алгоритмы, описанные в [77, 78]. Результаты уравнивания показали, что пункты в западной части 1201, 1202, 1212 и 1213 (см. рис. 5.55) образуют группу взаимноустойчивых пунктов, фактически не изменяющих свое взаимоположение в пределах средних квадратических ошибок (СКО) их определений. Эти пункты были выбраны в качестве условно устойчивых и расчет смещений остальных осуществлялся по отношению к этой группе, центр тяжести смещений которых считался неподвижным.

В результате расчетов были получены уравненные компоненты векторов базовых линий и их СКО (рис. 5.58). Оценки СКО положения пунктов в плане и по высоте лежат в диапазонах 3–4 мм и 5,5–7 мм соответственно. При таких низких значениях СКО зарегистрированные изменения длин базисных линий ΔL безусловно связаны с природными факторами, а не ошибками наблюдений или обработки.

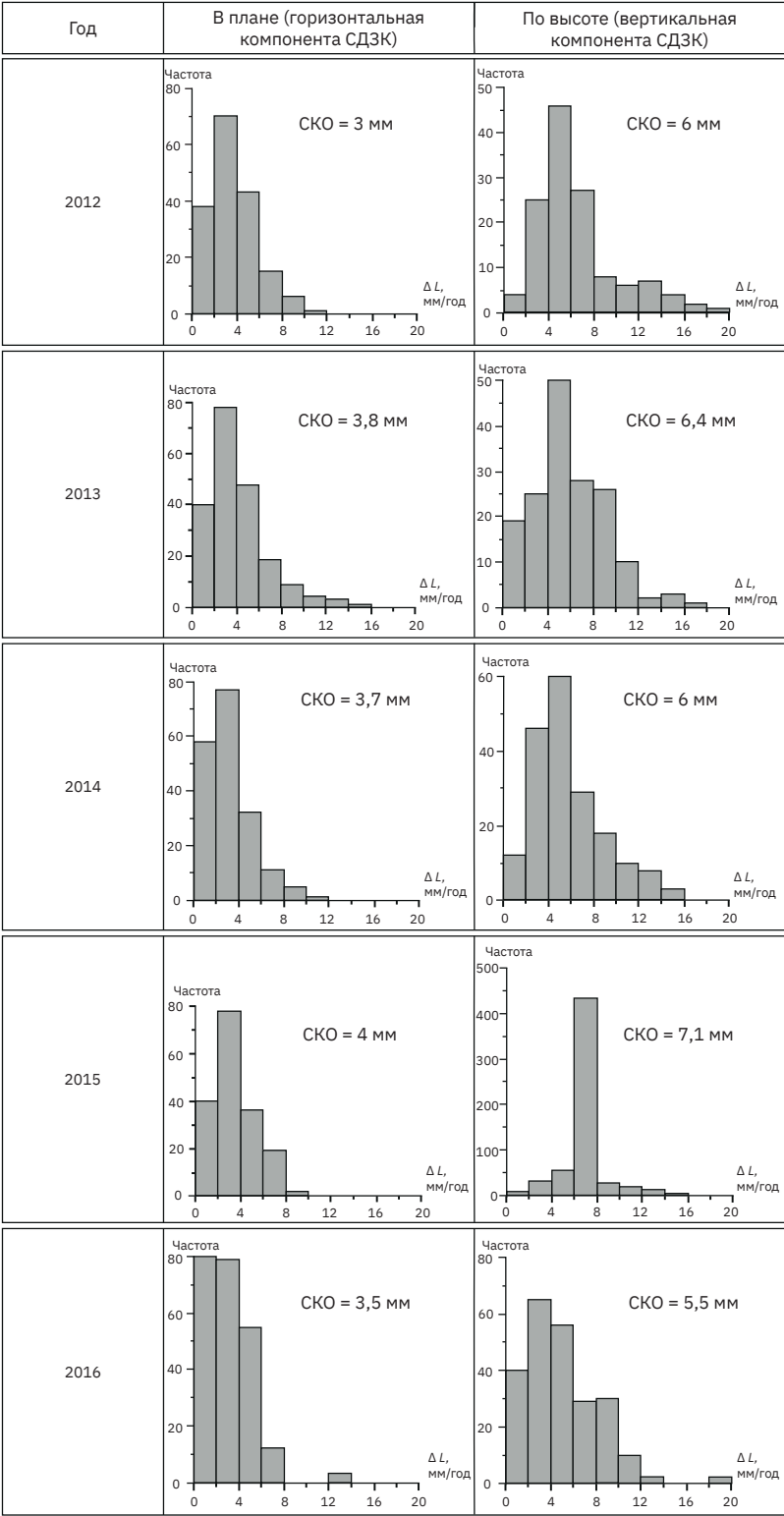


Рис. 5.58. Оценки СКО определения длин базовых линий для эпох наблюдений, выполненных в 2012–2016 гг.

Установлена пространственно-временная закономерность в развитии геодинамического режима района. Были выделены три периода по степени активности (рис. 5.59–5.60):

- первый: 2010–2013 гг., когда максимальные изменения длин не превышали 10 мм, а в целом были существенно ниже;
- второй: 2013–2014 гг., когда резко возросло количество базовых линий, для которых изменения их длин ΔL достигали 10–20 мм;
- третий: 2015–2016 гг., когда начался переход к геодинамическому режиму первого периода.

В левобережной части вначале (рис. 5.59), наоборот, почти все линии увеличили свою длину, т. е. район испытывал растяжение. Затем, в 2013–2014 гг., картина резко изменилась на прямо противоположную (рис. 5.60). На правом берегу зарегистрированы деформации растяжения почти для всех линий, а на левом — сжатия. Вероятно, в период 2013–2014 гг. произошел цикл активизации тектонического режима.

За счет эффекта цикличности значения скоростей СДЗК, регистрируемые в течение года, существенно уменьшаются для длительных интервалов наблюдений (превышающих 5–10 лет). На рис. 5.61 показана диаграмма распределения скоростей изменения ΔL для 6-летнего интервала наблюдений. Средняя скорость изменения ΔL составила $0,42 \pm 0,29$ мм/год. Это говорит о том, что в целом площадь района за время наблюдений испытывала незначительное растяжение.

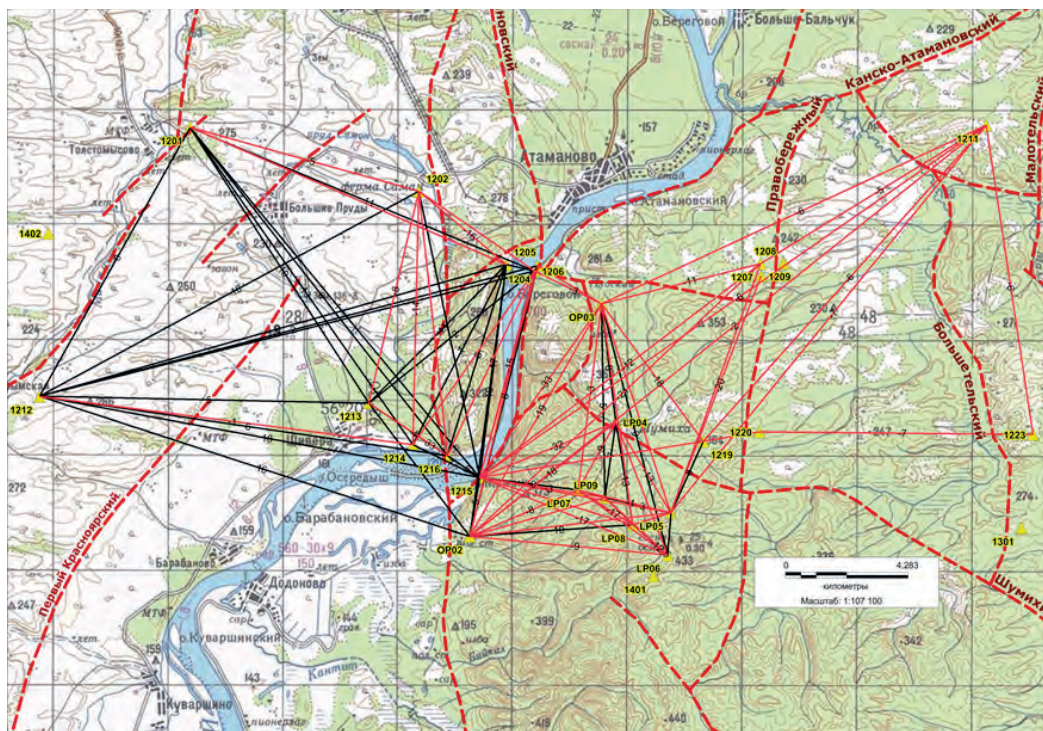


Рис. 5.59. Изменения длин базисных линий за период 2012–2013 гг.

Черный цвет — длина линий не изменилась или увеличилась (растяжение); красный цвет — длина линий уменьшилась (сжатие)

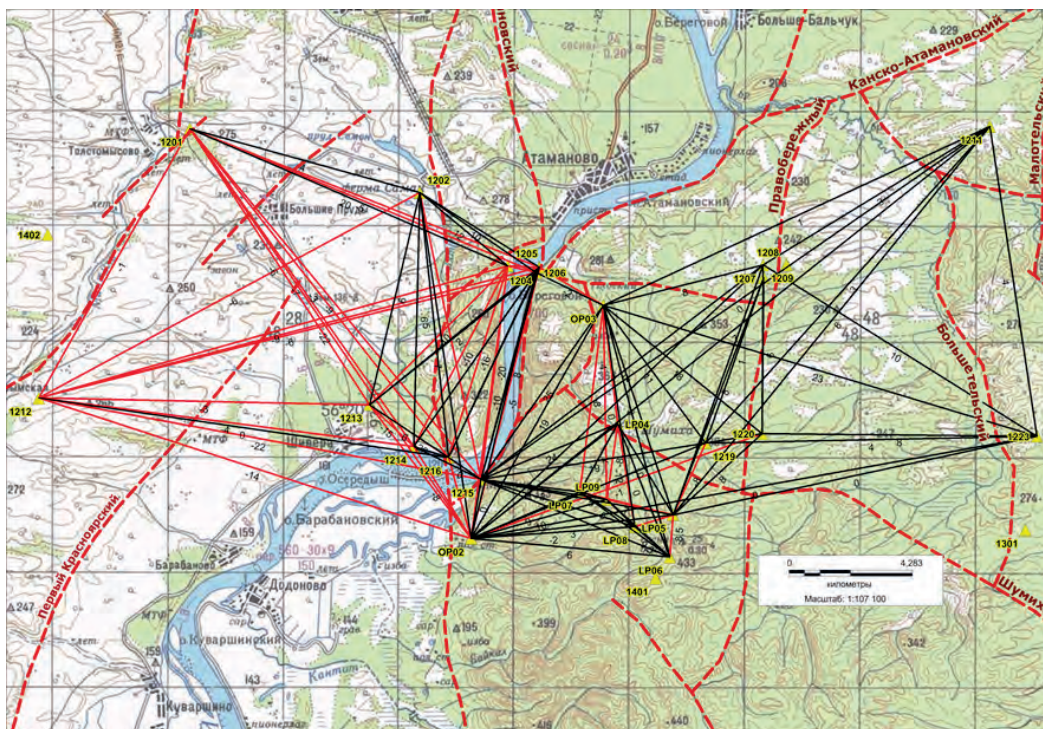


Рис. 5.60. Изменения длин базисных линий за период 2013–2014 гг.

Черный цвет — длина линий не изменилась или увеличилась (растяжение); красный цвет — длина линий уменьшилась (сжатие)

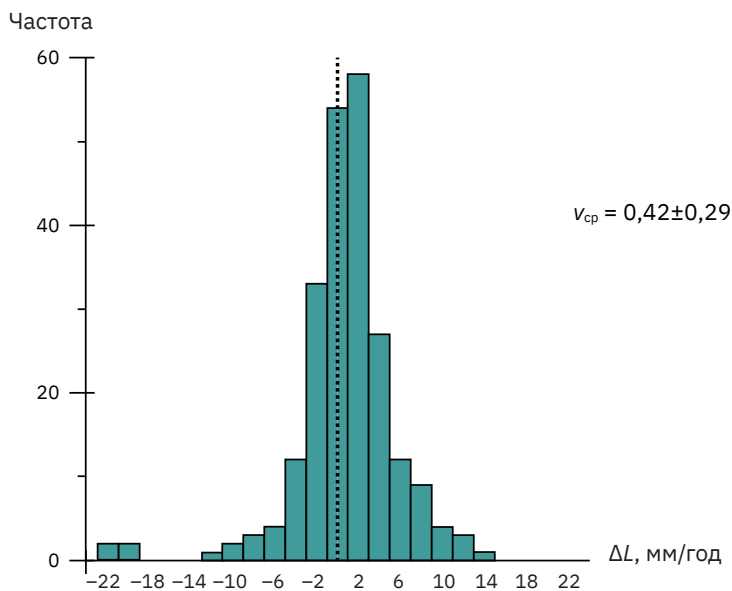


Рис. 5.61. Диаграмма распределения изменения величин ΔL с 2010 по 2016 г.

Для прогноза устойчивости объектов с длительным сроком эксплуатации существенное значение имеют, собственно, не сами смещения, а скорости деформаций. Из всех деформационных характеристик наиболее показательной оказалась площадная деформация (дилатация), которая характеризует изменения площади земной поверхности: увеличение (растяжение) или уменьшение (сжатие). Дилатация рассчитывается как сумма скоростей деформаций в широтном и меридиональном направлениях, деленная пополам, то есть $\Delta = (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})/2$. На рис. 5.62 приведены карты дилатации для различных эпох наблюдений.

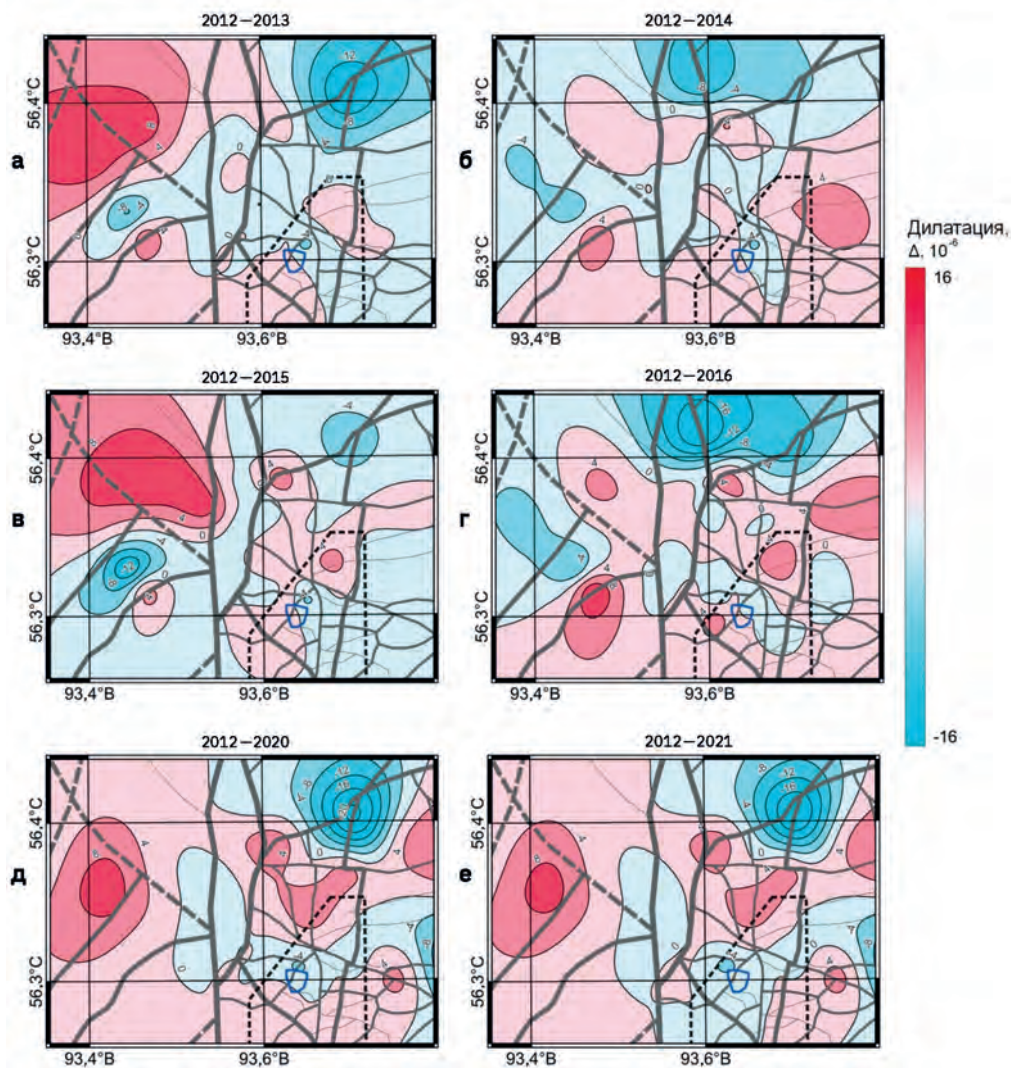


Рис. 5.62. Динамика изменения дилатации по эпохам наблюдений с 2012 по 2021 г. Красный цвет — поверхностное растяжение; синий — поверхностное сжатие

Главные особенности их пространственно-временного изменения следующие.

- В целом, за период наблюдений с 2012 по 2021 г. значения дилатации не превышали по модулю $1,6-8 \cdot 10^{-5}$. Площадка строительства ПИЛ находится в зоне минимальных значений скоростей деформаций, на границе растягивающих и сжимающих деформаций.
- При этом характер изменения положения зон максимального сжатия и растяжения, вероятно связанных с глубинной геодинамикой верхней части земной коры, носил циклический характер. Так, например, в эпоху 2012–2014 гг. зона растягивающих деформаций, зарегистрированная в западной части в эпоху 2012–2013 гг. (рис. 5.62, а), исчезла, но появилась новая — на востоке (рис. 5.62, б). В 2015 г. общая картина распределения зон сжатия и растяжения фактически вернулась к эпохе 2012–2013 гг. (рис. 5.62, в).
- Далее, в 2016 г. (рис. 5.62, г) характер распределения поля дилатации с незначительными отличиями повторяет эпоху 2012–2014 гг. (см. рис. 5.62, б), т. е. продолжительность цикла режима сжатие-растяжение составила приблизительно два года.
- Через четыре года — в 2020 и 2021 гг. вид распределения поля дилатации слегка изменился (рис. 5.62, д, е), но в целом остался близок к эпохе 2012–2013 гг. При этом зоны максимальных отрицательных дилатаций практически не изменяют положения, что говорит о их природном характере.

Инструментальные методы изучения кинематики современных движений земной коры использованы для

- *выявления пространственных и временных закономерностей современных движений земной поверхности в районе участка Енисейский;*
- *выявления качественных и количественных взаимосвязей современных движений и микросейсмической активности тектонических нарушений в ближней и дальней зонах ПГЗРО.*

Результаты повторного нивелирования показали, что

- *скорости вертикальных СДЗК в районе исследования не превышают 2,5 мм/год;*
- *имеется разброс скоростей вертикальных СДЗК, установленных исследователями в различные периоды от 0,1 до 2,5 мм/год, что, вероятно, связано с цикличностью геодинамических движений;*
- *вертикальные движения структурных блоков, лежащих к востоку и западу от Атамановского и Муратовского разломов, имеют различный динамический режим, который проявляется в амплитуде движений и смене их знака. Дополнительно к этому необходимо отметить сохранение в течение всего времени согласованности и цикличности движений реперов.*

ГНСС-наблюдения за горизонтальными движениями:

- *подтверждают гипотезу о том, что геодинамическим источником современных горизонтальных движений является взаимодействие крупнейших тектонических структур района — зоны контакта Сибирской плиты и Западно-Сибирской платформы и подчиненных крупных тектонических разломов. В пределах участка Енисейский отмечается некоторая «турбулентность» в кинематике СДЗК, вероятно, связанная с плотным расположением пунктов наблюдений;*
- *указывают на то, что тектонические зоны Муратовского и Атамановского разломов, пространственно связанные с р. Енисей и зоной контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты, активны в настоящее время и делят регион на две части.*

Заключение

Принятие Закона Российской Федерации «О недрах» и нормативных документов Минприроды России, касающихся разведки участков недр, не связанных с добычей полезных ископаемых (в том числе под захоронение РАО), позволило начать систематическое изучение участка Енисейский в две стадии — поисковую (2009—2010 гг.) и оценочную (2010—2011 гг.). В 2013—2014 гг. на участке проведены инженерные изыскания под строительства наземных сооружений на площади ок. 1,7 км². На этом этапе основным методом изучения недр участка являлось бурение разведочных скважин, в том числе глубоких (600—700 м), по периметру будущего ПГЗРО (ПИЛ), геофизические и гидрогеологические испытания в них. С поверхности выполнен комплекс площадных геофизических работ. Выполнены порядка тысячи анализов проб на физико-механические и деформационные свойства пород, химические анализы проб пород и подземных вод. К решению широкого круга вопросов, касающихся обоснования пригодности Енисейского участка для окончательной изоляции РАО, были привлечены соответствующие специалисты. Отчеты по выполненным работам каждого этапа рассматривались в ГКЗ Роснедра, которая подтвердила, *что по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок Енисейский является пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов в архейских гнейсах Нижне-Канского массива* и при этом представила рекомендации по доизучению участка.

Результаты геологических исследований участка за 2009—2014 гг. отражены на геологической карте, разрезах и 3D-моделях и характеризуют блок размещения РАО, включая интервал на глубине от +5 до –70 м. Результирующие материалы геологических исследований представлены в двух альтернативных 3D-моделях, что связано с малой изученностью блока глубоким бурением и, соответственно, с неопределенностями в увязке отдельных пересечений.

Первая 3D-модель — объемная визуализация геологических структур, выделенных К. А. Заблочким («Красноярскгеология») по результатам оценочного и поискового этапов изучения участка. В этой модели представлена увязка дайкового комплекса, а также разрывных нарушений горных пород. Вторая 3D-модель создана на основе переинтерпретации О. А. Морозовым (ИБРАЭ РАН) данных первичной геологической документации керна буровых скважин с упором на разрывную тектонику.

Результаты изучения гидрогеологических условий участка за 2009—2014 гг., которые отражены на соответствующих картах, разрезах и в таблицах, представляют параметры среды и путей миграции радионуклидов. Опытные-фильтрационные работы в скважинах, выполненные на участке Енисейский в ходе гидрогеологических исследований, показали, что поинтервальное изменение напоров с глубиной не проявляет выраженных тенденций. Это главная неопределенность, обусловившая создание альтернативных гидрогеологических моделей коллективами ИБРАЭ РАН и СПБО ИГЭ РАН.

Авторы модели ИБРАЭ РАН (Г. Д. Неуважаев, А. В. Расторгуев и О. А. Морозов) отталкиваются от результатов измерений напоров при опытно-фильтрационных работах. Как следствие, общее направление потока подземных вод на уровне горизонта –70 м ориентировано в плане на северо-северо-восток с разгрузкой в сторону р. Шумихи. От него зафиксировано одно отклонение на северо-запад, в направлении разлома Безымянный. В целом, направление потока подземных вод коррелирует с простиранием основных тектонических структур участка.

Авторы модели СПбО ИГЭ РАН (В. Г. Румынин, А. М. Никуленков, Л. Н. Синдаловский и А. А. Шварц) рассматривают гидрогеологическую структуру участка с позиции классических представлений гидродинамики открытых гидрогеологических структур, получающих площадное инфильтрационное питание. В свете этих представлений в разрезе выделяются две зоны. В верхней зоне с активным водообменом поток подземных вод контролируется локальными формами рельефа и разгружается в местные водотоки. В нижней зоне с замедленным водообменом поток подземных вод имеет региональный характер, контролируемый разгрузкой в региональные дрены — реки Енисей и Кан. Авторы приводят определенные доказательства справедливости этих представлений.

Результаты изучения в районе участка Енисейский кинематики современных движений земной коры инструментальными методами показали незначительные (менее 2,5 мм/год) скорости вертикальных движений земной коры, причем границей различных динамических режимов является линия Атамановского и Муратовского разломов. Эта линия, которая служит зоной тектонического контакта Сибирской плиты и Западно-Сибирской платформы, также контролирует различный режим горизонтальных движений в районе. Оба феномена указывают на активность в настоящее время этой границы, которая делит район на две части.

Литература

1. О недрах: № 2395-1: [Новая редакция, изложенная в Федеральном законе от 03.03.1995 № 27-ФЗ]: [в редакции федерального закона от 29.12.2022 № 598-ФЗ]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2022.
2. Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых: [рекомендованы к использованию протоколом МПР России № 11-17/0044-пр от 03.04.2007]. — М.: ФГУ «ГКЗ», 2007. — 36 с.
3. Озерский А. Ю. Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок Енисейский): Росгеолфонд: Геологический отчет: инв. № 499524 / А. Ю. Озерский, К. А. Заблоцкий, Е. Г. Полякова и др. — Красноярск: ОАО «Красноярскгеология», 2010. — 994 с.
4. Озерский А. Ю. Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»): Росгеолфонд: Геологический отчет: инв. № 505972 / А. Ю. Озерский, К. А. Заблоцкий, М. Д. Ощепков и др. — Красноярск: ОАО «Красноярскгеология», 2011. — 2223 с.
5. Государственная экспертиза материалов «Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок "Енисейский")»: [Протокол № 2367пс-дсп заседания Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ Роснедра) от 17.12.2010: утв. 26.01.2011]: Росгеолфонд: Протокол ГКЗ: инв. № 499523. — М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, 2010.
6. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-04: [утв. приказом Ростехнадзора № 8 от 19.10.2004]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2004.
7. Siting of geological disposal facilities: IAEA Safety Series: Safety Guide No. 111-G-4.1. — Vienna, Austria: IAEA, 1994. — 33 p.
8. Ozerskiy A. Trace elements in the environment at the site of probable underground building in the Nizhnekansky rock massif (Siberian craton) // Goldschmidt 2013 conference abstracts / A. Ozerskiy, D. Ozerskiy // Mineralogical Magazine. — 2013. — Vol. 77. — № 5. — P. 1869–1909. — DOI: 10.1180/minmag.2013.077.5.15
9. Государственная экспертиза материалов «Геологические исследования (оценочная стадия) объекта экспертизы материалов «Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок "Енисейский")»: [Протокол № 2755-пс заседания Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых (ГКЗ Роснедра) от 13.04.2012: утв. 16.05.2012]: Росгеолфонд: Протокол ГКЗ: инв. № 505971. — М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, 2012.
10. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: №190-ФЗ: [Федеральный закон от 11.07.2011]: [в редакции от 02.07.2013 № 188-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, от 21.12.2021 № 421-ФЗ]. — Официальный интернет-портал правовой информации, 2021.
11. Выбор расположения и обоснование пригодности участка для создания подземной исследовательской лаборатории на Нижнеканском массиве горных пород / Н. Ф. Лобанов, В. П. Бейгул, П. В. Лопатин, А. Ю. Озерский // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 59–63. — DOI: 10.17580/gzh.2015.10.11
12. Петров А. В. Компьютерная технология статистического и спектральнокорреляционного анализа данных КОСКАД 3D и практические результаты / А. В. Петров, Г. В. Демура, С. В. Зиновкин // Недропользование XXI век. — 2017. — № 1 (64).
13. Micromine — technology for mining. — URL: <https://www.micromine.com>
14. Караулов В. А. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450–525 метров (+ 5 — –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив): Росгеолфонд: Геологический отчет: инв. № 522488 / В. А. Караулов, К. А. Заблоцкий, Е. А. Панов и др. — Красноярск: ОАО «Красноярскгеология», 2015. — 679 с.

15. Утверждение заключения государственной экспертизы материалов «Геологического доизучения (оценочная стадия) горного массива участка Енисейский для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450–525 метров (+5 — –70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив)»: [Протокол № 4523-пс заседания Государственной комиссии по запасам полезных ископаемых Федерального агентства по недропользованию от 03.02.2016: утв. 15.04.2016]: Росгеолфонд: Протокол ГКЗ: инв. № 522487. — М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, 2016.
16. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-14: [утв. приказом Ростехнадзора № 379 от 22.08.2014]: [в ред. приказов Ростехнадзора № 582 от 22.11.2018, № 163 от 18.05.2022]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2022.
17. Геохронология силлиманит-кордиеритовых гнейсов атамановской серии Южно-Енисейского кряжа (Россия) / А. М. Сазонов, К. А. Заблочный, У. Линнеманн и др. // Литосфера. — 2017. — № 2. — С. 49–59.
18. Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт ГОСТ 25100-2020: [введен 01.01.2021]. — М.: Стандартинформ, 2020. — 37 с.
19. Теплофизические свойства грунтов // Грунтоведение: учебник для студентов вузов, обучающихся по геологическим специальностям / под ред. В. Т. Трофимова. — М.: Издательство Московского университета; Издательство «Наука», 2005. — С. 395–405.
20. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований / под ред. Н. П. Лаверова, В. П. Орлова — М.: МФ «ТЕХНОНЕФТЕГАЗ», 1998. — 260 с.
21. Озерский А. Ю. Опыт исследования теплофизических свойств пород архейского массива / А. Ю. Озерский // Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Выпуск 21. — Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. — С. 93–99.
22. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). Объяснительная записка / Л. П. Никулов, А. Н. Бабкин, В. М. Колямкин и др.; под ред. Л. К. Качевского. — 2-е издание. — М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
23. Методическое пособие по составлению мелкомасштабных карт четвертичных образований к госгеолкарте-1000/3 / под ред. Е. А. Мининой, В. В. Старченко. — СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2005. — 190 с.
24. Парфенов Ю. И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV / Ю. И. Парфенов, Ю. И. Гончаров; под ред. Г. И. Кириченко. — М.: Госгеолтехиздат, 1963.
25. Инженерные изыскания для строительства. Технические требования к производству геофизических работ. Каротажные методы: Республиканские строительные нормы № РСН 75-90: [утв. Госстроем РСФСР 21.06.1990]. — М.: МосЦИТИСИЗ, 1990.
26. Череменин Г. А. Геотермия / Г. А. Череменин. — Л.: Недра. Ленинградское отделение, 1972. — 271 с.
27. Eppelbaum L. Applied geothermics: Lecture Notes in Earth System Sciences / L. Eppelbaum, I. Kutasov, A. Pilchin. — Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2014. — 751 p. — DOI: 10.1007/978-3-642-34023-9
28. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангара-Енисейская. Лист О—46 — Красноярск. Объяснительная записка / В. К. Зуев, Л. К. Качевский, Г. И. Качевская и др. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. — 500 с.
29. Морозов О. А. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) / О. А. Морозов, А. В. Расторгуев, Г. Д. Неуважаев // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 4(9). — С. 46–62.
30. Разработка обобщенного плана проведения научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ по созданию объекта подземной изоляции РАО на Нижнеканском массиве: Итоговый отчет (за период 01.05.2002 — 31.01.2005): Проект МНТЦ № 2377Р / Т. А. Гупало, В. П. Бейгул, В. Л. Миловидов и др. — М.: ФГУП «ВНИПИПромтехнологии», 2005.

31. Озерский А. Ю. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа / А. Ю. Озерский, В. А. Караулов // Инженерные изыскания. — 2012. — № 11. — С. 52–62.
32. Ozerskiy A. Hydrogeological conditions of the Archean crystalline rock massif in the southern part of the Yeniseyskiy Ridge (Siberian craton) / A. Ozerskiy, V. Karaulov // 10th International Hydrogeological Congress: Conference Proceedings. — Thessaloniki, Greece, 2014. — Vol. 1. — P. 597–604.
33. Озерский А. Ю. Особенности фильтрации подземных вод в массиве кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа. / А. Ю. Озерский // Комплексные проблемы гидрогеологии: Тезисы докладов научной конференции. — СПб.: СПбГУ, 2013. — С. 110–113.
34. Ozerskiy A. Hydrogeology of the Archean crystalline rock massif in the Southern part of the Yeniseyskiy ridge (Siberian craton) / A. Ozerskiy // Universal journal of geoscience. — 2017. — Vol. 5. — № 5. — P. 151–155. — DOI: 10.13189/ujg.2017.050505
35. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. — 2-е издание, исправленное и дополненное. — М.: Недра, 1998. — 365 с.
36. Бондарева Л. Г. Определение содержания трития в объектах окружающей среды / Л. Г. Бондарева, С. А. Жаровцева // Вестник Красноярского государственного университета. Естественные науки. — 2003. — № 2. — С. 127–129.
37. Озерский А. Ю. Формирование химического состава подземных вод в массиве водонепроницаемых архейских пород в южной части Енисейского кряжа / А. Ю. Озерский // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Всероссийской конференции с участием иностранных ученых. — Томск: Издательство НТЛ, 2012. — С. 158–161.
38. Озерский А. Ю. Гидрогеохимические особенности формирования состава подземных вод в массиве водонепроницаемых архейских пород в южной части Енисейского кряжа / А. Ю. Озерский // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием. — Владивосток: Издательство «Дальнаука», 2015.
39. Ozerskiy A. Hydrogeochemical conditions in Archaean impermeable crystalline rocks (Siberian Craton) / A. Ozerskiy // Goldschmidt 2015 Abstracts: 25th V. M. Goldschmidt Conference (Prague, Czech Republic, 16–21.08.2015). — 2015. — P. 2372.
40. Haitjema H. M. Analytic element modeling of groundwater flow / H. M. Haitjema. — San Diego, California, USA: Elsevier, 1995. — DOI: 10.1016/B978-0-12-316550-3.X5000-4
41. Валетов Д. К. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма / Д. К. Валетов, Г. Д. Неуважаев, В. С. Свительман // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2020. — № 1. — С. 128–137. — DOI: 10.31857/S0002331019050170
42. Неуважаев Г. Д. Разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (участок «Енисейский»): дис. ... канд. техн. наук / Г. Д. Неуважаев. — М.: ИБРАЭ РАН, 2022.
43. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения радиоактивных отходов / И. В. Капырин, В. А. Иванов, Г. В. Копытов, С. С. Уткин // Горный журнал. — 2015. — № 10. — С. 44–50. — DOI: 10.17580/gzh.2015.10.08
44. Hybrid cuckoo search and harmony search algorithm and its modifications for the calibration of groundwater flow models / D. K. Valetov, G. D. Neuvazhaev, V. S. Svitelman, E. A. Saveleva // IJCCI 2019: Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence (Vienna, 17–19.09.2019). — Vienna, Austria: SCITEPRESS, 2019. — P. 221–228. — DOI: 10.5220/0008345502210228
45. Расчетный комплекс для учета неопределенностей численного моделирования в задачах обоснования безопасности MOUSE. Версия 1.0: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667451 / А. С. Нужный, Е. А. Савельева-Трофимова, В. С. Свительман и др. — заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», 2022.
46. Fetter C. W. Contaminant hydrogeology / C. W. Fetter, T. Boving, D. Kreamer. — 3rd edition. — Long Grove, Illinois, USA: Waveland Press Inc., 2017. — 647 p.

47. Шестаков В. М. Гидрогеодинамика: учебник для вузов по направлению «Геология», специальность «Гидрогеология и инженерная геология» / В. М. Шестаков. — 3-е издание, переработанное и дополненное. — М.: Издательство МГУ, 1995. — 368 с.
48. Hvorslev M. J. Time lag and soil permeability in ground-water observations: Bulletin No. 36 / M. J. Hvorslev. — Vicksburg, Mississippi: Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, U.S. Army, 1951. — 60 p.
49. Cooper H. H. Jr. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water / H. H. Cooper Jr., J. D. Bredehoeft, I. S. Papadopoulos // Water Resources Research. — 1967. — Vol. 3. — № 1. — P. 263–269. — DOI: 10.1029/WR003i001p00263
50. Picking L. W. Analyzing the recovery of a finite-diameter well after purging at an unknown rate — A substitute for slug-testing / L. W. Picking // Groundwater. — 1994. — Vol. 32. — № 1. — P. 91–95. — DOI: 10.1111/j.1745-6584.1994.tb00615.x
51. Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2: SKB Report R-07-48 / S. Follin, J. Levén, L. Hartley et al. — Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2007.
52. Layout determining features, their influence zones and respect distances at the Olkiluoto site: POSIVA 2012-21 / T. Pere, S. Aro, J. Mattila et al. — Eurajoki, Finland: Posiva Oy, 2012. — 128 p.
53. Luthi S. M. Fracture apertures from electrical borehole scans / S. M. Luthi, P. Souhaite // Geophysics. — 1990. — Vol. 55. — № 7. — P. 821–833.
54. Site descriptive modelling Forsmark, stage 2.2. A fracture domain concept as a basis for the statistical modelling of fractures and minor deformation zones, and interdisciplinary coordination: SKB Report R-07-15 / I. Olofsson, A. Simeonov, M. Stephens et al. — Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2007.
55. Neuman S. P. Stochastic continuum representation of fractured rock permeability as an alternative to the REV and fracture network concepts / S. P. Neuman // Groundwater Flow and Quality Modelling: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Advances in Analytical and Numerical Groundwater Flow and Quality Modelling (Lisbon, Portugal, June 2–6, 1987). — Dordrecht, Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1988. — P. 331–362. — DOI: 10.1007/978-94-009-2889-3_19
56. Clark I. Practical geostatistics / I. Clark. — L., United Kingdom: Elsevier Applied Science, 1987. — 129 p.
57. Deutsch C. V. GSLIB: Geostatistical software library and user's guide / C. V. Deutsch, A. G. Journel — 2nd edition. — New York, USA: Oxford University Press, 1992. — 339 p.
58. Rubin Y. Flow and transport in bimodal heterogeneous formations / Y. Rubin // Water resources research. — 1995. — Vol. 31. — № 10. — P. 2461–2468. — DOI: 10.1029/95WR01953
59. Western A. W. How well do indicator variograms capture the spatial connectivity of soil moisture? / A. W. Western, G. Blöschl, R. B. Grayson // Hydrological processes. — 1998. — Vol. 12. — № 12. — P. 1851–1868. — DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19981015)12:12<1851::AID-HYP670>3.0.CO;2-P
60. Remy N. Applied geostatistics with SGeMS: a user's guide / N. Remy, A. Boucher, J. Wu. — Cambridge University Press, 2009. — 285 p.
61. Tracer transport in a stochastic continuum model of fractured media / Y. W. Tsang, C. F. Tsang, F. V. Hale, B. Dverstorp // Water resources research. — 1996. — Vol. 32. — № 10. — P. 3077–3092. — DOI: 10.1029/96WR01397
62. Neuman S. P. Stochastic approach to subsurface flow and transport: a view to the future / S. P. Neuman // Subsurface flow and transport: a stochastic approach: International hydrology series / eds. G. Dagan, S. P. Neuman. — N. Y., USA: Cambridge University Press, 2005. — P. 231–241.
63. Calibration of 3-D transient groundwater flow / J. J. Gómez-Hernández, H. J. W. M. Hendricks Franssen, A. Shaquillo, J. E. Capilla // Calibration and reliability in groundwater modelling: coping with uncertainty: Proceedings of the Modelcare'99 conference: IAHS Publication no. 265. — Zurich, Switzerland, 1999. — P. 185–194.
64. Lu Z. On stochastic modeling of flow in multimodal heterogeneous formations: flow in multimodal heterogeneous formations / Z. Lu, D. Zhang // Water resources research. — 2002. — Vol. 38. — № 10. — P. 8-1-8-15. — DOI: 10.1029/2001WR001026
65. Wu J. A numerical method of moments for solute transport in a porous medium with multiscale physical and chemical heterogeneity: stochastic analysis of nonstationary, reactive transport / J. Wu, B. X. Hu, C. He // Water resources research. — 2004. — Vol. 40. — № 1. — DOI: 10.1029/2002WR001473

66. Gómez-J. J. Hernández ISIM3D: An ANSI-C three-dimensional multiple indicator conditional simulation program / J. J. Gómez-Hernández, R. M. Srivastava // Computers & geosciences. — 1990. — Vol. 16. — № 4. — P. 395–440. — DOI: 10.1016/0098-3004(90)90010-Q
67. McDonald M. G. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations. USGS Numbered Series: 06-A1 / M. G. McDonald, A. W. Harbaugh. — Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey, 1988. — 586 p. — DOI: 10.3133/twri06A1
68. Pollock D. W. User guide for MODPATH Version 7 — A particle-tracking model for MODFLOW: USGS Numbered Series. Open-File Report: 2016–1086 / D. W. Pollock. — Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey, 2016. — 41 p. — DOI: 10.3133/ofr20161086
69. Pozdniakov S. A self-consistent approach for calculating the effective hydraulic conductivity of a binary, heterogeneous medium / S. Pozdniakov, C.-F. Tsang // Water Resources Research. — 2004. — Vol. 40. — № 5. — P. W05105. — DOI: 10.1029/2003WR002617
70. Chiang W.-H. 3D-groundwater modeling with PMWIN: a simulation system for modeling groundwater flow and transport processes / W.-H. Chiang. — 2nd edition. — Heidelberg, Germany: Springer Berlin, 2005. — DOI: 10.1007/3-540-27592-4
71. Harbaugh A. W. MODFLOW-2005: the U.S. Geological Survey modular ground-water model — the ground-water flow process: USGS Numbered Series. Techniques and Methods: 6-A16 / A. W. Harbaugh. — Reston, Virginia, USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 2005. — DOI: 10.3133/tm6A16
72. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности / В. Н. Морозов, В. Н. Татаринев, В. И. Кафтан, А. Маневич // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3(4). — С. 16–29.
73. Татаринев В. Н. Изучение современной геодинамики Нижне-Канского массива для безопасного захоронения радиоактивных отходов / В. Н. Татаринев, В. И. Кафтан, И. Н. Сеелев // Атомная энергия. — 2016. — Т. 121. — № 3. — С. 157–160.
74. Современная геодинамика южной части Енисейского кряжа по результатам спутниковых наблюдений / В. Н. Татаринев, В. Н. Морозов, В. И. Кафтан, А. И. Маневич // Геофизические исследования. — 2018. — Т. 19. — № 4. — С. 64–79. — DOI: 10.21455/gr2018.4-5
75. Modern geodynamics of South Yenisei ridge to result of the GPS/GLONASS observations / V. Tatarinov, V. Kaftan, T. Tatarinova, A. Manevich // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2017. — Vol. 95. — P. 032024. — DOI: 10.1088/1755-1315/95/3/032024
76. Прогнозирование напряженно-деформированного состояния нижнеканского массива как возможного места подземной изоляции радиоактивных отходов / В. Н. Морозов, И. Ю. Колесников, В. Н. Татаринев, Т. А. Татаринова // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. — 2009. — № 2 (14). — С. 58–67.
77. Методика и результаты определения движений и деформаций земной коры по данным ГНСС на Нижне-Канском геодинамическом полигоне в районе захоронения радиоактивных отходов / В. И. Кафтан, А. Д. Гвишиани, В. Н. Морозов, В. Н. Татаринев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2019. — Т. 16. — № 1. — С. 3–94. — DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-83-94
78. Кафтан В. И. Анализ устойчивости геодезических пунктов и определение векторов смещений земной коры / В. И. Кафтан // Геодезия и картография. — 1986. — № 5. — С. 9–13.

Архивные документы и материалы

- a. Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив): Проектная документация: Состав проектной документации: 110-1421-СП: Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А451-13. — ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014.
- b. Соломеин М. И. Сейсмические исследования массива пород участка Енисейского: Технический архив Геоэкологической партии ОАО «Красноярскгеология»: инв. № 236: Отчет: договор № 6-П-2010 от 26.07.2010 / М. И. Соломеин, А. В. Струнов. — Красноярск: ОАО «Енисейгеофизика», 2010.

- c. Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам: Раздел 3. Часть 1. Книга 1 / С. И. Емцов, В. Н. Айкашев, А. Н. Коваленко и др. // Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край. Нижне-Канский массив). — Железногорск; М.: КФ ОАО «ГСПИ КПИИ ВНИПИЭТ»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2013. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-14075ДСП.
- d. Дополнительные инженерно-геологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам. Площадка вспомогательного ствола и очистных сооружений: Раздел 3. Часть 1. Книга 6 / С. И. Емцов, М. С. Анциферов, Л. А. Мельников и др. // Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край. Нижне-Канский массив): Технический отчет: 110-1421-ИЗ.1.6. — Железногорск; М.: КФ ОАО «ГСПИ КПИИ ВНИПИЭТ»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-2276ДСП.
- e. Дополнительные инженерно-геологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам. Площадка технологического ствола: Раздел 3. Часть 1. Книга 7 / С. И. Емцов, М. С. Анциферов, В. Н. Айкашев и др. // Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край. Нижне-Канский массив): Технический отчет: 110-1421-ИЗ.1.7. — Железногорск; М.: КФ ОАО «ГСПИ КПИИ ВНИПИЭТ»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-15088ДСП.
- f. Дополнительные инженерно-геологические изыскания по площадкам наземных сооружений и автодорогам. Площадка вентиляционного ствола: Раздел 3. Часть 1. Книга 8 / С. И. Емцов, М. С. Анциферов, В. Н. Айкашев и др. // Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край. Нижне-Канский массив): Технический отчет: 110-1421-ИЗ.1.8. — Железногорск; М.: КФ ОАО «ГСПИ КПИИ ВНИПИЭТ»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-2274ДСП.
- g. Разработка структурной модели трещиноватого пространства Нижнеканского геологического массива (участок Енисейский): Отчет: Договор № 319/1074-Д от 09.08.2016 / В. Г. Румынин, А. М. Никуленков, А. Г. Оловянный и др. — СПб.: СПбО ИГЭ РАН, 2016.
- h. Специализированные геолого-геофизические исследования на участке Енисейский Нижнеканского гранитоидного массива: Отчет о НИР: арх. № А-372-04/1 / Э. Н. Линд, А. С. Беспрозванных, И. П. Бархатов и др. — Красноярск: КНИГиМС, 2004.
- i. Ощепков М. Д. Площадная магнитная съемка для уточнения геолого-структурных особенностей участка и инженерно-геофизические изыскания: Раздел 7. Книга 3. / М. Д. Ощепков, А. В. Петров // Технический отчет: 110-1421-И7.3. — Железногорск; М.: ОАО «ГСПИ» — КПИИ «КНИПИЭТ»; ОАО «Красноярскгеология»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2013. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-14076ДСП.
- j. Оптимизация исследований и разработка системы принятия решений по реализации стратегического мастер-плана по оценке и обоснованию долговременной безопасности ПГЗРО для захоронения РАО 1 и 2 класса в Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»): Этап 5: Отчет о НИР: госконтракт № Н.4д.241.20.17.1044: Архив ИБРАЭ: инв. № 0125-ДСП / И. И. Линге, С. С. Уткин, Е. А. Савельева-Трофимова и др. — М.: ИБРАЭ РАН, 2019.
- k. Караулов В. А. Инженерно-геологические и гидрогеологические изыскания под технологический и вспомогательный шахтные стволы: Раздел 4. Книга 1 / В. А. Караулов, А. Ю. Озерский // Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив): Технический отчет: 110-1421-И4.1. — Красноярск; М.: ОАО «ГСПИ» — КПИИ «КНИПИЭТ»; ОАО «Красноярскгеология»; ОАО «ВНИПИпромтехнологии», 2014. — Архив ОАО «ВНИПИпромтехнологии»: арх. № А-14088ДСП.
- l. Караулов В. А. Окончание годового цикла режимных наблюдений за поверхностными водами. Построение водного баланса территории возможного размещения ПГЗРО. Разработка базы данных режимных воднобалансовых наблюдений: Этап 2: Технический отчет: контракт № 0573100027017000022-301743 / В. А. Караулов, А. Ю. Озерский и др. — Красноярск: ОАО «Красноярскгеология», 2018.

- m. Оценка результатов гидрометеорологических и гидрологических (водобалансных) наблюдений за 2019 г.: Отчет: договор № 32009093953: Этап 2 (задача 2) / В. Г. Румынин, А. М. Никуленков, А. А. Шварц и др. — СПб.: СПбО ИГЭ РАН, 2020.
- n. Натурные наблюдения геодезическими методами за движениями земной поверхности в зонах тектонических разломов и деформациями сооружения 803 в целях экологической стабильности: Отчет о НИР (промежуточный): Архив ГХК. — Алма-Ата: Алма-Атинский архитектурно-строительный институт, 1991.
- o. Изучение современных движений земной поверхности и натурные наблюдения за деформациями сооружений геодезическими методами в целях контроля надежности транспортировки и захоронения жидких промстоков на площадке 27: Отчет о НИР (заключительный): Архив ГХК: арх. № 2800/дсп. — Алма-Ата: Алма-Атинский автомобильно-дорожный институт, 1990.
- p. Технический отчет по результатам наблюдений за деформациями объекта 803: инв. № 238-97/ДСП. — Железногорск: ЗАО «Гея», 1997.
- q. Геодезические наблюдения за СВДЗК и СГДЗК в районе размещения объектов цеха №1 ФГУП ГХК. Нивелирование II класса и спутниковые измерения по профилям, пересекающим Правобережный, Атамановский, Муратовский и Первый Красноярский тектонические разломы: Технический отчет: Архив ЗАО «Гея»: инв. № 1711-11/дсп. — Железногорск: ЗАО «Гея», 2011.
- r. Геодезические наблюдения за современными вертикальными движениями земной коры в районе размещения сухого хранилища ОЯТ: Технический отчет: Архив ОАО «ВНИПИЭТ»: инв. № 102-6242/ДСП. — Железногорск: ФГУП «КГПИИ «ВНИПИЭТ», 2002.
- s. Технический отчет по геодезическим наблюдениям за деформациями горного массива в районе подземных сооружений (цикл № 1): инв. № 1024-03/ДСП. — Железногорск: ЗАО «Гея», 2003.
- t. Разработка и обоснование геодинамической сети режимных наблюдений за современными движениями земной коры в районе возможного размещения ПГЗРО (Красноярский край, Нижне-Канский массив): Технический отчет. — Железногорск: ГСПИ, 2017. — 78 с.
- u. Геодезические наблюдения за деформациями объекта «Полка»: Технический отчет: Архив ОАО «ВНИПИЭТ»: инв. № 103-6492/ДСП. — Железногорск: ФГУП «КГПИИ «ВНИПИЭТ», 2003.
- v. Разработка и обоснование геодинамической сети режимных наблюдений за современными движениями земной коры в районе возможного размещения ПГЗРО (Красноярский край, Нижне-Канский массив): Технический отчет: инв. № 117-8790/дсп. — Железногорск: ГСПИ, 2017. — 78 с.
- w. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за второе полугодие 2013 года. Этап 1, в 3-х книгах: инв. № 085-13/дсп. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2013. — 260 с.
- x. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за первое полугодие 2014 года. Этап 2, в 2-х книгах: инв. № 089-14/дсп. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2014. — 285 с.
- y. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за первое полугодие 2015 года. Этап 4, в 2-х книгах: инв. № 099-15/дсп. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2015. — 317 с.
- z. Технический отчет по результатам геодинамического и сейсмического мониторинга в пределах ОИАЭ за второе полугодие 2015 года. Этап 5, в 3-х книгах: инв. № 105-15/дсп. — Железногорск: ООО «ГЕОЛКОМ», 2015. — 426 с.

Глава 6

Основные аспекты оценки безопасности

В предыдущих разделах были представлены основные результаты, полученные при проведении геологических и гидрогеологических исследований, а также расчетного моделирования, обеспечивающие информацию для обоснования выбора участка для ПГЗРО. В этом разделе приведены основы систематизации информации, опирающиеся на анализ геологических особенностей, событий и процессов (ОСП) с акцентом на формирование аргументов для оценки безопасности.

6.1. Геологические особенности, события и процессы, важные для обеспечения безопасного размещения ПГЗРО на участке Енисейский

Систематическое рассмотрение особенностей, событий и процессов (ОСП) позволяет не только не упустить из вида важные для изучения факторы [1], но и обосновать полноту учета их влияния. Ниже рассмотрены основные геологические ОСП, которые можно разделить на две группы: внешние воздействия и факторы, связанные с вмещающей средой (группа факторов «геосфера»), а также отмечены их потенциальная значимость для безопасности ПГЗРО и текущее состояние изученности в масштабах района и участка Енисейский [2].

6.1.1. Внешние геологические факторы

Внешние геологические факторы связаны с процессами на больших временных масштабах и событиями, вытекающими из общей геологической обстановки, и их влиянием на безопасность системы захоронения. Их изучение — основа для обоснования эволюции участка размещения и доказательства долговременной безопасности ПГЗРО.

Тектонические движения

Современные движения земной коры – постоянно действующий фактор (подраздел 3.4.2). Крупномасштабные геологические движения могут оказать влияние на региональный поток подземных вод, в том числе через перераспределение напоров. Влияние процесса вертикальной дифференциации геологических блоков на параметры миграции радионуклидов с подземными водами зависит от реальной скорости и направления тектонических движений. Увеличение разницы уровней подземных вод между областями питания и разгрузки приведет к ускорению водообмена (гидрологическим и гидрогеологическим последствиям геологических изменений), что даст пессимистический эффект в оценке безопасности [3]. За изменениями гидрогеологических условий, вызванных тектоническими движениями, обычно следует процесс изменений в системе порода–вода. Поэтому значимость процесса вертикальной дифференциации блоков можно оценить как среднюю, и требуются специальные исследования для обоснованного моделирования последствий этого процесса.

Новейшая и современная тектоническая активность региона и района достаточно хорошо изучена. Многочисленные геологические данные, характеризующие неоген-четвертичное время, показывают устойчивое воздымание территории, на которой расположен район участка Енисейский, со скоростями, характерными для платформ (0,055–1 мм/год). Методы дешифрирования дистанционных фотоснимков и анализы топоосновы позволяют выделять линеаменты, которые интерпретируются как новейшие или активизированные тектонические нарушения. За промежуток инструментальных измерений, выполнявшихся в районе ПГЗРО, установлены циклические смещения пунктов наблюдений по обе стороны р. Енисей. Рассчитанные скорости относительных перемещений блоков, разделенных такими линеаментами, не превышают сотых долей мм/год. Данные геодезических наблюдений показывают, что на современном этапе тектонического развития эта тенденция сохраняется (см. подраздел 3.4.2). Однако для уточнения амплитуд современных движений земной коры и определения их реальной значимости для безопасности ПГЗРО требуются дополнительные исследования [4, 5].

Непосредственно на участке Енисейский специальных исследований современных движений земной коры не проводилось. Однако данные газовых съёмок и гидрогеохимического опробования поверхностных вод свидетельствовали об отсутствии на участке активных разрывных нарушений локального масштаба.

Деформация пород (упругая, пластичная или хрупкая)

Деформация пород в большинстве случаев связана с активными разломами, где за счет крипа в породах медленно накапливаются механические деформации, которые в перспективе могут привести к разрушению инженерных барьеров безопасности (ИББ). Также активные разломы являются ослабленными зонами в земной коре и обладают повышенной гидравлической проницаемостью в сравнении с вмещающими их монолитными породами или залеченными древними разломами, что может в долгосрочной перспективе существенно повлиять на процессы миграции загрязнений.

Значимость фактора для пункта захоронения можно оценить как высокую, влияние на ИББ может быть снижено при размещении упаковок РАО вне зон потенциальных тектонических смещений.

На возможное присутствие активных разломов указывает присутствие в керне открытых трещин, которые не залечены жильными минералами, возможно, по причине своей молодости. Для обоснования безопасности требуется определять точное положение и активность локальных разрывных нарушений.

Сейсмическая активность

Участок Енисейский расположен на периферии Южно-Енисейского кряжа, принадлежащего к активному в сейсмическом отношении внутриконтинентальному Алтай-Саян-Байкальскому поясу Северной Евразии. Сейсмическая опасность в районе участка Енисейский измеряется величиной 7–8 баллов (карта ОСР-97-D [6]), что не превышает допустимых значений (НП-055-14) [7]. Сейсмичность региона оценивалась вплоть до масштабов отдельных линеаментов. Исследования, имеющиеся для региона, оставляют ряд неопределенностей в области оценки и долгосрочного прогноза (на периоды более 10 тыс. лет) сейсмической опасности непосредственно на участке сооружения ПГЗРО (см. подраздел 3.4.3). Полностью исключать вероятность сильных землетрясений нельзя, поэтому требуется провести стендовые испытания и модельные расчеты прочности защитных конструкций.

По совокупности имеющейся информации значимость этого фактора может быть отнесена к средним.

Региональная эрозия (денудация) и осадконакопление (седиментация)

По имеющимся данным о скоростях подъема территории (подраздел 3.4.2), перспектива значительного размыва перекрывающей толщи для участка Енисейский, который расположен на водораздельном пространстве, практически исключена. Соответственно, существенного накопления осадков (седиментация) в сопряженных впадинах также не ожидается. Денудация поверхности в результате продвижения ледника также маловероятна [8].

Климатические последствия геологических изменений

Существенных горообразовательных процессов не ожидается, и как следствие, не ожидается вызванных ими климатических изменений.

В связи с вышеизложенным в перечень важнейших направлений исследований, связанных с геологическими процессами, включены:

- изучение тектонических движений, особенно горизонтальных смещений по разломам района;
- изучение параметров деформации пород, особенно вдоль трещинных зон в блоке размещения;
- сейсмический мониторинг в районе.

Геотермические условия в регионе характеризуются средними значениями теплового потока с уровнем поля 40–60 мВт/м².

Направление действия главных напряжений в районе ориентировано в интервале азимутов от 0 до 35 градусов. Это в принципе согласуется с простиранием основных тектонических структур региона.

6.1.2. Факторы из группы «Геосфера»

Факторы из группы «Геосфера» делятся на три подгруппы (рис. 6.1): геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические особенности вмещающей породы (п. 4.1. Характеристики); процессы, вызванные сооружением подземного объекта, которые могут повлиять на его безопасность (п. 4.2. Процессы эволюции); процессы, сопровождающие миграцию радионуклидов, которые важны с точки зрения обоснования долговременной безопасности (п. 4.3. Процессы миграции).

Факторы из подгруппы «Геосфера. Характеристики и свойства»

Структура

Распределение типов пород определяет гетерогенность насыщенного потока подземных вод в кристаллических слабопроницаемых породах, формирование теплового поля и поля напряжений вокруг выработок размещения РАО и устойчивость сооружения.

При выборе места на региональном уровне приоритет был отдан геологическим формациям *Южно-Енисейского кряжа*, среди которых эксперты указали на *магматические* и *метаморфические породы*. Они во всем мире относятся к тем типам пород, которые по своим свойствам рассматриваются как *потенциально перспективные* для захоронения высокоактивных радиоактивных отходов [9].

Состав пород в центральной части участка позднее был изучен бурением. Гнейсы формируют основной массив, который секут дайки метадолеритов. Изученность участка в отношении распределения пород удовлетворительная, но уточнение распределения пород непосредственно для блока размещения захоронения РАО должна быть продолжена при сооружении и проведении исследований в ПИЛ. Это позволит уменьшить уровень неопределенности результатов моделирования миграции радионуклидов.

Строение трещинной сети — особенность породной среды, которая имеет высокую значимость, так как определяет реальную гидравлическую проводимость массива горных пород. Эта особенность вносит обширные неопределенности в моделирование гетерогенного потока подземных вод в конкретном геологическом блоке. Кроме того, с этой особенностью связаны деформации породы из-за тектонических подвижек, которые вероятно будут ориентированы по существующим системам трещин.

Исследованиями пород при бурении скважин установлено, что внутри блока размещения развиты тектонические нарушения только высоких порядков, т. е. относительно мелкие по своему масштабу. Они имеют разную природу, минеральное заполнение, проницаемость. Древние тектонические деформации, нередко сопровождавшиеся внедрением даек, залечены процессами с ультраметаморфизмом и гранитизацией.

Данных бурения на площадке для построения достоверной модели трещинной сети внутри предполагаемого блока размещения захоронения на сегодня недостаточно, но их количество будет расти в период проведения горнопроходческих работ по сооружению ПИЛ.

Гидравлическая связность систем трещин: по имеющимся данным [10] можно предполагать, что в пределах площадки гидравлическая связность трещинных систем в породах между разными уровнями и по латерали, и по вертикали имеет прерывистый характер.



Рис. 6.1. Иерархическая структура для группы «Геосфера» (приводится по [1])

Разнообразие типов и обилие нарушений разных порядков предопределяет сложность фильтрационной среды подземных вод. Вмещающий блок пород не может рассматриваться как гидрогеологический массив, имеющий единую в гидравлическом отношении систему трещиноватости. В целом результаты гидрогеологических исследований говорят об отсутствии прямой гидравлической связи предполагаемого уровня размещения ПГЗРО с дневной поверхностью. Об инфильтрационном питании подземных вод свидетельствует обнаружение гидроксидов железа в некоторых трещинах на значительных глубинах. Распределение фильтрующих трещин во вмещающем блоке остается невыясненным.

Неопределенности в отношении связности трещинной сети блока размещения (ближнее поле) и области миграции (дальнее поле) будут уменьшены проведением исследований при горнопроходческих работах, путем экспериментальных работ в глубоких скважинах дальнего поля и в подземных выработках ПИЛ.

Ориентировка трещинных систем в тектоническом поле напряжений определяет открытость и закрытость разных систем трещин и оказывает влияние на их фильтрационные характеристики. Значимость этой особенности обычно оценивается как средняя.

Разрывные нарушения: разломы и трещинные системы

Изученность разрывных нарушений в региональном масштабе на сегодняшний день обеспечена Государственными геологическими картами масштаба 1:1 000 000 [11] и 1:200 000 [12]. Эти карты показывают позицию участка Енисейский между глубинными (Приенисейский и Предивинский) и региональными (Нижеангарский и Курышский) разломами, а также среди разрывных структур более высоких порядков (Муратовский, Атамановский, Правобережный, Итатский, Канско-Енисейский и др.). Отмечается, что за исключением крупнейших глубинных и региональных разломов, обширная сеть прочих разрывных нарушений характеризуется невысокой достоверностью (см. подраздел 3.4.1).

На материалах этих же карт базируется схема тектонического районирования, согласно которой Енисейский кряж относится к древнему Сибирскому кратону, окончательно сформировавшемуся в позднерифейское время около миллиарда лет назад, после чего он находился преимущественно в тектонически стабильном состоянии. Отмечаются некоторые различия в определении возраста стабилизации и неопределенности в вопросе существования более поздних этапов тектонической активизации (см. подраздел 3.4.1).

В соответствии с современной интерпретацией результатов морфоструктурного анализа поверхности и геофизических полей площадка будущего захоронения приурочена к блоку пород, не затронутому наиболее крупными разрывными нарушениями, известными в районе (подразделы 3.4.2 — 3.4.3).

Мелкомасштабная геологическая изученность участка [11, 12] на сегодняшний день дополнена среднемасштабными (1:50 000 — 1:25 000) специализированными геолого-геофизическими работами, выполненными в 2002—2005 гг. в процессе выявления в его пределах блока монолитных пород для размещения ПГЗРО [a, b]. Участок расположен на территории, удаленной от главных глубинных, региональных и районных разломов, но пересечен структурами более высоких порядков. Геологическая съемка среднего масштаба с составлением кондиционных карт не проводилась. Карты, составленные на основе комплексного анализа дистанционных снимков, гравитационного и магнитного полей, а также интерпретации данных электроразведочных и сейсмических исследований, позволили несколько детализировать распределение разных типов горных пород под рыхлыми отложениями и на глубине. Теми же методами были выявлены линеаменты, которые стали рассматривать как главные и второстепенные разрывные нарушения (Шумихинский, Тельский, Меридиональный, Байкальский, Безымянный и др.) без подтверждения их бурением. В блоке, ограниченном главными разломами, была выделена площадка, перспективная для строительства ПГЗРО (см. раздел 4.3). На выделенной площадке не исключено наличие разрывов самого высокого порядка и зон трещиноватости.

Структурные неопределенности в отношении участка Енисейский, оставшиеся на сегодняшний день, связаны с тем, что ни одно из выявленных в пределах исходной площади (70 км²) разрывных нарушений не было заверено бурением, в силу чего реальный масштаб, достоверность присутствия, возраст заложения и новейшая активность, а также внутреннее строение, минеральное выполнение и фильтрационные свойства этих структур вне разбуренной позднее части участка площадью 1,7 км² остались невыясненными.

Гидравлические свойства

Давление подземных вод и неоднородность гидродинамического давления имеют высокую значимость, поскольку они определяют процесс вынужденной конвекции и поток подземных вод в региональном и в локальном масштабах. Неверное определение направления потока может привести к ошибкам при моделировании миграции радионуклидов, поэтому предполагается проведение дополнительных исследований.

Изученность гидрогеологических условий в региональном масштабе следует признать неудовлетворительной, что объясняется крайне низкой водоносностью пород, слабой населенностью этой территории и отсутствием необходимости в организации водоснабжения населения и промышленных объектов [13]. В целом для Ангаро-Канского гидрогеологического массива региональной областью разгрузки является р. Енисей. При этом каждый разобщенный бассейн стока имеет собственную долину, куда разгружаются его воды (см. подраздел 3.4.1). Это относится и к участку Енисейский, приуроченному к местному водоразделу.

Гидрогеологические исследования, выполненные в пределах участка Енисейский, показали, что там доминирует инфильтрационный тип водообмена. Опытно-фильтрационные работы, выполненные в скважинах участка Енисейский, показали, что породы на потенциальной глубине размещения ПГЗРО (400–600 м) отличаются крайне низкой проницаемостью ($K_{\text{ф.р.}} = 10^{-5}$ м/сут). Недостаточный уровень надежности полученных результатов объясняется незначительным объемом исследований как по подземным водам в скважинах, так и по поверхностным водам, в том числе по водобалансовым измерениям. Имеющаяся информация о распределении напоров по вертикали также дает основу для различных интерпретаций, в частности в альтернативных вариантах интерпретации потока подземных вод (подразделы 5.3.1. и 5.3.2). По одной гипотезе региональное движение подземных вод имеет преимущественно северо-восточное направление в сторону р. Шумихи, по другой — преимущественно западное в сторону р. Енисей.

Повышение уровня надежности гидрогеологических моделей дальней зоны можно ожидать после выполнения соответствующих исследований в глубоких скважинах, закрывающих площадь потенциального распространения потока от ПГЗРО.

Обводненность или водонасыщенность среды является особенностью высокой значимости, так как определяет вариант модели массопереноса. На участке Енисейский геометрия границы водонасыщения и зоны аэрации, характеризующейся локальной обводненностью, достаточно хорошо известна.

Механические свойства

Физико-механические и тепловые свойства имеют высокую значимость. Значения теплопроводности пород, полученные в разные годы, существенно различаются, а следовательно, применение таких данных вносит высокую неопределенность в результаты расчетно-прогностического моделирования.

Уточнение физико-механических и тепловых свойств будет проводиться при проведении горнопроходческих работ при сооружении ПИЛ и в процессе запланированных экспериментальных исследований в ПИЛ.

Геохимические свойства

Распределение минерального заполнения трещин, соотношение пустот и заполнения в трещинах имеет высокую значимость, так как влияет на процессы взаимодействия в системе «радионуклиды»—«подземные воды»—«горные породы», и, как следствие, скорость и закономерности миграции радионуклидов. Известно, что на участке Енисейский в трещинных зонах развиты новообразования разного времени, генезиса и минерального состава, но более точные результаты в достаточном количестве будут получены после проходки выработок ПИЛ на горизонте захоронения РАО.

Состав и минерализация подземных вод имеют высокую значимость, поскольку влияют на формы нахождения радионуклидов в водах, образование комплексных соединений и коллоидов и в итоге на скорость переноса радионуклидов. Состав подземных вод и их минерализация на участке Енисейский мало меняются с глубиной, воды имеют низкую минерализацию и гидрокарбонатно-кальциевый состав (раздел 5.2). Влияние элементов системы захоронения на геохимические характеристики подземных вод изучается в лабораторных условиях и будет уточняться на экспериментальных установках в ПИЛ.

Неоднородность окислительно-восстановительных условий имеет высокую значимость, так как влияет на формы миграции. Отсутствие учета этого фактора при моделировании может привести к некорректной оценке безопасности. Имеющиеся данные по изменению E_h в разрезе для участка Енисейский демонстрируют обычное для кристаллических пород снижение E_h с глубиной (раздел 5.2).

Биологические свойства

Микробиологические популяции — обычный компонент геологической среды, влияющий на процессы химического взаимодействия в материалах инженерной системы захоронения и процессы миграции радионуклидов. Для уточнения данных о популяциях микроорганизмов в среде участка Енисейский запланированы специальные исследования как с поверхности, так и при проходке выработок ПИЛ.

Факторы из подгруппы «Геосфера. Процессы эволюции»

Тепловые процессы

Перенос тепла в геосфере под воздействием теплового режима подземных выработок и размещенных РАО оценивается как высокосignificant, поскольку влияет на характер теплового поля в окружающей геологической среде. Фактор прогрева среды вызовет образование конвективных потоков подземных вод вокруг выработок, дополнительные напряжения в целиках массива горных пород, что может инициировать аварийные сценарии, связанные с деформацией вмещающей среды. Моделирование процесса прогрева пород участка Енисейский находится в стадии разработки. Запланированы прямые эксперименты, в том числе в зоне техногенной трещиноватости ПИЛ.

Гидравлические процессы

Обводнение среды и восстановление природного равновесия после закрытия подземных выработок в кристаллических породах по имеющимся расчетам займет от десятков до сотен, а возможно, для некоторых частей системы ИББ и нескольких тысяч лет. На кинетику реакций, сопровождающих обводнение и восстановление природного режима подземных вод, окажет влияние тепловое воздействие. Значимость этих процессов для безопасности ПГЗРО оценивается как низкая.

Внедрение соленых (пресных) подземных вод может быть следствием климатических изменений в отдаленной перспективе и считается маловероятным для района Енисейского участка. При изменениях климата возможно более интенсивное питание и, как следствие, еще большее опреснение подземных вод, которое будет сопровождаться изменением химического состава подземных вод. С учетом современного состава, значимость последствий в любом случае будет низкой.

Механические процессы

Формирование трещиноватой зоны нарушенных пород. Исследования, выполненные в подземных выработках ГХК, показали, что мощность зон техногенной нарушенности в гнейсах, аналогичных породам Енисейского участка, составляет 0,6–1,5 м, в редких случаях до 2,5 м от контура выработок (раздел 4.4). Значимость этих нарушений определяется их связью с системой связанных трещин массива, что полностью неизвестно на настоящий момент и требует дополнительных исследований после создания выработок ПИЛ.

Перераспределение напряжений вокруг выработок произойдет в ближайшем поле в течение нескольких десятилетий после проходки и продолжится в процессе вторичного обводнения выработок после их закрытия, включая пик предельного теплового воздействия РАО на массив горных пород. В результате возможно изменение проницаемости трещинного пространства на пути миграции радионуклидов. В настоящее время значимость процесса для миграции радионуклидов в долгосрочной перспективе оценивается как низкая.

Химические процессы

Процессы взаимодействия в системе порода–вода контролируют химические характеристики подземных вод и, как следствие, процессы растворения и задержки радионуклидов, влияющие на скорость и масштабы их поступления в биосферу. В естественных условиях при инфильтрации атмосферных осадков в массив происходит выщелачивание элементов из алюмосиликатных пород и формирование равновесного химического состава подземных вод [14, 15]. Продуктами этих реакций являются новообразованные глинистые минералы и карбонаты. В условиях после закрытия ПГЗРО на процессы будет оказывать влияние присутствие материалов системы инженерных барьеров, нагрев и т. п. Влияние присутствия материалов ИББ на состав грунтовых вод и характер взаимодействия с породами проводится в лабораторных условиях и планируется к исследованию в условиях ПИЛ.

Факторы из подгруппы «Геосфера. Процессы миграции»

Миграция с водой. Адвекция

Скорость, направление потока и режим подземных вод имеют высокую значимость, так как это приоритетный процесс, ответственный за потенциальное поступление радионуклидов в окружающую среду. В кристаллических породах, каковые слагают среду на участке Енисейский, течение подземных вод приурочено преимущественно к трещинной сети. Данные об особенностях зон повышенной проницаемости в пределах ближнего поля участка Енисейский частично изучены и будут уточняться в ходе сооружения выработок ПИЛ и проведения экспериментальных работ в ПИЛ. Данные, характеризующие гидродинамические характеристики крупных тектонических нарушений дальнего поля, будут уточняться в соответствие со специальной программой дополнительных исследований на территориях, прилегающих к участку.

Миграция с водой. Дисперсия

Коэффициент дисперсии всегда включается в уравнения конвекционно-дисперсионных моделей для расчета переноса радионуклидов. Имеются трудности с его измерением в натурных условиях. Для участка Енисейский такие измерения проводятся в лабораторных условиях.

Миграция с водой. Диффузия

Молекулярная диффузия — процесс, происходящий только под действием градиента концентраций. При прогнозных расчетах миграции в геосфере на фоне других процессов может не учитываться.

Миграция с водой. Матричная диффузия

Диффузии в матрицу придают среднюю значимость во всех сценариях из-за ее потенциала задержки даже для слабо сорбируемых радионуклидов за счет перемещения их из каналов с текущими водами в поровое пространство пород. Реальное влияние диффузии в матрицу на движение радионуклидов в геосфере контролируется объемом пород, доступным для этого процесса, и площадью контакта. Хотя теория процесса диффузии в матрицу хорошо разработана, существуют проблемы с определением надежного параметра, характеризующего этот процесс, который затем можно использовать в уравнениях переноса при оценке безопасности. Измерения коэффициента диффузии в матрицу для пород участка Енисейский проводятся в лабораторных условиях, а также будут уточнены при проведении исследований в ПИЛ.

Миграция с водой. Разложение, осаждение и кристаллизация

Процессы изменения химического состояния радионуклидов в процессе миграции в горной породе рассматриваются при моделировании как один из вариантов реализуемых физико-химических взаимодействий (обобщенно — химическая сорбция). Данные для моделирования непосредственно этих процессов в среде участка Енисейский уточняются в лабораторных экспериментах.

Миграция с водой. Видообразование и растворимость

Процесс образования растворенных водных соединений (частиц) радионуклидов, включая комплексы и коллоиды, обладает высокой значимостью, поскольку от него зависит интенсивность миграции радионуклидов, которые могут покинуть пределы ближней зоны. Необходимые данные по геохимическим особенностям подземных вод на сегодня ограничены определениями состава, общей минерализации, Eh и pH (241 проба) в скважинах на участке. Дополнительными факторами для изучения является изменение химического состава подземных вод в ходе взаимодействия с материалами ИББ и при их деградации (включая коррозию металлоконструкций).

Миграция с водой. Сорбция и десорбция

Процесс сорбции на поверхностях минералов имеет высокую значимость, так как может замедлять перенос долгоживущих сорбируемых радионуклидов, растворенных подземными водами. Конкретных данных о параметрах, позволяющих адекватно учитывать в моделях сорбцию всех радионуклидов в подземной среде участка Енисейский, на сегодня недостаточно. Есть данные о сорбции Pu, Am, U и Np на местных горных породах [16].

Миграция с водой. Коллоидный перенос

Процесс коллоидного переноса связан с выносом большого числа коллоидных частиц из буфера, что предполагает его разрушение. На настоящий момент начаты исследования по устойчивости коллоидов в подземных водах участка Енисейский [17], есть основания считать значимость этого процесса низкой.

Миграция с газами

Газообразование (образование H_2) в ПГЗРО ожидается вследствие коррозии металлоконструкций и микробной активности, а следовательно, процесс переноса радионуклидов с газами обладает достаточно высокой значимостью.

6.2. Разработка геологической модели площадки проектируемого ПГЗРО

Интерпретация геологической информации осуществляется в форме геологической модели. Кроме того, в процессе ее разработки выявляются неопределенности в геологическом строении.

Исходными данными для построения геологических моделей участка Енисейский послужила геологическая информация, представленная в отчетах «Красноярскгеологии» за 2010–2015 гг. На ее основе отстраивались разные варианты увязки точечных данных в виде карт и разрезов. С помощью программного комплекса Micromine выполнялась трехмерная визуализация 2D-карт и разрезов. Существующая сеть скважин слишком редка, чтобы был возможен процесс автоматического построения объемных геологических тел в среде этой программы.

При внесении в объемную модель разрезов и карт, составленных К. А. Заблочким («Красноярскгеология»), отмечается (см. подраздел 5.1.3) неоднозначность увязки даек второго этапа внедрения в силу их малой мощности и протяженности. Серия мощных секущих даек первого этапа внедрения (метадолериты), напротив, увязывается практически полностью. Искажение этих крупных тел наблюдалось ввиду наличия в исходных разрезах и картах некоторых неувязок, которые становятся заметны при создании трехмерной модели. Те же проблемы характерны для трехмерной визуализации разрывных нарушений. Там, где проследить по картам и разрезам разрывное нарушение оказалось невозможно, его падение отрисовывалось условно (вертикально). Особенно неоднозначным оказалось строение северной части разбуренной площадки. В южной части блока, вмещающем само сооружение, нестыковок не отмечено.

При объединении в объемную модель разрезов и карт, составленных О. А. Морозовым (ИБРАЭ РАН) (см. подраздел 5.1.3), путем переинтерпретации исходной информации из отчетов «Красноярскгеологии» выделены десятки дизъюнктивных нарушений разных порядков. Главные из них увязаны в три структуры, которые секут всю площадь блока в субмеридиональном направлении, что соответствует простиранию разрывов, выделенных в районном масштабе, и даже разломов регионального масштаба. Второстепенные разрывные нарушения выделены с меньшей достоверностью, чем главные. Они имеют северо-восточное, субмеридиональное и северо-западное простирания, незначительную протяженность и выполняют роль внутриблоковых структур. Они представлены теми же разновидностями нарушений пород, что и главные.

В обеих трехмерных моделях увязка даже главных разрывов заметно отличается (рис. 6.2). Достаточно сравнить между собой геологические карты (см. рис. 5.5 в подразделе 5.1.1 и рис. 5.19 в подразделе 5.1.3) и один и тот же субширотный разрез от скважины Р-12 к скважине Р-8 (см. рис. 5.7 и рис. 5.20), составленные разными авторами. Общим является только преобладание их субмеридионального простирания, характерного для района. Отличается также видение внутренней структуры разрывов. В представлениях К. А. Заблочкого главные разрывы — это зоны брекчирования, залеченные в процессах метаморфизма и гранитизации интрузивными дайковыми телами, метасоматитами и жильными минералами, мощностью

до десятков метров. Все остальные, прежде всего зоны открытой трещиноватости и зоны дробления, иногда с глинисто-дресвяным заполнением, мощностью 0,1–0,3 м, редко до 1,5 м, отнесены к «прочим разрывным нарушениям». В представлениях О. А. Морозова, наоборот, главные разрывы — это те самые несцементированные зоны дробления с преобладающей мощностью 0,1–0,7 м, сопровождаемые участками милонитизации, иногда — рассланцевания, переходящие в зону повышенной трещиноватости пород. Они увязаны в структуры, секущие участок насквозь. Древние дислокации, наследуемые дайковым комплексом и сопутствующими продуктами, в этой объемной геолого-структурной модели вообще не отражены. Отсюда разные представления о фильтрационных свойствах главных разрывных нарушений.

Кроме разрывных нарушений в керне скважин выявлены рассеянные трещины и зоны повышенной трещиноватости, которые теоретически связаны с разрывами разных порядков. В этом отношении интерес представляет оценка протяженности «монокристаллических» интервалов, содержащих только рассеянную трещиноватость. По данным О. А. Морозова более 60 % протяженности скважин имеют низкое значение модуля трещиноватости (количество трещин на 1 пог. м керна) — $M_{тр} < 10$ тр/пог. м со средним значением 6 тр/пог. м. Оставшиеся более 35 % протяженности скважин пересекают зоны повышенной трещиноватости и разрывы. Значительные объемы относительно монокристаллических горных пород размером 450 × 350 и 1000 × 350 м, согласно этой модели, выявлены на северо-востоке, центре и юго-западе изученного объема.

В. Г. Румынин с соавторами (СПбО ИГЭ РАН) (подраздел 5.3.2) приводят частотные диаграммы пространственного распределения трещиноватости вдоль скважин. Из них следует, что скважины пересекают наряду с зонами дробления и трещиноватости практически ненарушенные (относительно монокристаллические) интервалы протяженностью до нескольких десятков метров.

В целом, геолого-структурные неопределенности участка, как следует из анализа трехмерных моделей, остаются существенными. При этом достаточно уверенно установлено наличие блоков (интервалов) значительных размеров, в которых присутствует только рассеянная трещиноватость.

Ожидать существенного повышения обоснованности геолого-структурных выводов следует при выполнении соответствующих геологических исследований, которые будут сопровождать горнопроходческие работы при строительстве ПИЛ.

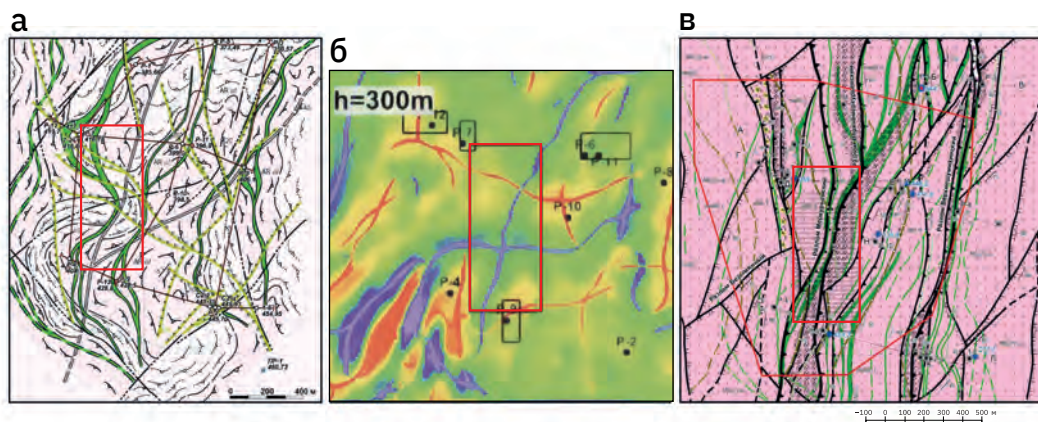


Рис. 6.2. Сопоставление геологических карт поверхности участка, составленных К. А. Заблочким (а) и О. А. Морозовым (в), с результатами (б) интерпретации площадной крупномасштабной магнитометрической съемки (среэ – 300 м)
Красный прямоугольник — контур блока размещения ПГЗРО

6.3. Разработка геофильтрационных и геомиграционных моделей

Математическое моделирование является основным инструментом получения долгосрочных прогнозов, необходимых для обоснования безопасности ПГЗРО. К текущему моменту разработаны несколько версий геофильтрационной модели участка Енисейский, некоторые из которых описаны в разделе 5.3.

В процессе разработки моделей можно выделить отдельные стадии, на рассмотрении которых и остановимся в этом разделе. Отметим, что моделирование осуществлялось с использованием программы MODFLOW [18] (подраздел 5.3.2), которая на настоящий момент считается мировым стандартом для решения задач фильтрации и миграции, и отечественной программы GeRa [19] (подраздел 5.3.1), которая аттестована Ростехнадзором [20].

6.3.1. Концептуальная модель

Как уже отмечалось в главах 4 и 5, породы участка Енисейский обладают трещиноватостью, которая определяет фильтрационные свойства среды. Для моделирования фильтрации в трещиноватой среде можно выделить два базовых концептуальных подхода: дискретная система трещин [21, 22] и непрерывная модель с эффективными (результатирующими, осредненными) коэффициентами фильтрации [23, 24].

Модель дискретной системы трещин может быть построена только для детально изученной ближней зоны и требует информации о распределении трещин по направлению, размерам и положению трещин, а также необходимой для моделирования проницаемости, информации о водопритоке по трещинам [21]. Для участка Енисейский такой модели построено не было, что, в частности, связано с отсутствием необходимой для воспроизведения системы трещин исходной информации.

В качестве альтернативы в подразделе 5.3.2 приведена разработанная СПбО ИГЭ РАН стохастическая модель поля неоднородностей, выделяющая зоны повышенной водопроницаемости, которые ассоциированы с зонами дробления и/или трещиноватостью разного уровня. Полученная таким образом структура неоднородностей поля проницаемости может быть использована как среда для фильтрационного моделирования, разделенная на трещины и матрицу породы (аналог модели дискретных объектов). Но далее она использована как мини-модель сплошной пористой среды для проведения численных экспериментов по выявлению связности системы трещин. Полученные реализации стохастической модели не демонстрируют связности трещиноватых зон.

На основе имеющейся на настоящий момент гидрогеологической информации может быть построена только модель непрерывной фильтрации с эффективными коэффициентами проницаемости.

6.3.2. Геофильтрационная схематизация

Геофильтрационная схематизация включает обоснование гидродинамической модели фильтрационных процессов, куда относятся обоснование режима и пространственной структуры потока, распределение источников и стоков, а также определение фильтрационных параметров и граничных условий.

В гл. 5 представлены две альтернативные геофильтрационные модели участка Енисейский, различающиеся концептуальным подходом к геофильтрационной схематизации по нескольким аспектам.

- *Пространственная структура потока.* Представление о структуре потока подземных вод определялось на основе замеров напоров в отдельных интервалах, выполнявшихся в процессе опытно-фильтрационных работ. Но результаты интерпретации данных различаются. В одном из подходов (подраздел 5.3.1) выводы строились исключительно на основе использования данных измерений, причем использовались измерения по всем скважинам. Другой анализ (подраздел 5.3.2) опирался на теоретические представления о формировании структуры потоков в аналогичных объектах и данные, не согласующиеся с этим представлением, исключались из рассмотрения как сомнительные.
- *Структура определения фильтрационных параметров.* В одном варианте (подраздел 5.3.1) фильтрационные параметры ассоциированы с элементами геологической структуры и уровнем трещиноватости, взятыми на основе геологической схематизации, построенной по геологической информации из скважин. Сначала была реализована двумерная профильная модель в направлении потока до потенциальной зоны разгрузки, определенного по доступным фактическим данным, на ее основе была показана необходимость детального учета в модели структурных элементов с разной степенью трещиноватости. Также была разработана трехмерная модель, учитывающая основные геологические структуры в пределах лицензионной области объекта. Хотя фактических данных для полноценной реализации такой модели в настоящий момент недостаточно, было показано, что неоднородность вблизи площадки существенно трехмерна и ее невозможно с достаточной достоверностью учесть на основе двумерных моделей. В другом варианте (подраздел 5.3.2) задание фильтрационных параметров осуществляется по слоям (4 слоя), выделенным на основе тренда изменения проницаемости массива с глубиной, обнаруженного при опытно-фильтрационных работах.
- *Задание граничных условий.* В одном варианте геофильтрационной модели (подраздел 5.3.2) нижняя и левобережная границы модели рассматриваются как непроницаемые, другая часть границы модели ассоциирована с зоной разгрузки, а верхняя — с инфильтрационным питанием, которое оценивается на основе режимных водобалансовых наблюдений. Профильная модель (подраздел 5.3.1) ориентирована вдоль основного направления потока подземных вод (северо-северо-восток), который оценен с помощью плановой модели. На левой границе устанавливается условие 1-го рода, связанное с напорами для трех литологических разностей, нижняя граница рассматривается как непроницаемая, на верхней задается постоянный приток за счет инфильтрационного питания, правая связана с зоной разгрузки. Напоры на левой границе включены в состав калибруемых параметров модели, так как было показано, что их значения характеризуются неопределенностью.
- *Калибровка.* Для уточнения фильтрационных параметров обе модели используют калибровку, которая состоит в решении оптимизационной задачи [25]. Оптимизируемая функция формируется на основе сопоставления результатов модельных расчетов с данными измерений значений напоров в наблюдательных скважинах.

6.4. Предварительные оценки безопасности

Представленные в гл. 5 альтернативные варианты геофильтрационных моделей в основном базируются на интерпретации данных, полученных при проведении оценочной стадии геологоразведочных работ в период оценки пригодности участка Енисейский.

Валидация фильтрационных моделей выполнялась после их калибровки. При этом сравнивались модельные и измеренные значения напоров в скважинах, а также результаты по расходам рек. Обе модели демонстрируют удовлетворительный уровень воспроизведения измеренных значений.

Выполненные в подразделе 5.3.1 оценки миграции несорбируемого компонента (например, ^{129}I) с использованием профильной модели от ПГЗРО до зоны разгрузки (р. Шумиха) составляют около 22 500 лет. Другая геофильтрационная модель (подраздел 5.3.2) формирует такую структуру фильтрационных потоков, которая не может повлиять на защищенность от радиоактивного загрязнения грунтовых вод в зонах, расположенных выше ПГЗРО.

Таким образом, на нынешнем уровне знаний обе альтернативные модели, а также уровень изученности геологических ОСП позволяют сделать выводы о потенциальной пригодности участка для захоронения РАО.

Исследования, направленные на уточнение информации о геологических ОСП, будут продолжаться. В частности, по мере получения новой геологической информации будут развиваться геофильтрационные и геомиграционные модели.

Заключение

Важность изучения геологической среды при проектировании захоронения РАО заключается в том, что она является приоритетной составной частью многобарьерной системы обеспечения долговременной безопасности ПГЗРО. Проблемы изучения геологической среды связаны со сложностью ее строения по причине иерархичности размеров линейных и блоковых структур на множество порядков. В этих структурах присутствуют вещества в твердой, жидкой и газообразной фазах с высокой неоднородностью распределения свойств. Процессы, протекающие в этой среде, измеряются по своей длительности от секунд (землетрясения) до многих миллионов лет (тектогенез и метаморфизм).

Анализ текущего состояния изученности геологических ОСП для участка Енисейский показал, что геологических условий, которые не отвечали бы нормативным требованиям Ростехнадзора (НП-055-14) [7] к размещению ПГЗРО, к сегодняшнему дню не обнаружено. Однако степень изученности геологической среды и гидрогеологических условий недостаточна для однозначной интерпретации данных о геолого-структурных, гидрогеологических и других условиях для обоснования долговременной безопасности будущего ПГЗРО (НП-100-17 [26], РБ-003-21 [27]).

Неопределенности в отношении геологии и гидрогеологии участка Енисейский (дальняя зона) связаны с отсутствием буровой изученности территории, на которой потенциально может происходить рассеивание радионуклидов с подземными водами. Все скважины сконцентрированы в пределах горного отвода или в непосредственной близости от него.

Неопределенности в интерпретацию геологической информации по площадке привносит редкая сеть глубоких скважин. Все глубокие скважины пройдены за пределами блока размещения. Это напрямую связано с необходимостью технически не нарушать существующую минимальную гидравлическую связь горизонта размещения с поверхностью. Другая причина структурных неопределенностей – отсутствие ориентированного керна в имеющихся скважинах. Третья причина – отсутствие достоверной геологической карты поверхности. По этим причинам стали возможны варианты интерпретации внутреннего строения блока размещения ПГЗРО, а построение достоверной объемной геолого-структурной модели площадки затруднено.

Неопределенности в интерпретации гидрогеологической информации связаны с неравномерной и в целом низкой обводненностью горных пород, сложной структурой среды фильтрации, состоящей из пор и трещин разного масштаба, с методологическими ограничениями выполненных гидрогеологических исследований, на минимизацию которых, в том числе, будут направлены дальнейшие исследования.

Уменьшение неопределенностей в геологических данных для повышения уровня обоснованности как их интерпретации, так и результатов моделирования может быть достигнуто за счет реализации программы исследований при горнопроходческих работах, а также выполнения специальных исследований с проведением буровых работ на более широкой территории. Кроме того, выявленные возможные недостатки горных пород участка Енисейский могут быть учтены при проектировании системы инженерных барьеров ПГЗРО.

Литература

1. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: Radioactive Waste Management and Decommissioning: NEA/RWM/R(2019)1. — P., France: OECD NEA, 2019.
2. Кочкин Б. Т. Задачи изучения геологической среды участка Енисейский на текущем этапе реализации проекта захоронения / Б. Т. Кочкин // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 2(7). — С. 76—91. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-76-91
3. Кочкин Б. Т. Количественная оценка долгосрочной эволюции условий миграции радионуклидов из могильника на участке енисейский (Красноярский край) / Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2016. — № 5. — С. 401—411.
4. Подземная исследовательская лаборатория: геодинамические и сейсмотектонические аспекты безопасности / В. Н. Морозов, В. Н. Татаринцов, В. И. Кафтан, А. И. Маневич // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 3(4). — С. 16—29.
5. Подземная исследовательская лаборатория: задачи геодинамических исследований / В. Н. Татаринцов, В. Н. Морозов, В. И. Кафтан и др. // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1(6). — С. 77—89.
6. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации — ОСР-97. Масштаб: 1:8 000 000. 4 листа / В. И. Уломов, Л. С. Шумилина, А. А. Гусев и др.; под ред. В. Н. Страхова, В. И. Уломова. — М.: Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 1999.
7. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-14: [утв. приказом Ростехнадзора № 379 от 22.08.2014]: [в ред. приказов Ростехнадзора № 582 от 22.11.2018, № 163 от 18.05.2022]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2022.
8. Кочкин Б. Т. Долгосрочный прогноз климатических изменений в районе размещения хранилища высокорadioактивных отходов (участок Енисейский, Красноярский край) / Б. Т. Кочкин // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2015. — № 2. — С. 119—132.
9. Результаты комплексных геологических исследований Нижнеканского массива для обоснования возможности его использования для захоронения отвержденных радиоактивных отходов / Е. Б. Андерсон, В. М. Даценко, В. И. Кирко и др. // Исследования гранитоидов Нижнеканского массива для захоронения РАО: материалы КНТС: Координационный научно-технический совет по научному сопровождению проектирования и строительства завода РТ-2 на ГХК (Железногорск, 16—20 марта 1998) / под ред. Е. Ф. Любцевой. — СПб.: Горно-химический комбинат, НПО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина», 1999. — С. 14—23.
10. Макро-, мезо- и микроструктурные уровни изучения водо- и массообменных процессов в массиве трещиноватых пород (в связи с прогнозом миграции радионуклидов в зоне воздействия ПГЗРО в Нижнеканском гранитоидном массиве) / В. Г. Румынин, А. М. Никулёнков, А. Ю. Озерский и др. // Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий: Материалы международной научно-практической конференции: Сборник научных трудов. — М.: ООО «Винпресс», 2016. — С. 157—172.
11. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангара-Енисейская. Лист О-46 — Красноярск. Объяснительная записка / В. К. Зуев, Л. К. Качевский, Г. И. Качевская и др. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. — 500 с.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). Объяснительная записка / Л. П. Никулов, А. Н. Бабкин, В. М. Колямкин и др.; под ред. Л. К. Качевского. — 2-е издание. — М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015.
13. Иванова Т. П. Месторождения питьевых подземных вод Красноярского края / Т. П. Иванова, А. Ю. Озерский, Т. А. Фадина // Фундаментальные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием, 22—28 июня 2015). — Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2015. — С. 464—468.
14. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода—порода: в 5 т.: Т. 2: Системы вода—порода в условиях зоны гипергенеза / под ред. С. Л. Шварцева, Б. Н. Рыженко. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. — 389 с.

15. Шварцев С. Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза / С. Л. Шварцев. — М.: Недра, 1978. — 287 с.
16. The radionuclide distribution onto different mineral phases of the rocks of the exocontact zone of Nizhnekansky granitoid massif / A. A. Rodionova, V. G. Petrov, I. E. Vlasova [et al.] // *Perspectives in science*. — 2019. — Vol. 12. — P. 100406. — DOI: 10.1016/j.pisc.2019.100406
17. Мальковский В. И. Определение исходных данных для моделирования коллоидного переноса радионуклидов подземными водами / В. И. Мальковский, А. А. Пэк, Е. В. Александрова // *Материалы 12-й Международной конференции «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле»*. — М.: ИФЗ РАН, 2011. — С. 211–214.
18. McDonald M. G. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: Techniques of Water-Resources Investigations. USGS Numbered Series: 06-A1 / M. G. McDonald, A. W. Harbaugh. — Reston, Virginia, USA: U.S. Geological Survey, 1988. — 586 p. — DOI: 10.3133/twri06A1
19. Капырин И. В. Геомиграционное и геофильтрационное моделирование в расчетном коде GeRa / И. В. Капырин, Ф. В. Григорьев, И. Н. Коньшин // *Суперкомпьютерные дни в России: труды международной конференции*. — М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2016. — С. 133–139.
20. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин «Программа для трехмерного геофильтрационного и геомиграционного моделирования (GeRa/V2)»: [регистрационный № 534 от 13 ноября 2021 г.]: [выдан Федеральному государственному бюджетному учреждению науки Институту проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)]. — М.: Экспертный совет по аттестации программ для ЭВМ при Ростехнадзоре, 2021.
21. dfnWorks: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport / J. D. Hyman, S. Karra, N. Makedonska [et al.] // *Computers & Geosciences*. — 2015. — Vol. 84. — dfnWorks. — P. 10–19. — DOI: 10.1016/j.cageo.2015.08.001
22. Discrete-fracture modelling of the Äspö LPT-2, large-scale pumping and tracer test: PNC TN8410 94-269 / M. Uchida, T. Doe, W. Dershowitz [et al.]. — Tokai, Japan: Power reactor and nuclear fuel development corporation, 1994.
23. Jackson C. P. Self-consistency of a heterogeneous continuum porous medium representation of a fractured medium / C. P. Jackson, A. R. Hoch, S. Todman // *Water resources research*. — 2000. — Vol. 36. — № 1. — P. 189–202. — DOI: 10.1029/1999WR900249
24. Hartley L. Approaches and algorithms for groundwater flow modeling in support of site investigations and safety assessment of the Forsmark site, Sweden / L. Hartley, S. Joyce // *Journal of hydrology*. — 2013. — Vol. 500. — P. 200–216. — DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.07.031
25. Hill M. C. Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions, and uncertainty / M. C. Hill, C. R. Tiedeman. — Hoboken, N.J., USA: Wiley-Interscience, 2007. — 480 p.
26. Требования к составу и содержанию отчета по обоснованию безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-100-17: [утв. приказом Ростехнадзора № 218 от 23.06.2017]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2017.
27. Оценка безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов: Руководство по безопасности при использовании атомной энергии № РБ-003-21: [утв. приказом Ростехнадзора № 101 от 19.03.2021]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2021.

Архивные документы и материалы

- a. Линд Э. Н. Изучение структурно-тектонического строения «Енисейского» участка Нижнеканского гранитоидного массива на основе проведения комплексных геофизических исследований: Отчет / Э. Н. Линд, В. М. Даценко и др. — Красноярск: КНИИГиМС, 2002–2004.
- b. Гупало Т. А. Детальные геолого-поисковые, буровые и специализированные работы на Нижнеканском массиве: Отчет / Т. А. Гупало, В. Л. Миловидов, О. А. Проколова и др. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2002–2005.

Глава 7

Приоритетные направления получения уточненной геологической информации для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО

Применяемые в настоящее время методы изучения вмещающей геологической среды, в том числе результаты глубокого бурения, не могут в полном объеме предоставить необходимые и достоверные сведения о процессах, которые будут происходить в системе отходы — инженерные барьеры — подземные воды — геологическая среда, а также о влиянии сооружений глубинного заложения на состояние массива, включая его гидродинамические параметры.

Подтверждением имеющихся представлений о геологическом строении массива горных пород и процессах, происходящих в нем под влиянием естественных и техногенных факторов, является их проверка в натурных условиях. Это возможно осуществить только в результате выполнения соответствующей программы научно-исследовательских работ в специальной подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), сооружаемой на площадке предполагаемого строительства пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).

Основные направления исследований [1], запланированных в ПИЛ на участке Енисейский, разработаны на основании обобщения опыта многолетних работ в ведущих международных лабораториях [2], рекомендаций экспертных и надзорных организаций (ФБУ «ГКЗ» и Роснедра, Ростехнадзор, Росприроднадзор) по результатам экспертизы результатов комплексных исследований на участке строительства ПИЛ, а также результатов расчетных оценок долговременной безопасности [3] глубинного захоронения РАО на выбранном участке.

К приоритетным направлениям работ в ПИЛ в соответствии с «Комплексной программой исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров» были отнесены [4]:

- детальное изучение геологического строения, механических, гидрогеологических и геохимических условий, включая выявление зон неоднородностей геологической среды, а также приуроченных к ним систем трещин и исследование их водопроводящих свойств;

- проведение натурных экспериментов без использования радиоактивных веществ для изучения поведения материалов и конструкций инженерных барьеров в максимально приближенных к ПГЗРО условиям с учетом всех значимых для долговременной безопасности факторов, в том числе: давления и тепловых нагрузок, геохимических и биохимических особенностей массива и подземных вод, изменения состояния массива в период строительства и эксплуатации подземного объекта;
- подтверждение достоверности параметров и моделей, используемых при выполнении расчетных оценок безопасности.

Для выполнения намеченного комплекса работ в состав ПИЛ включены (рис. 7.1):

- два вертикальных ствола, оборудованных клетьевыми подъемами; в среднем глубина стволов составляет 500 м, а их диаметр варьируется от 6 до 6,55 м в зависимости от назначения конкретного ствола;
- комплекс наземных зданий и сооружений, в том числе опытно-демонстрационный центр;
- горизонтальные горно-капитальные выработки суммарной протяженностью не менее 1500 м, оконтуривающие предполагаемую область захоронения.

Объем исследований в соответствии с вышеперечисленными направлениями был разделен на 14 блоков работ, распределенных по времени выполнения, в привязке к различным стадиям жизненного цикла ПИЛ. Девять из них относятся к вопросам доизучения основных параметров массива (рис. 7.2) [4].

Первая стадия включает исследования, выполняемые в процессе сооружения стволов, вскрывающих целевой горизонт ПИЛ, а также технологических и исследовательских горизонтальных выработок. На этой стадии собирается детальная информация о вмещающих породах, влиянии на них горнопроходческих работ (параметры зоны техногенной трещиноватости, возникновение которой обусловлено технологией проходки горных выработок), величинах водопритокков, оценке обводненности массива на различных гипсометрических уровнях. В ходе картирования стенок выработок фиксируются: контакты различных типов горных пород, слагающих массив и различающихся по составу, прочностным и структурным характеристикам; нарушенные участки, включая единичные трещины — открытые и имеющие минеральный заполнитель (залеченные), детально документируется строение таких зон — фиксируются их геометрические характеристики и пространственное положение, осуществляется координатная привязка, определяются параметры смещений, жильная минерализация; качественно и количественно оцениваются характеристики трещинной сети массива, включая: генезис трещин, раскрытие, плотность и т. п.

По результатам исследований первой стадии будет уточнена геологическая модель участка размещения объекта, получены начальные характеристики пород, характеризующие состояние ненарушенного массива и определяющие безопасность объекта в постконсервационный период. Результаты исследований данной стадии будут являться основой для уточнения участков в массиве, в которых будут пройдены выработки исследовательского назначения и размещены стенды и оборудование для долговременных экспериментов (см. рис. 7.1), предусмотренных Комплексной программой исследований [а].

Последующие стадии исследований относятся к периоду эксплуатации комплекса подземных сооружений ПИЛ и направлены на изучение поведения элементов системы захоронения в условиях, максимально приближенных к реальным, для которых может потребоваться расширение сети горных выработок ПИЛ. На данной стадии запланировано создание и выполнение экспериментов на специальных исследовательских установках, позволяющих смоделировать процессы, которые будут происходить во время и после размещения РАО в ПГЗРО:

- комплексные исследования характеристик массива пород и подземных вод непосредственно в зоне будущего захоронения РАО, определение диапазонов изменения параметров массива, важных для оценки безопасности;
- экспериментальные исследования изолирующих свойств материалов инженерных барьеров в натурных условиях и уточнение составов барьерных смесей;
- отработка технологических решений по сооружению, эксплуатации и закрытию планируемого выработок ПГЗРО (отработка технологии проходки горных выработок, создание ячеек захоронения РАО и их консервация, сооружение инженерных барьеров, технологии закрытия ПГЗРО);
- уточнение, дополнение, проверка и калибровка численных моделей для оценки долговременной безопасности системы захоронения РАО.

Кроме того, говоря о вопросах комплексного геологического доизучения выбранного массива горных пород для обоснования долговременной безопасности объекта захоронения, нельзя не отметить работы, продолжающиеся на земной поверхности и направленные на доизучение условий зоны потенциального влияния ПГЗРО. Выполнение этих работ запланировано за пределами площадки сооружения и направлено на уточнение геологического строения, гидрогеологических условий и геоэкологической обстановки на вероятных путях миграции радионуклидов, включая:

- определение возраста вод по линии разгрузки потока подземных вод;
- определение сорбционных свойств горных пород на возможных участках распространения загрязнения от объекта захоронения до зоны разгрузки потока подземных вод;
- изучение сопротивления подрусовых отложений р. Енисей в месте вероятной разгрузки подземных вод;
- получение водобалансовых характеристик, необходимых для создания численной модели процессов фильтрации загрязненных подземных вод и миграции техногенных радионуклидов.

В качестве отдельного направления работ также необходимо отметить долговременные наблюдения (мониторинг), выполняющиеся как в подземных условиях, так и на земной поверхности. Данные работы будут направлены на определение диапазонов изменения параметров событий и процессов, влияющих на долговременную безопасность ПГЗРО.

Необходимое время на выполнение приведенного объема исследований и принятие решения о создании на месте ПИЛ ПГЗРО определяется «Стратегией создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» [5] и составляет не менее 15 лет.

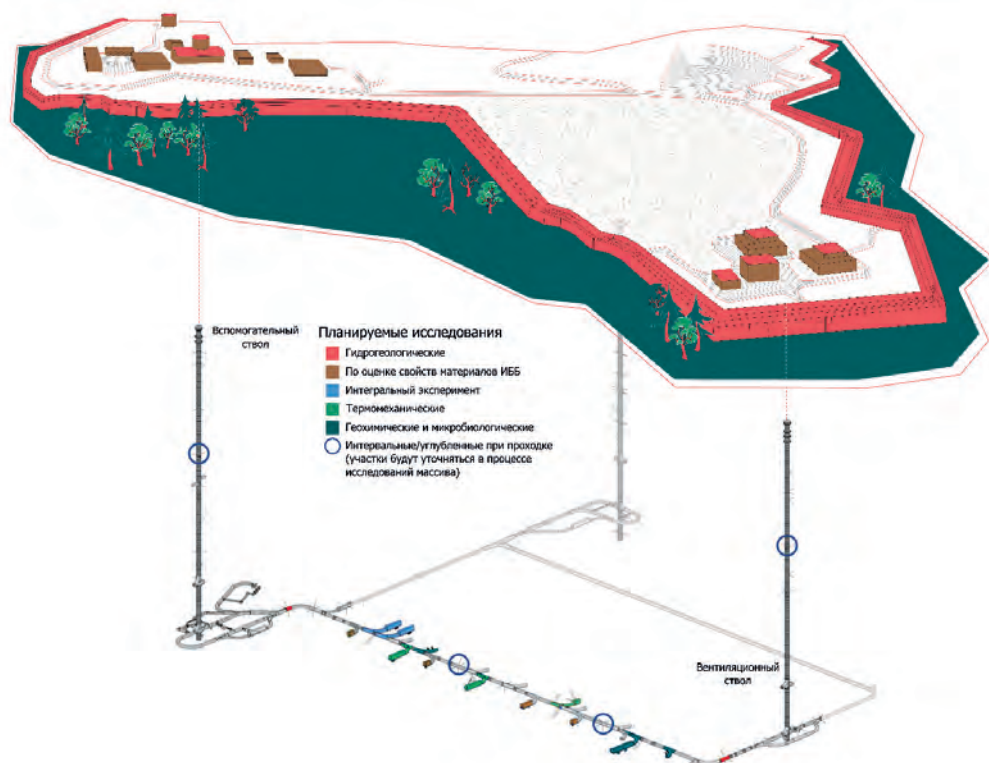


Рис. 7.1. Состав подземного комплекса ПИЛ для проведения приоритетных исследований в рамках ОДБ

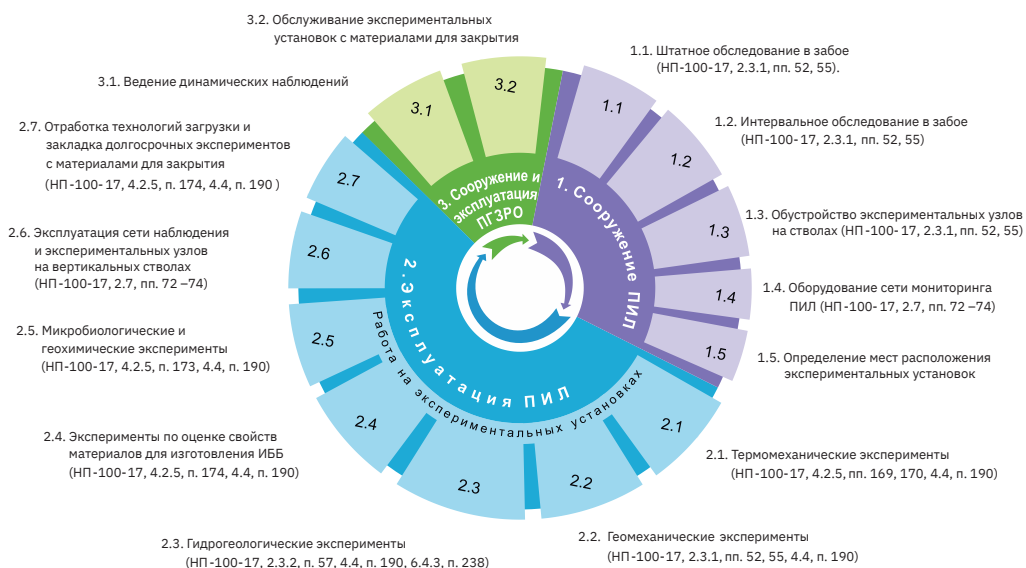


Рис. 7.2. Блоки исследований в привязке к жизненным циклам ПИЛ

Заключение

Существующие наземные методы изучения геологической среды не могут в полном объеме представить данные, необходимые для прогнозирования долговременной безопасности ПГЗРО. Поэтому в качестве неотъемлемого этапа изучения геологических условий размещения пункта захоронения и процессов, которые будут происходить в системе отходы — инженерные барьеры — подземные воды — геологическая среда, предусмотрены исследования в подземной исследовательской лаборатории.

В ПИЛ запланировано проведение комплекса работ, направленных на получение уточненных данных по геологическому строению, механическим, гидрогеологическим и геохимическим условиям, включая выявление зон трещиноватости и детальное изучение их миграционных свойств.

Кроме того, в связи с тем, что породный массив является основным барьером на пути распространения радионуклидного загрязнения из выработок захоронения в область активного водообмена, немаловажным является вопрос доизучения условий зоны потенциального влияния ПГЗРО. В соответствии с этим «Комплексной программой исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров» предусмотрено выполнение работ по уточнению геологического строения, гидрогеологических условий и геоэкологической обстановки на возможных путях миграции радионуклидов, начиная от промышленной площадки и заканчивая областями разгрузки подземных вод.

Литература

1. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов / А. Н. Дорофеев, Л. А. Большов, И. И. Линге и др. // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1 (1). — С. 34–43.
2. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий: препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2017-12 / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. А. Пронь, В. Ю. Коновалов. — М.: ИБРАЭ РАН, 2017. — 34 с.
3. Расчетное обоснование долговременной безопасности и оптимизация решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации: тенденции, потребности, возможности / И. И. Линге, С. С. Уткин, В. С. Свительман, С. А. Дерябин // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 2(11). — С. 85–98. — DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-85-98
4. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика / А. А. Абрамов, Л. А. Большов, А. Н. Дорофеев и др. // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 1 (10). — С. 9–21. — DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21
5. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2(3). — С. 114–120.

Архивные документы и материалы

- a. Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров: Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край): [утв. директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО ГК «Росатом» О. В. Крюковым 09.01.2019]. — М.: ФГУП «НО РАО», 2019.

Заключение

В заключение сравнительно небольшой для описания такого значительного проекта, но весьма насыщенной фактурой и ссылочным материалом монографии резюмируем основные итоги работ по выбору участка для глубинного захоронения РАО.

За тридцать с лишним лет исследований и изысканий процесс выбора участка недр для глубинного захоронения РАО претерпел принципиальную, но естественную трансформацию. Широкие по географии работы в итоге сконцентрировались на нескольких участках в Красноярском крае, а затем из них был выбран один, в отношении которого приняты решения Госкорпорации «Росатом», организованы изыскательские и проектные работы, а затем получены разрешения органов государственного регулирования в области недропользования и безопасности при использовании атомной энергии.

Эта трансформация позволила перейти ко второму этапу, который будет сопоставим по продолжительности с первым: сооружению подземной исследовательской лаборатории и проведению широкого комплекса исследований, которые позволят принять обоснованные решения по ключевым характеристикам пункта глубинного захоронения РАО и приступить к его сооружению, а затем — к эксплуатации и закрытию.

В отношении пройденного первого этапа можно сделать следующие выводы. Процесс выбора участка недр для глубинного захоронения РАО в России, начатый в 80-х гг. прошлого века, включая геологическое изучение участка Енисейский с 2002 г., имел большое количество сходных черт с опытом зарубежных стран, но и немало отличий. Подводя черту под материалами достаточно компактной гл. 2, следует в первую очередь упомянуть такие общие элементы методологии выбора участка, как широту географии, итерационность, внимание к множеству организационных, социальных и экономических факторов, среди которых — финансовые затраты, плотность населения, права собственности на землю, активность «зеленых» движений и т. д. и в конечном итоге — многокритериальную оценку имеющихся альтернатив.

К принципиальным отличиям следует отнести отсутствие стратегических документов по общему плану действий в отношении геологического захоронения РАО, законодательных и иных нормативных основ, надежного и стабильного источника финансирования и, как следствие этого, отсутствие одной головной организации, а также публичной компоненты в части отражения основных результатов работ. Эти в принципе негативные моменты во многом усугублялись или были следствиями глубокой трансформации экономики России, в рамках которой проблема захоронения РАО многократно рассматривалась и характеризовалась как принципиально важная для обеспечения радиационной безопасности в России, но практически всегда, вплоть до начала реализации ФЦП ЯРБ, финансово должным образом не обеспечивалась.

Устранение дефицитов государственного управления и регулирования безопасности при обращении с РАО к настоящему времени в основном завершено благодаря принятию в 2011 г. федерального закона «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1]. Создание предусмотренной данным законом Единой государственной системы обращения с РАО (ЕГС РАО) близко к завершению.

В гл. 1 кратко представлен обзор основных направлений создания ЕГС РАО. Кратко напомним наиболее важные из них [2]. Проведена первичная регистрация РАО и мест их хранения. Накопленные РАО отнесены к федеральной собственности. Большая часть накопленных РАО признана особыми, т. е. подлежащими захоронению на месте [3]. Эксплуатирующие организации стали производить отчисления на захоронение вновь образующихся РАО, которые рассчитываются на основе классификации отходов для целей захоронения и соответствующих тарифов.

Создан национальный оператор по захоронению РАО [4] — ФГУП «НО РАО», который стал единственной организацией, осуществляющей такие виды деятельности, как обеспечение безопасного обращения с принятыми на захоронение РАО, эксплуатация и закрытие пунктов захоронения РАО; выполнение функции заказчика проектирования и сооружения пунктов захоронения РАО; подготовка прогнозов объема захоронения РАО и развития инфраструктуры по обращению с РАО; техническое и информационное обеспечение государственного учета и контроля радиоактивных веществ и РАО. За последние десять лет введены в эксплуатацию и сооружаются приповерхностные пункты захоронения РАО в районах Новоуральска, Северска и Озерска. В дальнейшем систему приповерхностных ПЗРО необходимо будет развивать, но задел уже имеется.

В настоящее время пункт глубинного захоронения РАО — единственный недостающий элемент создаваемой системы ЕГС РАО. Его технологический облик стал эпицентром, вокруг которого концентрируются размышления и об атомной энергетике будущего, и о требованиях к ней в отношении характеристик и количеств образующихся РАО. Таким образом, вопросы создания ПИЛ, а затем и сооружения ПГЗРО к настоящему времени приобрели центральную роль в отношении развития ядерных технологий России, ориентированных на технологическое лидерство.

В 2018 г. органом государственного управления в области обращения с РАО — Государственной корпорацией «Росатом» — утверждена Стратегия создания ПГЗРО [5], которая определяет основные этапы реализации этого сложнейшего проекта. Первые два из них касаются создания и эксплуатации ПИЛ, которая должна дать дополнительные свидетельства его безопасности.

Анализ подходов и критериев выбора участка для глубинного захоронения ОЯТ и РАО, представленный в гл. 2, дает возможность сравнить детально описанный в последующих главах российский опыт выбора площадки для создания ПГЗРО с лучшими практиками и накопленным опытом других объектов. Самым общим признаком, характеризующим проблему и в России, и за рубежом, является пионерский характер работ. Во всем мире нет до конца реализованных проектов захоронения наиболее сложных по своим характеристикам РАО, а именно ОЯТ или продуктов его переработки, хотя объекты геологического захоронения РАО других типов уже существуют в США [6], Венгрии [7], Южной Корее [8], Финляндии [9].

Основная причина этого: объект отличается не столько особой технической сложностью, сколько нетривиальностью оценки его безопасности на периоды, многократно превышающие письменную историю человечества. Не менее важным обстоятельством является законодательное распределение полномочий между органами власти различных уровней. В наиболее простом случае в нем участвуют Правительство и органы государственного управления и регулирования с одной стороны, и органы власти общины или муниципалитета, на территории которой планируется создание объекта — с другой. Для них могут быть сформированы механизмы экономической заинтересованности. В более сложной ситуации, в странах с федеральным устройством, к ним добавляется органы власти субъекта федерации, в отношении которых формирование подобных механизмов намного сложнее. Вне зависимости от этих обстоятельств методология выбора остается более-менее одинаковой, хотя в разное время она и претерпевала масштабные изменения.

В одной из относительно недавних публикаций по тематике геологического захоронения РАО [10], оглядываясь на историю развития этого вопроса, начиная от первого отчета Национального научно-исследовательского совета США [11], авторы отмечают: «Тот факт, что безопасное захоронение РАО будет когда-либо сочтено проблематичным, стало бы большим сюрпризом для пионеров геологического захоронения, которые считали, что пункт захоронения может быть сооружен группой инженеров с несколькими “...должным образом подготовленными геологами”».

В современной международной практике обоснование безопасности пункта захоронения РАО — сложная мультидисциплинарная задача, решаемая выполнением определенных процедур и путем систематического анализа всех возможных событий и процессов, которые могут повлиять на характеристики системы захоронения [12, 13]. В обзорной работе, дающей представление о содержании методологии [14], показано, что основная идея состоит в формировании так называемого досье обоснования долговременной безопасности (англ.: safety case) или отчета по обоснованию безопасности в терминах НП-055-14 [15]: «интеграции аргументов и доказательств, которые описывают, количественно выражают и обосновывают безопасность и степень уверенности в безопасности пункта геологического захоронения» [16–18].

Две неотъемлемые части safety case (рис. 1) — это:

- информация, лежащая в основе оценки безопасности (assessment basis), т. е. описание результатов характеристики системы захоронения (включая вмещающую геологическую среду), анализ релевантных для долговременной эволюции конкретного пункта захоронения факторов (особенностей, событий и процессов) [13];
- и непосредственно оценка безопасности (safety assessment): результаты численного анализа опасностей, связанных с пунктом захоронения, и способности площадки и конструкции захоронения обеспечивать функции безопасности и удовлетворять техническим требованиям [17].

Пункты захоронения размещаются и проектируются таким образом, чтобы обеспечить защиту человека и окружающей среды от рисков, связанных с долгоживущими РАО. Для этого пункт захоронения должен обеспечивать следующие функции безопасности [17, 19]:

- удержание радионуклидов (внутри матрицы отходов, упаковки, барьеров безопасности пункта захоронения);
- изоляция отходов от доступной биосферы и существенное сокращение вероятности и всех возможных последствий непреднамеренного вмешательства человека.

Как и для реакторных технологий, ключевой вызов в процессе разработки safety case для пунктов захоронения РАО связан с необходимостью учета множества особенностей, событий и процессов с различными характерными временами. Эти факторы, характерные для них неопределенности, их возможное влияние на эволюцию пункта захоронения должны быть идентифицированы, оценены и представлены в отчете об обосновании безопасности: Phenomena identification and ranking table (PIRT) [20] в составе safety analysis report в реакторной терминологии, Features, events and processes (FEP) [13] в safety case для пунктов захоронения РАО, внешние воздействия природного и техногенного происхождения в терминологии НП-064-17 [21].

Несмотря на то что данная монография ориентирована в большей степени на геологические (т. е. естественные) барьеры безопасности, здесь очень важно отметить их принципиальную взаимосвязь с инженерными: необходимость соблюдения ключевого аспекта обеспечения безопасности — принципа многобарьерности — означает, что и удержание, и изоляция радионуклидов за счет множественных механизмов на различных временных масштабах обеспечивается и вмещающей средой, и элементами системы инженерных барьеров.

Общепринятая практика — это определение функций безопасности для каждого элемента системы захоронения и обоснование их выполнения [22, 23]. Естественно, что комбинация функций безопасности, достигаемых отдельными барьерами, для каждого проекта оказывается в какой-то степени уникальной в зависимости от особенностей площадки, принятой концепции, критериев приемлемости РАО, требований заинтересованных сторон и т. д. [24]. Функция, закрепляемая за каждым элементом системы инженерных барьеров при его проектировании в соответствии с той или иной концепцией захоронения, будет определяться в зависимости от условий, которые, как ожидается, могут возникнуть в пункте захоронения в течение периода потенциальной опасности, нормативных требований к обеспечению удержания и, что важно в контексте данной монографии, ожидаемых «эксплуатационных» характеристик естественного геологического барьера.

Отсюда, в частности, следует важный вывод: «идеальной» геологической среды для захоронения РАО не существует. И вопрос о «неправильном» выборе площадки для захоронения в определенной степени теряет смысл, если только концепция захоронения не определена заранее таким образом, что из оценок наиболее вероятного времени выхода радионуклидов за пределы инженерных барьеров следуют более жесткие, чем в общем случае, ограничения на геологическую среду.

При императивном требовании обеспечения долговременной безопасности мы всегда стоим перед необходимостью нахождения оптимума в системе свойства РАО — социальная приемлемость — экономика — технические решения. Причем в конкретных проектах эта система требований и критериев может детализироваться и дополняться.

Несмотря на то что и площадки захоронения, и конструкции инженерных барьеров выбираются по критериям долговременной стабильности и предсказуемости, они не являются статическими системами. Проходка горных выработок, размещение инженерных барьеров и самих отходов создают тепловые, гидрогеологические, механические, химические и биологические возмущения, в связи с чем установление нового «квазиравновесия» в системе захоронения может занять до нескольких тысяч лет. На рис. 2 показаны характерные временные масштабы изменений, которые действуют на различные компоненты системы [25, 26]. Также система захоронения может подвергаться внешним изменениям в течение десятков тысяч лет и более, например, из-за климатических и геологических явлений и процессов (на рис. 2 они уже не показаны).



Рис. 1. Обобщенная схема работ по формированию Safety case (адаптирована из [18])

Таким образом, прогноз эволюции пункта захоронения подвержен влиянию неопределенностей, которые в целом увеличиваются с течением времени и полностью не могут быть устранены [27].

В силу этого обоснование безопасности должно быть сфокусировано на том, чтобы продемонстрировать следующее: либо система захоронения будет функционировать в будущем ожидаемым образом, либо, если нет, то вероятность таких событий находится в пределах социально-приемлемого значения.

Это означает необходимость наличия тщательно описанных предположений [28], например, что климат будет изменяться понятным образом, что влечет за собой предсказуемые изменения во вмещающей среде (например, в химическом составе подземных вод) и системе инженерных барьеров (например, изменения химического состава поровой воды бентонита). Эта ожидаемая линия эволюции конкретного пункта захоронения называется «базовым сценарием» и учитывается при выборе концепции системы захоронения (включая выбор вмещающей породы и состав инженерных барьеров).

Неопределенности, связанные с эволюцией площадки (и, как следствие, с выполнением пунктом захоронения своих функций), учитываются в оценках безопасности путем включения необходимого количества дополнительных вариантов развития и /или случаев вмешательства человека, так называемых альтернативных сценариев и сценариев вторжения. Для них, в отличие от базового сценария, для которого производятся расчеты доз, считают в основном уже только вероятности, исходя из того, что ущерб будет постулированным.

Глава 2 завершается краткой геологической характеристикой зарубежных участков проектируемых пунктов захоронения РАО в древних кристаллических горных породах. Среди них объекты Финляндии, Швеции и Китая. Рассмотрение зарубежного опыта поможет лучше понять подходы, реализованные российскими специалистами.

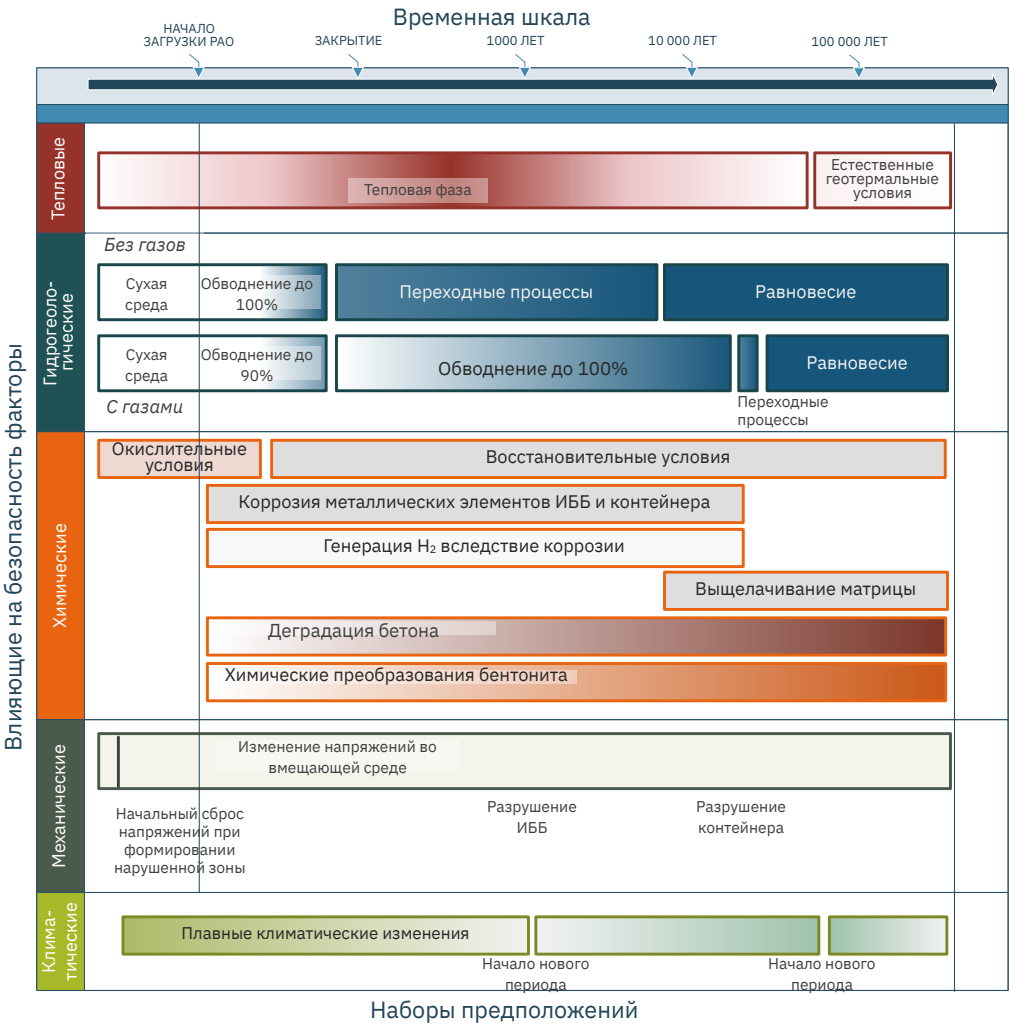


Рис. 2. Временные масштабы изменений, действующих на различные элементы системы захоронения [25, 26]

С точки зрения организации соответствующих работ российская история дает два примера поиска участков недр, пригодных для захоронения РАО. Первый из них, отличавшийся высочайшим темпом реализации, касался проблемы изоляции больших объемов ЖРО низкой и средней активности. От постановки задачи до начала опытных работ на выявленных участках прошло менее 10 лет. Еще несколько лет потребовалось для организации промышленного захоронения на полигонах в районе Сибирского химического комбината (СХК, г. Северск), Горно-химического комбината (ГХК, г. Железногорск) и Научно-исследовательского института атомных реакторов (НИИАР, г. Димитровград). Причина проста и кроется в четкой формулировке целей и назначения этих объектов и понимании тяжести альтернативных решений, а именно — размещения ЖРО в поверхностных бассейнах-хранилищах по примеру ПО «Маяк».

Второй пример, которому посвящена гл. 3, не был обеспечен столь четким целеполаганием и актуальностью. Следствием этого стали и широта исследований, и их определенная незавершенность в отношении некоторых площадок. По заданию Минатома СССР поиском площадок, пригодных для подземного захоронения твердых (отвержденных) РАО, активно занялись специалисты ведомственных организаций и ученые Академии наук СССР. Естественно, в первую очередь интерес вызвали районы расположения производственных организаций, которые были «обделены» природными условиями, дававшими возможность геологической изоляции жидких РАО. Первый фундаментальный отчет, посвященный комплексным инженерно-геологическим исследованиям по районированию территории страны с выделением геологических формаций, пригодных для захоронения высокоактивных отходов, был подготовлен специалистами ВНИПИпромтехнологии под руководством О. Л. Кедровского и датирован 1983 г. Впоследствии по некоторым из отдельных районов были опубликованы фундаментальные работы, однако комплексно ранняя история геологических исследований в России с целью выбора района размещения геологического объекта захоронения РАО, объединяющая в полном объеме все изученные ранее территории вместе, представлена впервые именно в данной монографии.

Так, в гл. 3 рассмотрены участки архипелага Новая Земля, районы Кольского полуострова, Южного Урала и Красноярского края. Понятно, что в обосновании рассмотрения каждого из этих районов имелись веские доводы. Сегодня также понятно, что некоторые из рассмотренных районов с точки зрения логистики обращения с ОЯТ и РАО были далеко не идеальными. Прежде всего это относится к Новой Земле и Кольскому полуострову. Эта неидеальность измеряется не только затратами на транспортирование, но и рисками обращения с РАО. Несмотря на практически доказанную безопасность специального транспортирования отработавшего ядерного топлива и отходов высокой активности, вероятность аварий не равна нулю. И при определенных расстояниях связанные с транспортированием соответствующие риски гарантированно превышают риски, связанные с существованием объекта захоронения. В этой связи смещение исследований в районы Красноярского края, где планировались ранее и сооружаются теперь объекты переработки ОЯТ, вполне уместно. По факту такое изменение подхода было зафиксировано в начале 1990-х гг. прошлого века. По этой же причине завершающие гл. 3 разделы по исследованиям на Нижнеканском массиве и его обрамлении изложены более обстоятельно.

Помимо систематических исследований по выбору мест изоляции ВАО, в окрестностях ГХК в тот же период реализовывались и локальные проекты, ориентированные на решение более частных вопросов. Например, изучались возможности подземной изоляции ОЯТ от Билибинской АЭС на Чукотке или ОЯТ атомных подводных лодок в Приморье.

Важно, что уже в то время предполагалась возможность создания подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) в соответствии с мировой практикой поэтапного подхода к подземной изоляции ВАО и ОЯТ. В частности, рассматривали возможность заложения трех таких лабораторий: на территории ПО «Маяк» (Челябинская область), на территории Нижнеканского массива (Красноярский край) и на Кольском полуострове.

Несмотря на отсутствие ярко выраженного итогового решения относительно завершения работ по некоторым территориям, например, по площадкам на Кольском полуострове, материал гл. 3 дает хорошее представление о характере и содержании выполненных работ. Почти во всех случаях в ходе исследований не было установлено категорических противопоказаний для продолжения работ, так же как и не было выявлено идеальных геологических участков. Для рассмотренного этапа характерно определенное игнорирование инфраструктурных особенностей перспективных

площадок. Последние обстоятельства, казалось бы, должны были стать противопоказанием для развертывания исследовательских и проектных работ по объекту на архипелаге Новая Земля. Их проведение является свидетельством попыток решения проблемы создания объекта захоронения РАО без его серьезного обсуждения с местным населением по причине отсутствия последнего. Непростая ситуация с транспортной инфраструктурой была характерна и для потенциальных участков на Кольском полуострове. Таким образом, отсутствие геологических противопоказаний и обстоятельства транспортной доступности стали основными причинами концентрации последующих исследований и изысканий на юге Красноярского края.

В гл. 4 представлены результаты геологических исследований в пределах Нижнеканского массива и его обрамления, выполненных в период 1993–2008 гг. Изначально для анализа было выделено 18 участков, затем исследования были сосредоточены на участках Итатский и Каменный, иногда объединяемых в Верхнеитатский, и участке Енисейский. Значительный объем исследовательских работ был выполнен и в подземном комплексе ГХК как уникальном аналоге будущего объекта захоронения тепловыделяющих РАО по степени техногенного воздействия на вмещающий массив.

Для понимания основных мотивов выбора участка Енисейский важен учет следующих обстоятельств.

- В начале 2000-х гг. была снята изначально поставленная сверхзадача поиска геологической среды, подходящей именно для перспективных РАО от планировавшегося к сооружению нового завода по переработке ОЯТ (РТ-2). В качестве подлежащих захоронению РАО стали рассматриваться и накопленные на ПО «Маяк» остеклованные РАО завода РТ-1.
- Отсутствие решительных преимуществ какого-либо из приоритетных участков позволяло признать важным обстоятельство лучшей транспортной доступности и близости участка Енисейский к объектам ГХК.
- Нормативно-правовая база в своей основе была ориентирована на недропользование с точки зрения на добычи полезных ископаемых, а не на захоронение РАО. Ее развитие, включавшее изменение устаревших (главным образом в сторону подходов, признанных на международном уровне) и принятие новых законов и подзаконных актов, регулировавших эту деятельность в Российской Федерации, осуществлялось медленно.

Нормативно-правовое обеспечение работ заслуживает отдельного внимания, поскольку последствия того, что процесс выбора участка захоронения начиная с 1980-х гг. (гл. 3) и геологического изучения участка Енисейский начиная с 2002 г. совпал во времени со становлением правовой базы, регулирующей эту деятельность со стороны заинтересованных ведомств, неоднократно ставили исполнителей в ситуацию правовой неопределенности (гл. 4). Геологическое изучение уже выбранного участка и государственная экспертиза результатов, полученных в 2010–2015 гг., впервые проводились в соответствии с требованиями нормативных документов двух главных отечественных регуляторов в этой области: Ростехнадзора и Министерства природных ресурсов (гл. 5). Формальное соответствие этим требованиям как с точки зрения условий самого горного массива, так и с точки зрения качества выполненных видов и объемов работ дало основание Федеральному агентству по недропользованию (Роснедра) по результатам государственной экспертизы признать участок Енисейский пригодным для глубинного захоронения радиоактивных отходов и разрешить опытную эксплуатацию.

Использование традиционных рекомендаций Минприроды России по этапности (стадийности) ведения геологоразведочных работ, при котором повышение детальности геологического изучения сопровождается последовательным сокращением исходной территории и сменой применяемых методов привело к тому, что участок Енисейский исходной площадью 70 км² оказался изученным крайне неравномерно. Вследствие поэтапного подхода последовательно сгущалась сеть геофизических профилей и точек наблюдений на поверхности, росло число и глубина буровых скважин. В результате все скважины были пробурены в центральной части участка Енисейский площадью 1,7 км², соответствующей утвержденному горному отводу.

Концентрация глубокого бурения исключительно на локальной площадке размещения проектируемого ПГЗРО, очевидно, нарушает требования Ростехнадзора, касающиеся изысканий и исследований во всем районе предполагаемого размещения ПГЗРО. Хотя контуры «района размещения» в документах Ростехнадзора в явном виде не установлены по той причине, что их невозможно определить заранее, до выбора района с конкретными условиями и до выполнения прогнозного расчета ореола влияния ПГЗРО, очевидно, что геологическое доизучение района еще предстоит выполнить.

В завершение краткого подведения итогов отметим несколько естественным образом сложившихся ситуаций, дающих основание для поисков скрытого умысла или обвинений в непонимании геологических основ.

Во-первых, какой объект планировалось создать в первую очередь? Материалы гл. 3 дают ясный ответ, что первый этап начиная с 1990-х гг. представлялся как сооружение ПИЛ. Однако осенью 2006 г. при обсуждении проекта ФЦП ЯРБ в Государственной Думе на круглом столе, организованном Комитетом по энергетике, со стороны очень известного академика, авторитетного специалиста в области реакторной техники, было сделано замечание о неуместности подобного названия для объекта, который мог бы быть назван не «лаборатория», а гораздо более традиционно — опытно-промышленный. Присутствовавший на заседании руководящий работник Минэкономразвития, ответственный за разработку ФЦП, дал указание обязательно учесть это замечание. Таким образом, в текст Концепции программы [29] и попала эта двусмысленная формулировка. Дословно она выглядела так: *«Выполнение предпроектных и проектных работ по созданию опытно-промышленного объекта окончательной изоляции высокоактивных отходов»*. В тексте первой редакции самой программы присутствует более сильная (с бюрократической точки зрения) формулировка: *«Строительство первоочередных объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив)»*. В последующих редакциях наименования стали более адекватными содержанию работ:

- В 2010 г.: Строительство первоочередных объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов, включая проектно-изыскательские работы (Красноярский край, Нижне-Канский массив).
- В 2012 г.: Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив).

Во-вторых, «Нижнеканский» или «Нижне-Канский»? Верным, безусловно, является первый вариант, но именно второй — ошибочный — попал в официальный документ и вынужденно воспроизводится уже на протяжении длительного времени.

Наконец, участок Енисейский — гранитоидный или нет? Содержание гл. 4 однозначно говорит, что нет: преимущественные породы этого участка — гнейсы, которые во всех зарубежных проектах рассматривались вместе с гранитами и туфами как один из допустимых вариантов размещения объекта захоронения в кристаллических породах.

В целом, материал гл. 4 дает выраженную картину реализации итерационного подхода по геологическим аспектам с учетом социально-экономических, демографических, экологических, инфраструктурных и других факторов.

В главах 5—7 рассмотрены результаты дополнительных исследований, уже проведенных и продолжающихся, направленных на получение комплекса материалов, требуемых для должной характеристики площадки и последующего обоснования безопасности. В ходе этих исследований было применено много новых технологий (пакерные опробования, внутрискважинная панорамная съемка, лазерное сканирование, анализ космоснимков, современные системы геологического моделирования и др.). Важно, что к настоящему моменту эти исследования не выявили каких-либо дефектов среды, исключающих возможность размещения объекта. Важно также, что исследования проводятся в рамках единой общей программы под руководством организации — научного руководителя работ, в качестве которого в 2020 г. определен ИБРАЭ РАН. В работах участвуют специалисты ведущих научных организаций России, среди которых: ИГЕМ РАН, Геофизический центр РАН, ИФХЭ РАН, СПбО ИГЭ РАН, МГУ им. М. В. Ломоносова, НИТУ «МИСиС», Сколковский институт науки и технологий, РХТУ им. Д. И. Менделеева и др.

Среди документов, регламентирующих их работу, необходимо отметить следующие.

- «Стратегию создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов» [5], в которой четко определено, что создается ПИЛ, а решение по ПГЗРО будет принято по результатам проделанных исследований позже.
- «Комплексную программу исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край)» [30] [а] как документ, который определяет основные направления всех видов исследований (мониторинг, натурные, лабораторные и численные исследования, отработка технологий), в том числе в ПИЛ, необходимых для получения необходимых аргументов для обоснования безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО.
- «Технические требования и план-график реализации первоочередных мероприятий «Комплексной программы...» [b], ставшие основой для подготовки детальных технических заданий на соответствующие работы. По этим мероприятиям организовано финансирование и получены новые практические результаты, а круг специалистов, активно участвующих в научных работах, кратко увеличился.
- Приказ Госкорпорации «Росатом» [с], в соответствии с которым ИБРАЭ РАН определен Научным руководителем работ по проекту создания ПГЗРО.

- Предложения по облику основных экспериментов в ПИЛ [31] [d]. Документ включает описание требований к необходимым исследованиям, сопровождающим горнопроходческие работы, а также к выработкам, оборудованию, материалам и т. п. для выполнения комплексов термомеханических, геомеханических, гидрогеологических, микробиологических и геохимических экспериментов для оценки свойств материалов инженерных барьеров и вмещающей породы, а также их взаимодействий.

В гл. 5 представлена детальная характеристика участка Енисейский. Это широчайший набор данных, в подавляющем большинстве своем имплантированных в современные программные оболочки, позволяющие их активно использовать. Так, примеры моделирования нарушений горного массива и динамики подземных вод приведены в нескольких вариантах, соответствующих различным методическим подходам. В этой же главе приведен перечень исследований в пределах площадки, выполненных в период с 2009 г. по настоящее время и ориентированных на характеризацию геологических особенностей, событий и процессов, влияющих на безопасность объекта захоронения и на конкретизацию модели горного массива. Следует подчеркнуть, что гл. 5 не содержит ни одного восхищенного впечатления или негативного утверждения, а только объективную информацию о выбранном участке. Это принципиально, поскольку важна не одна отдельная характеристика (хорошая или удовлетворительная), а широкая совокупность свойств геологического участка, определяющих его приемлемость для размещения ПГЗРО. В этой связи разработанные модели систем трещин и потоков подземных вод можно сравнить с аналогичными моделями зарубежных специалистов, приведенных в гл. 2, и увидеть, что они весьма сходны.

В гл. 6 результаты исследований и изученность участка Енисейский на сегодняшний день рассматриваются через призму описанной выше методологии обоснования долговременной безопасности. В основе методологии — систематическое рассмотрение особенностей, событий и процессов (ОСП), которое позволяет не только не упустить из вида важные для изучения факторы [13], но и обосновать полноту учета их влияния в разрезе анализа неопределенностей в исходных данных. Глава фокусируется на рассмотрении и анализе потенциальной значимости для безопасности ПГЗРО основных геологических факторов, которые могут быть отнесены к двум группам ОСП: внешние воздействия и факторы, связанные с вмещающей средой.

Глава 7, в свою очередь, освещает приоритетные направления исследований, направленных на устранение продемонстрированных в гл. 6 неопределенностей. Подобная цикличность чрезвычайно характерна для рассматриваемой тематики. Современная система взглядов на пригодность горного массива уже в ближайшие годы получит значительное расширение вследствие поступления нового объема данных, полученных при проходке горных выработок подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). В последующем к ним добавятся результаты экспериментов в ПИЛ. Потом наступит настоящий момент истины: на основе всей совокупности необходимо будет решить, следует ли создавать на этой площадке ПГЗРО для отходов от переработки ОЯТ или есть серьезные противопоказания и объект будет использоваться для научных целей или для захоронения менее опасных отходов.

Литература

1. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: № 190-ФЗ: [Федеральный закон от 11.07.2011]: [в ред. от 02.07.2013 № 188-ФЗ, от 08.12.2020 № 429-ФЗ, от 21.12.2021 № 421-ФЗ]. — М.: Официальный интернет-портал правовой информации, 2021.
2. 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 // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1 (6). — С. 8–24.
3. Практика и задачи научного обеспечения работ по ядерному наследию / Л. А. Большов, И. И. Линге, А. А. Саркисов, С. С. Уткин // Атомная энергия. — 2016. — Т. 120. — № 4. — С. 201–208.
4. Об определении национального оператора по обращению с радиоактивными отходами: [Распоряжение Правительства Российской Федерации № 384-р от 20.03.2012]. — Научно-технический центр правовой информации «Система» Федеральной службы охраны Российской Федерации, 2012.
5. Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО / Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 2(3). — С. 114–120.
6. Waste isolation pilot plant (WIPP) by the numbers. — The U.S. Department of Energy. Office of Environmental Management, 2022. — URL: <https://www.energy.gov/em/articles/waste-isolation-pilot-plant-wipp-numbers>.
7. NRW: National Radioactive Waste Repository. — Public Limited Company for Radioactive Waste Management (PURAM), 2019. — URL: https://rhk.hu/storage/340/RHFT_angol.pdf
8. Park J. B. Experience from siting and design of the Wolsong low-and intermediate-level radioactive waste disposal center in Korea / J. B. Park, K.-K. Lee, E. Y. Lee // Proceedings of the Korean radioactive waste society conference (autumn 2011). — Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea: Korean radioactive waste society, 2011. — Vol. Volume 9(2). — P. 545–547.
9. Case study: the disposal facility in Loviisa and Olkiluoto (Finland) // Underground disposal concepts for small inventories of intermediate and high level radioactive waste: IAEA TECDOC series. — Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2020. — IAEA-TECDOC-1934. — P. 29–37.
10. Alexander W. R. Natural analogues: studies of geological processes relevant to radioactive waste disposal in deep geological repositories / W. R. Alexander, H. M. Reijonen, I. G. McKinley // Swiss Journal of Geosciences. — 2015. — Vol. 108. — № 1. — P. 75–100. — DOI: 10.1007/s00015-015-0187-y
11. The disposal of radioactive waste on land: Report of the Committee on waste disposal of the Division of Earth sciences: Publication 519. — Washington, D.C., USA: National Academy of Sciences — National Research Council, 1957. — 142 p. — DOI: 10.17226/10294
12. Geological disposal facilities for radioactive waste: IAEA Safety Standards Series: Specific Safety Guide No. SSG-14. — Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2011.
13. International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0: Radioactive Waste Management and Decommissioning: NEA/RWM/R(2019)1. — P., France: OECD NEA, 2019.
14. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние: Препринт ИБРАЭ: № IBRAE-2019-03 / И. Л. Абалкина, Л. А. Большов, И. В. Капырин и др. — 2019. — 40 с.
15. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности : Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-055-14 : [утв. приказом Ростехнадзора № 379 от 22.08.2014] : [в ред. приказов Ростехнадзора № 582 от 22.11.2018, № 163 от 18.05.2022]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2022.
16. The nature and purpose of the post-closure safety cases for geological repositories: Radioactive Waste Management: NEA/RWM/R(2013)1. — OECD NEA, 2013. — 55 p.
17. Захоронение радиоактивных отходов: Серия норм безопасности МАГАТЭ: Конкретные требования безопасности No. SSR-5. — Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2011.

18. Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste: Radioactive Waste Management: NEA No. 6923. — P., France: OECD NEA, 2012.
19. The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste: IAEA Safety Standards Series: Specific Safety Guide No. SSG-23. — Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2012.
20. Phenomena Identification and Ranking Table: R&D Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools: Phenomena Identification and Ranking Table: R&D Priorities for Loss-of-Cooling and Loss-of-Coolant Accidents in Spent Nuclear Fuel Pools: NEA No. 7443. — P., France: OECD NEA, 2018.
21. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии : Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии № НП-064-17: [утв. приказом Ростехнадзора № 217 от 23.06.2017]. — М.: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», 2017.
22. International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC): outcomes of the INTESC project: Radioactive Waste Management: NEA No. 6951. — P., France: OECD NEA, 2009.
23. Geological repository systems for safe disposal of spent nuclear fuels and radioactive waste / eds. M. Apted, J. Ahn. — Second edition. — Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2017. — 778 p.
24. Chapman N. The disposal of radioactive wastes underground / N. Chapman, A. Hooper // Proceedings of the Geologists' Association. — 2012. — Vol. 123. — № 1. — P. 46–63. — DOI: 10.1016/j.pgeola.2011.10.001
25. Considering timescales in the post-closure safety of geological disposal of radioactive waste: Radioactive Waste Management: NEA No. 6424. — P., France: OECD NEA, 2009. — DOI: 10.1787/9789264060593-en
26. The role of the analysis of the biosphere and human behaviour in integrated performance assessments: Radioactive Waste Management Committee. Advisory Group on the Assessment of the Performance of Waste Disposal Systems (PAAG): NEA/RWM/PAAG(99)5. — P., France: OECD, 1999.
27. European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste case study: uncertainties and their management / J. Vigfusson, J. Maudoux, P. Raimbault, K.-J. Röhlig. — Switzerland: HSK, Belgium: FANC — AFCN, France: ASN, Germany: GRS, UK: Environment Agency, 2007. — URL: <https://afcn.be/fr/system/files/case-study-european-pilot-group.pdf>
28. Safety analysis for SFR Long-term safety. Main report for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. Updated 2017-04: Technical Report TR-14-01. — Stockholm, Sweden: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2017.
29. Концепция федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года»: [утв. распоряжением Правительства Российской Федерации № 484-р от 19.04.2007]. — Научно-технический центр правовой информации «Система» Федеральной службы охраны Российской Федерации, 2007.
30. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов / А. Н. Дорофеев, Л. А. Большов, И. И. Линге и др. // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1 (1). — С. 34–43.
31. Подземная исследовательская лаборатория в Нижнеканском массиве: эволюционная проработка облика / А. А. Абрамов, Л. А. Большов, А. Н. Дорофеев и др. // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 1 (10). — С. 9–21. — DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-9-21.

Архивные документы и материалы

- a. Комплексная программа исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров: Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край): [утв. директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО ГК «Росатом» О. В. Крюковым 09.01.2019]. — М.: ФГУП «НО РАО», 2019.
- b. Технические требования и план-график (2019—2021 гг.) реализации первоочередных мероприятий «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров (Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО в Нижнеканском массиве (Красноярский край))» и подготовка исходных данных для разработки проекта развития ПИЛ в части создания исследовательских выработок»: [утв. Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» 31.07.2019]. — М.: ФГУП «НО РАО»; ИБРАЭ РАН, 2019.
- c. Об утверждении Положения о научном руководителе работ по проекту создания пункта глубинного захоронения твердых радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве (Красноярский край) и определении научного руководителя : приказ Госкорпорации «Росатом» № 1161-п от 05.10.2020. — М.: ГК «Росатом», 2020.
- d. Предложения по облику подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ) с привязкой к объемам необходимых исследований для обоснования долговременной безопасности ПГЗРО: приложение к исх. № 319-07.01/6148 от 30.09.2019: [разработаны в соответствии с решением совещания от 22.07.2019 по реализации мероприятия «Строительство объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (ПГЗРО) 1-го и 2-го классов» (Красноярский край, Нижне-Канский массив), п. 2 протокола от 22.07.2019 № 1-2/26-Пр]. — М.: ФГУП «НО РАО», 2019.

Принятые сокращения

АМТЗ	— аудиомagnetотеллурическое зондирование
АПЛ	— атомная подводная лодка
АЭС	— атомная электростанция
БД	— база данных
БС	— Балтийская система высот
В, Е	— восток, англ.: east
ВАО	— высокоактивные отходы
ВОЗ	— вероятные очаги землетрясений
ВЭ	— вывод из эксплуатации
ВЭЗ	— вертикальное электрическое зондирование
ГГК	— гамма-гамма-каротаж
ГГК-П	— плотностной гамма-гамма-каротаж
ГИС	— геофизические исследования скважин
ГНСС	— глобальная спутниковая система навигации
ГРЭ	— геолого-разведочная экспедиция
ГСО	— гидрогеологическая складчатая область
ДОН	— декларация о намерениях
ДСР	— детальное сейсмическое районирование
ЕГС РАО	— Единая государственная система обращения с радиоактивными отходами
ЕРН	— естественные радионуклиды
ЖРО	— жидкие радиоактивные отходы
З, W	— запад, англ.: west
ЗПТ	— зона повышенной трещиноватости
ИББ	— инженерные барьеры безопасности
КС	— каротаж сопротивления
МАЭ	— метод аналитических элементов
МОВ	— метод отраженных волн
МОГТ	— метод общей глубинной точки
МПВ	— метод преломленных волн
МПП	— метод переходных процессов
МРЗ	— максимальные расчетные землетрясения
МТЗ	— магнитотеллурическое зондирование
НАО	— низкоактивные отходы
НДС	— напряженно-деформированное состояние
НИОКР	— научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НТС	— научно-технический совет
ОБИН	— обоснование инвестиций
ОДБ	— обоснование долговременной безопасности
ОСП	— особенности, события, процессы, англ: Features, events and processes
ОСР	— общее сейсмическое районирование

ОФР	— опытно-фильтрационных работы
ОЯТ	— отработавшее ядерное топливо
ПВ	— поверхности выравнивания
ПГЗРО	— пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
ПДК	— предельно допустимая концентрация
ПЗ	— проектные землетрясения
ПИЛ	— подземная исследовательская лаборатория
ПС	— каротаж методом самопроизвольной поляризации
РАО	— радиоактивные отходы
РЭМП	— радиоэлектромагнитное профилирование
С, N	— север, англ.: north
САО	— среднеактивные отходы
СДЗК	— современные движения земной коры
СЗЗ	— санитарно-защитная зона
СКО	— среднеквадратичное отклонение, англ.: Root mean square
СМР	— сейсмическое микрорайонирование
ТРО	— твердые радиоактивные отходы
ТТГ	— тоналит-трондъемит-гранодиоритовые (гнейсы)
ФЦП ЯРБ	— Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ-1) и «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 — 2020 годы и на период до 2035 года» (ФЦП ЯРБ-2)
Ю, S	— юг, англ.: south
ЯТЦ	— ядерный топливный цикл
DFN	— модель дискретной сети трещин, англ.: Discrete fracture network
ЕРМ	— модель эквивалентной пористой среды, англ.: Equivalent porous media
FER	— особенности, события, процессы, англ.: Features, events and processes
FZ	— зоны трещиноватости, англ.: Fracture zones
FZC	— зона трещиноватости при наличии разрушенного ядра, англ.: Fault zone conductor
HCZ	— гидравлически проницаемая зона, англ.: Hydraulically conductive zones
LREE	— легкие редкоземельные элементы, англ.: Light rare earth elements
PIRT	— таблица идентификации и ранжирования событий, англ.: Phenomena identification and ranking table
RMS	— среднеквадратичное отклонение, англ.: root mean square
RQD	— показатель качества пород, англ.: Rock quality designation
TR	— редкоземельные элементы, лат.: <i>Terrae rarae</i>

Авторский коллектив

Госкорпорация «Росатом»

А. А. Абрамов; А. Н. Дорофеев, кандидат технических наук (Введение, глава 1, Заключение).

ИБРАЭ РАН

В. С. Гупало, доктор технических наук, профессор (главы 4, 7); К. С. Казаков, кандидат технических наук (глава 7); И. И. Линге, доктор технических наук (Введение, глава 1, Заключение); О. А. Морозов, кандидат геолого-минералогических наук (глава 5); Г. Д. Неуважаев, кандидат технических наук (глава 5); Д. А. Озерский, кандидат технических наук (глава 5); А. В. Расторгуев, кандидат технических наук (глава 5); Е. А. Савельева, кандидат физико-математических наук (глава 6); В. С. Свительман, кандидат физико-математических наук (глава 5, Заключение); С. С. Уткин, доктор технических наук (Введение, глава 1, Заключение).

АО «ВНИПИпромтехнологии»

Т. А. Гупало, доктор технических наук, профессор, академик Российской академии естественных наук, действительный член Академии горных наук; Е. Н. Камнев, доктор геолого-минералогических наук, профессор, действительный член Российской академии естественных наук, действительный член Академии горных наук, заслуженный геолог Российской Федерации (главы 3, 4).

АО «Красноярская горно-геологическая компания»

К. А. Заблоцкий; А. Ю. Озерский, кандидат геолого-минералогических наук, заслуженный геолог РФ (главы 3, 5, Заключение).

ИГЕМ РАН

Б. Т. Кочкин, доктор геолого-минералогических наук (главы 2— 4, 6, Заключение); В. А. Петров, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент Российской академии наук (глава 3).

Геофизический центр РАН

В. Н. Морозов, доктор технических наук, профессор; В. Н. Татарinov, доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук (главы 3, 5).

СПбО ИГЭ РАН

А. М. Никуленков, кандидат геолого-минералогических наук; В. Г. Румынин, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент Российской академии наук; Л. Н. Синдаловский, кандидат геолого-минералогических наук; А. А. Шварц, кандидат геолого-минералогических наук (глава 5).

ФГУП «НО РАО»

В. П. Бейгул, кандидат технических наук; С. Л. Спешиллов, доктор геолого-минералогических наук (глава 4).

Научное издание

**Захоронение РАО на участке Енисейский
в Красноярском крае
История выбора площадки
и современное состояние исследований**

Научные редакторы:

В. Ю. Коновалов,

кандидат физико-математических наук *В. С. Свительман*

Корректор *Л. Ю. Лупач*

Дизайн и верстка *Н. Ю. Шапигузова*

Редактор издательства *Е. Ю. Федорова*

Корректоры издательства: *А. Ю. Обод, С. О. Розанова*

Художник *П. Э. Палей*

Фото на переплете: *Д. А. Озерский*

Формат 70×100/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Гарнитура IBM Plex Sans.

Усл. печ. л. 29,9. Заказ № xxxxx.

Тираж 300 экз.

ФГБУ «Издательство «Наука»

121099, Москва, Шубинский пер., д. 6, стр. 1

E-mail: info@naukapublishers.ru

<https://naukapublishers.ru>

<https://naukabooks.ru>

Отпечатано в типографии ООО «Буки Веди»

117452, г. Москва, вн.тер.г. муниципальный округ Зюзино,

пр-кт Балаклавский, д. 28Б, стр. 1

Тел.: +7 (495) 926-63-96, www.bukivedi.com, info@bukivedi.com