

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)

Кафедра гидрогеологии

Рубан Анастасия Владимировна

Исследование и прогноз миграции радионуклидов при захоронении РАО на
участке «Енисейский» Нижнеканского гранитогнейсового массива

Магистерская диссертация
по направлению 020300 «Геология»

Научный руководитель:
д. г.-м. н., профессор В.Г. Румынин
Заведующий кафедрой:
к. г.-м. н., доцент П.К. Коносавский

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ РАЙОНА РАБОТ.....	8
1.1 Физико-географический очерк.....	8
1.1.1 Географическое положение и территориально-производственная структура	8
1.1.2 Рельеф	8
1.1.3 Климат	11
1.2 Геологическое строение.....	12
1.2.1 Стратиграфия	12
1.2.2 Магматизм	18
1.2.3 Тектоника	19
1.3 Гидрогеология и инженерная геология.....	23
1.3.1 Гидрогеологические условия.....	23
1.3.2 Инженерно-геологические условия	29
ГЛАВА 2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» И АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ.....	31
2.1 Виды и объемы работ.....	31
2.1.1 Буровые работы	31
2.1.2 Геофизические исследования в скважинах	33
2.1.3 Опробование керна скважин.....	33
2.2 Геологическое строение участка «Енисейский».....	35
2.3 Гидрогеологические условия	39
2.3.1 Описание гидрогеологического разреза.....	39
2.3.2 Общая характеристика гидрогеологических условий.....	44
2.3.3 Условия формирования подземных вод.....	46
2.4 Опытнo-фильтрaционные работы	47
2.4.1 Методика проведения ОФР	48
2.4.2 Анализ результатов опытнo-фильтрaционных работ.....	50

ГЛАВА 3. ИЗУЧЕНИЕ ТРЕЩИННОЙ СТРУКТУРЫ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАССИВА	55
3.1 Обзор классификаций нарушений сплошности среды	55
3.1.1 Инженерные классификации нарушений сплошности	55
3.1.2 Геологические классификации трещин	56
3.2 Методы и результаты исследования трещинной структуры гнейсового массива участка «Енисейский»	59
3.2.1 Характеристика фактического материала и подходы к его систематизации	59
3.2.1.1 Геолого-структурные элементы, характеризующие нарушения сплошности массива и создание базы данных (БД)	59
3.2.1.2 Дополнительное обследование кернового материала и отбор породных проб	63
3.2.2 Оценка корреляционных связей геофизических параметров и физических свойств пород с геолого-структурными элементами массива	64
3.2.2.1 Исследования в скважинах	64
3.2.2.2. Площадные геофизические исследования	69
3.2.3 Локализация, статистика и пространственная корреляция зон дезинтеграции	71
3.2.3.1 Зоны брекчирования	71
3.2.3.2 Связь зон трещиноватости с дайками	72
3.2.3.3 Статистические и корреляционные характеристики выделенных структурно-геологических элементов	74
3.3. Структурные порядки зон дезинтеграции массива в пределах участка «Енисейский»	81
3.3. Изучение сорбции радионуклидов на породах.....	83
3.3.1 Общие представления о радиоактивных отходах и системах их захоронения	83
3.3.1.1 Конструктивные особенности ПГЗРО Енисейский	83
3.3.1.2 Данные о составе ВАО и их опасности	84
3.3.2 Методика проведения сорбционных испытаний	85
3.3.3. Исследование среды трещинного заполнителя	88
3.3.4 Результаты сорбционных испытаний	90

3.3.4.1 Результаты экспериментов по сорбционному взаимодействию растворенных радиоактивных компонентов и измельченных образцов материала-заполнителя трещинного пространства вмещающих пород участка «Енисейский».....	90
3.3.4.2 Результаты экспериментов по сорбционному взаимодействию растворенных радиоактивных компонентов и поверхностей трещин на монолитных фрагментах пород участка «Енисейский».....	93
ГЛАВА 4. МИГРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ.....	96
4.1 Схематизация гидрогеологических условий и расчет средней скорости фильтрации.....	96
4.2. Миграция радионуклидов в трещиноватой среде, включающей выдержанные по протяженности зоны тектонической (сдвиговой) деформации	99
4.2.1. Триpletная модель	99
4.2.2. Расчет миграции радионуклидов на участке «Енисейский»	104
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	114

ВВЕДЕНИЕ

Опасность, связанная с захоронением РАО, обусловлена возможностью попадания различного количества радионуклидов в среду обитания человека, в связи с чем, исследование и прогноз радионуклидов в геосфере является одним из ключевых направлений при проектировании пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).

В настоящей работе представлены результаты исследований, целью которых являлось полевое и лабораторное изучение параметров трещиноватых гнейсов, необходимых для прогноза миграции радионуклидов в Нижне-Канском массиве после закрытия ПГЗРО.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) анализ данных геологического бурения, геофизических исследований в скважинах и на поверхности, а также опытно-фильтрационного опробования массива;
- 2) выделение и картирование в пределах Нижне-Канского массива гранитогнейсовых пород (участок «Енисейский») различных зон тектонической дезинтеграции, определение их структурных порядков, физических параметров и статистических характеристик (включая вероятностные);
- 3) анализ данных изучения минерального состава образцов горных пород из зон повышенной трещиноватости;
- 4) изучение материала-заполнителя трещинного пространства и его влияния на сорбционные процессы по результатам опытов с образцами трещиноватых пород, отобранных из кернового материала скважин на участке «Енисейский»;
- 5) оценка влияния сорбции в трещиноватой среде на скорость миграции радионуклидов, переносимых подземными водами;
- 6) определение времени миграции радионуклидов от ПГЗРО до области разгрузки – р. Енисей.

Основной объем первичной информации представлен данными геологического описания разреза и фотодокументации керна, полученного в процессе бурения 14 геологических и гидрогеологических скважин на участке «Енисейский» на поисковой и оценочной стадиях. Выполнено повторное обследование керна в кернохранилище в г. Железногорск и отобраны характерные образцы пород для изучения продуктов выветривания на поверхности трещин и трещинного заполнителя.

Личный вклад автора заключается в анализе фондовых и опубликованных материалов, данных бурения и геофизического каротажа скважин, лабораторных сорбционных экспериментов с радионуклидами. Более конкретно: основываясь на анализе буровых колонок скважин, автором систематизированы трещины и зоны тектонической дезинтеграции (трещиноватости, расланцевания и дробления) гнейсового массива и установлены структурные порядки этих зон, дана количественная характеристика зон дезинтеграции (геометрические размеры, пространственная ориентация и проницаемость), построены статистические гистограммы, выполнена оцифровка кривых ГИС (скважинного каротажа), выполнен корреляционный анализ для установления связи между данными бурения и геофизическими параметрами. В период командировки выполнено повторное обследование керна в кернохранилище в г. Железногорск и отобраны характерные образцы пород для изучения продуктов выветривания на поверхности трещин и трещинного заполнителя. Наряду с этим, проведены расчеты времени миграции радионуклидов при различных параметрах среды.

Впервые при исследовании трещиноватости массива производится обоснованное разделение интервалов на 2 группы – с техногенной («искусственной») и природной трещиноватостью.

Практическая ценность работы заключается в оценке и обосновании долговременной безопасности проектируемого ПГЗРО на участке «Енисейский».

Для достижения поставленных задач потребовалось использование определенных программных комплексов для представления разрезов скважин с дискретным характером нарушения их сплошности (Grapfer). Также для выполнения отдельных экспериментальных этапов работы привлекалась информация, полученная в нескольких специализированных лабораториях.

Магистерскую работу можно условно разделить на две части: (1) подготовительно-реферативную, связанную со сбором и изучением фондового материала, а также систематизацию полевых данных, и (2) аналитическую, включающую изучение трещинной структуры массива и сорбционных свойств среды, а также решение прикладных задач миграции радионуклидов в гранитогнейсовом массиве.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю профессору В.Г. Румынину за помощь при написании диссертационной работы, К.Б. Розову и А.М. Никуленкову (Институт Геоэкологии РАН), помогавшим автору в обработке полевых данных и результатов лабораторных экспериментов, выполненных в НИТИ им. А.П. Александрова. За организационную поддержку работы на кернохранилище автор выражает признательность А.И. Лозовому (Железногорский

филиал ФГУП «НО РАО»), И.В. Шрамко (ФГУП «ГХК») и А.Ю. Озерскому (ОАО «Красноярскгеология») за консультативную помощь.

Глава 1. ИЗУЧЕННОСТЬ РАЙОНА РАБОТ

1.1 Физико-географический очерк

1.1.1 Географическое положение и территориально-производственная структура

Площадь участка «Енисейский» расположена в Сибирском федеральном округе Российской Федерации, в Красноярском крае, на правом берегу Енисея, в пределах Закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Железногорска (рис 1).

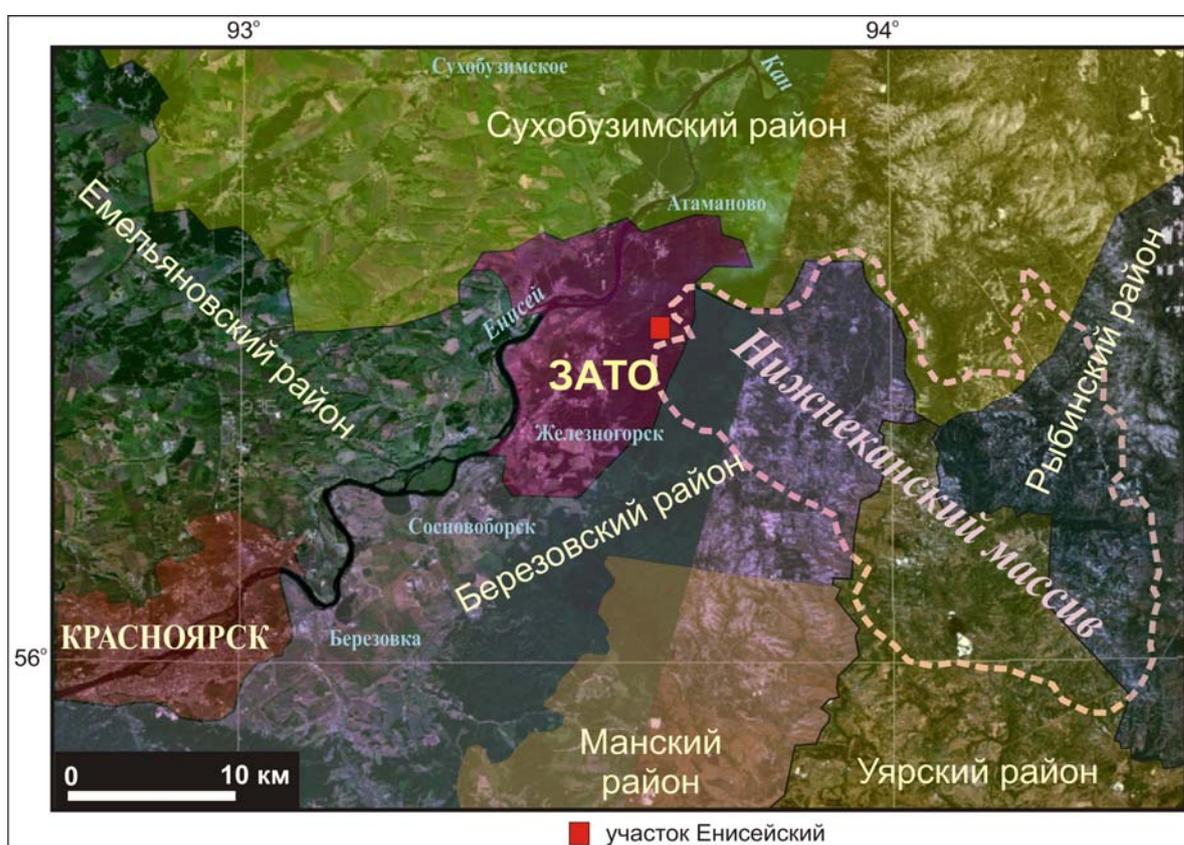


Рисунок 1. Схема расположения участка работ

1.1.2 Рельеф

В физико-географическом отношении район работ расположен в пределах юго-западной оконечности Восточно-Сибирского плоскогорья, ограниченного с запада долиной р.Енисей. Восточно-Сибирское плоскогорье в пределах исследуемой площади представлено южной частью Енисейского кряжа. Изучаемый участок принадлежит к Атамановскому хребту южной части Енисейского кряжа, представляющему собой его крайний юго-западный горный отрог (рис. 2). Атамановский хребет, протягиваясь в ССЗ

направлении по правобережью Енисея от станции Балай до с. Атаманово, служит своеобразным «мостом», соединяющим горные сооружения Восточного Саяна с южной частью Енисейского кряжа. У с. Атаманова хребет на незначительное расстояние (8-10 км) переходит на левобережье Енисея.

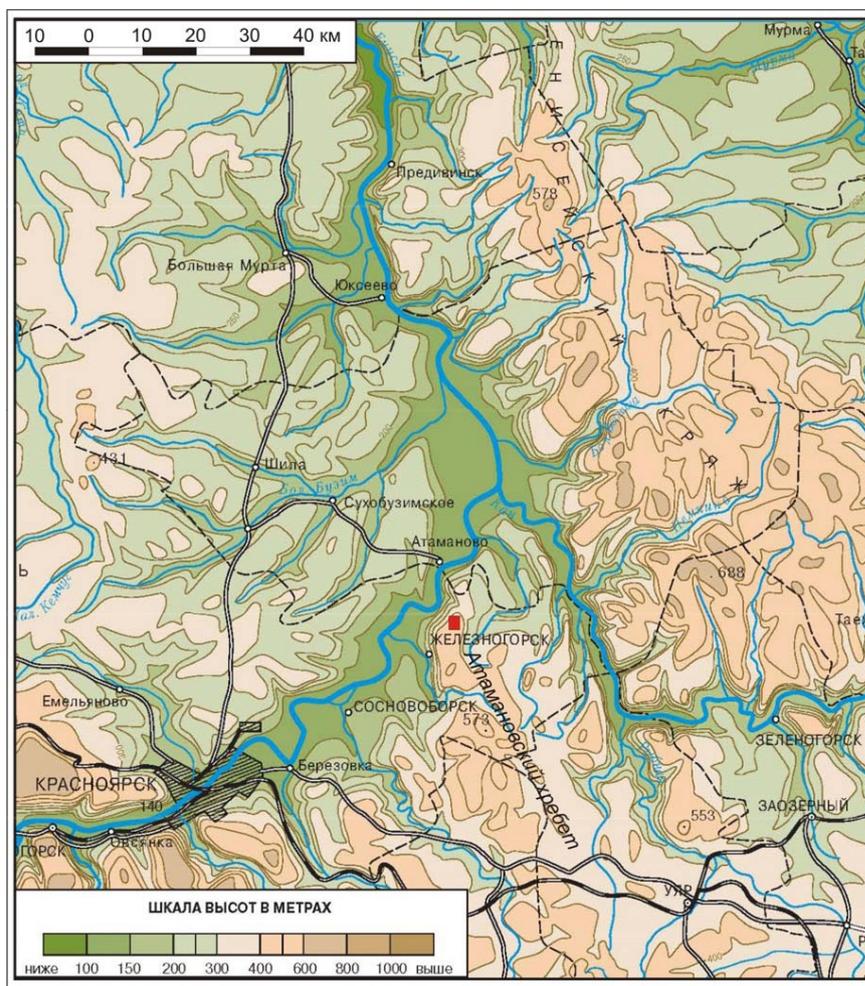


Рисунок 2. Обзорная гипсометрическая схема

В пределах хребта развит, в основном, низко- и среднегорный рельеф с абсолютными отметками от 140 до 573 м. Гребни отрогов хребта широкие, округлые. Наиболее высокие водораздельные пространства выположены, так как являются реликтовыми фрагментами древнего пенеплена. Здесь имеется довольно густая речная сеть. Глубина вреза речных долин варьирует в пределах 180-220 м. Долины чаще всего имеют ящикообразную форму, глубокие, с относительно крутыми (10-20°, иногда до 40°) склонами и заболоченным дном.

Реки имеют большое количество притоков, длина и количество которых увеличивается к верховьям. На высоте 400-450 м часто встречаются поверхности выравнивания.

С запада к Атамановскому хребту примыкает долина Енисея. В равнинной части на участке от г. Красноярска до с. Атаманово долина широкая (до 20 км). В строении долины выделяется до 6 надпойменных аккумулятивных террас, располагающихся на относительных высотах от уреза воды в реке от 5-9 до 80 м. Русло Енисея имеет многочисленные протоки, которые образуют острова. В районе с. Атаманово долина, где ее пересекает хребет, долина сужается до размеров поймы. Надпойменные террасы здесь отсутствуют, река имеет отвесные берега.

Речная сеть исследуемой территории принадлежит к бассейну р. Енисей, которая в свою очередь является региональным базисом дренирования для всей исследуемой территории.

Ширина Енисея в пределах исследуемой территории изменяется от 300 до 1200 м, глубина колеблется от 2,7 до 8,0 м. Скорость течения составляет 1,4- 1,8 м/с. Площадь водосбора реки в месте производства работ составляет около 300 тыс. км². Выше Красноярска река зарегулирована плотиной Красноярской ГЭС. Перекрытие реки было осуществлено в 1967 г. НПУ (243 м БС) в водохранилище достигнуто в августе 1970 г. С этого момента гидрологический режим водохранилища находится в периоде нормальной эксплуатации. Естественный гидрологический режим Енисея в результате создания плотины совершенно изменен и всецело зависит от режима работы гидроэлектростанции. Зимой температура воды составляет 0,5-2,0 °С, летом – 8-14°С.

В 24 км к северу от северной границы ЗАТО г. Железногорска в Енисей справа впадает один из крупных правых притоков Енисея – река Кан. Ширина реки в приустьевой части ее колеблется от 110 до 300 м, глубина воды достигает 2-4 м, средняя скорость течения составляет 2,5-3,0 м/с. Площадь водосбора Кана – 36800 км², средняя высота водосбора – 602 м БС, среднемноголетний расход на устье (с. Подпорог) – 290,7 м³/с, наибольший – 1780 м³/с, модуль подземного стока – 7,74 л•с/км². Уровни воды в течение года колеблются от 120,54 до 124,08 м БС. Сток Кана находится вне зоны влияния подземного сооружения.

Наиболее крупными правыми притоками Енисея в пределах исследуемой территории являются небольшие речки Б. Тель и Шумиха.

Площадь водосбора Большой Тели 367 км², средняя высота водосбора – 262 м БС, среднемноголетний расход – 1,96 м³/с, модуль подземного стока – 5,34 л•с/км², что соответствует годовому слою стока 168 мм [12]. Вершина Большой Тели и ее левые притоки дренируют часть изучаемого участка.

Речка Шумиха имеет протяженность около 8 км и непосредственно дренирует наиболее значительную часть изучаемого участка. В гидрологическом отношении эта

речка практически не изучена. Площадь водосбора около 15,5 км². Расчетная величина среднегодового расхода приближено составляет 0,04 м³/с.

Кроме речек в Енисей с правого берега впадают несколько ручьев (Байкал, Тимофеев, Безымянный, Студеный и др.), дренирующих площадь исследуемого участка. В гидрологическом отношении эти водотоки не изучены.

Питание перечисленных малых рек осуществляется в основном талыми снеговыми водами, летом и осенью - дождевыми водами. Доля подземного стока в их питании обычно не превышает 10%. Половодье приходится на конец весны. В начале-середине ноября реки покрываются льдом.

1.1.3 Климат

Краткая характеристика климатических условий приводится по данным многолетних наблюдений Средне-Сибирского управления гидрометеослужбы на метеостанциях Сухобузимское и Красноярск – опытное поле.

Территория исследований находится в зоне умеренных широт и характеризуется резко континентальным климатом. Это выражается в значительных амплитудах колебания температуры воздуха, как в течение суток, так и в течение года (табл. 1).

Таблица 1. Климатические характеристики района работ

Показатели	Значения
Суммарная (годовая) солнечная радиация	95 ккал/см ²
Атмосферное давление на уровне моря (в январе)	1028-1030 мб
Атмосферное давление на уровне моря (в июле)	1007-1008 мб
Температура воздуха у земной поверхности среднегодовая	-0,5... -3,0°C
Температура воздуха у земной поверхности среднемесячная (в январе)	-20...-22°C
Температура воздуха у земной поверхности среднемесячная (в июле)	+18...+20°C
Количество осадков за год	540-560 мм
Количество осадков за зимний период года (ноябрь-март)	130-160 мм
Количество осадков за весну, лето и осень (апрель-октябрь)	390-400 мм
Испаряемость (годовая величина)	480-500 мм
Высота снежного покрова (в марте)	60-80 см
Относительная влажность воздуха (среднегодовая)	74%
Влажность воздуха: - минимальная (май) - максимальная (август-сентябрь)	61% 81%

Климат территории резко континентальный, с продолжительной суровой зимой (в среднем $-16...20^{\circ}\text{C}$) и коротким жарким летом (в среднем $+18...+24^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая температура колеблется в пределах от $-0,6$ до $-3,2^{\circ}\text{C}$.

Среднегодовое количество осадков составляет около 500 мм, их распределение по сезонам года очень неравномерно. Основная их масса (до 75- 80% годовой суммы), приходится на теплое время, особенно на июль и август. Зимой количество осадков относительно невелико, высота сформированного ими снежного покрова не превышает 50 см. Устойчивый покров устанавливается в начале ноября. Максимальной величины он достигает к концу февраля. Средняя дата разрушения устойчивого покрова приходится на начало апреля. Наибольшее испарение с поверхности повсеместно наблюдается в летнее время (июнь – июль) и достигает 75-86 мм в месяц.

Максимальное сезонное промерзание грунтов достигает 210-300 см (метеостанция «Сухобузимское»), минимальное – 67-94 см. Оттаивание грунтов начинается в апреле и заканчивается в конце июля. Средние скорости оттаивания составляют 1,04-3,0 см/сутки.

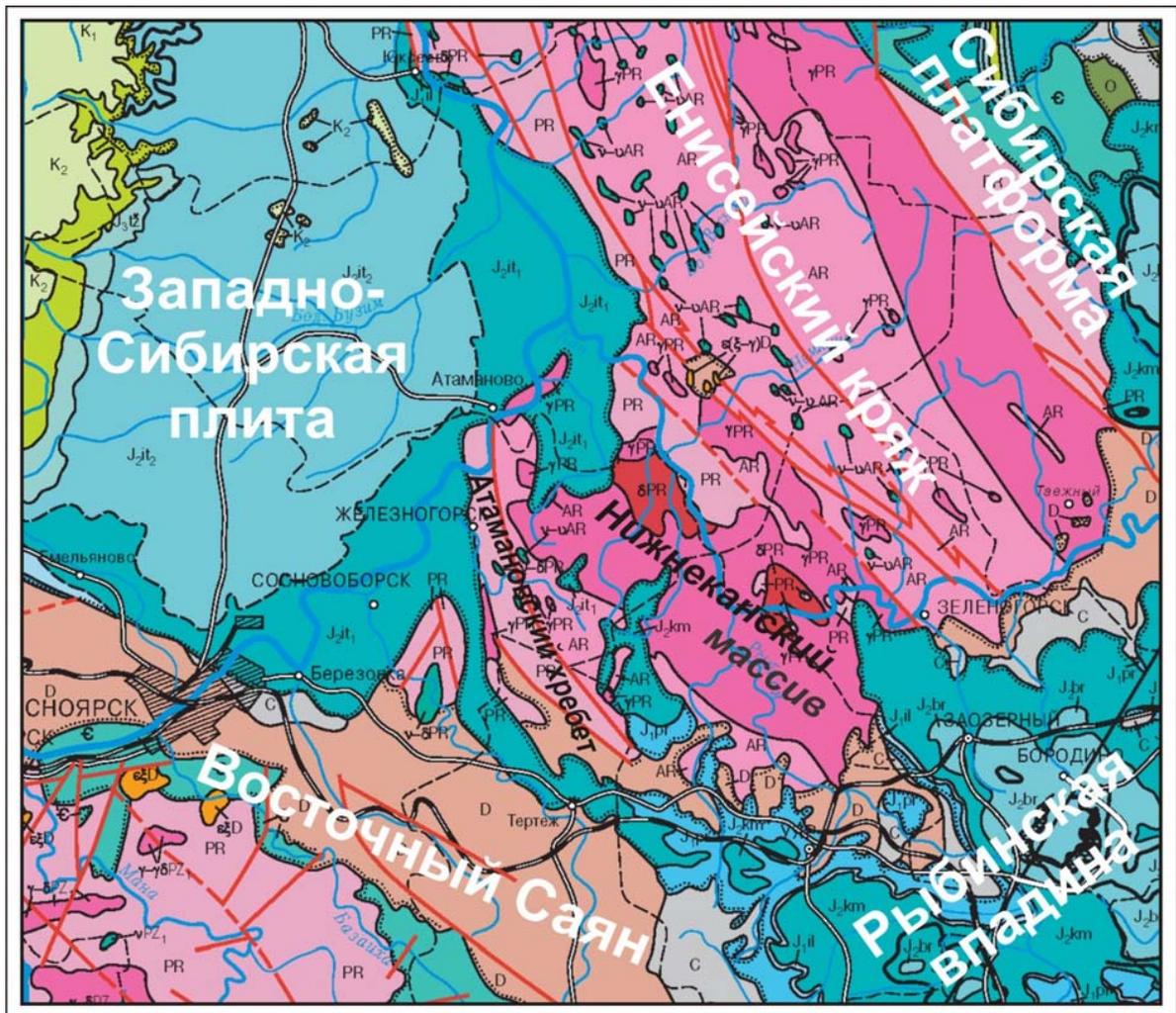
В течение всего года преобладают ветры западные и юго-западные, средняя скорость ветра составляет 3-5 м/с, максимальная – 17 м/с.

1.2 Геологическое строение

Район работ расположен в области сочленения двух крупнейших платформенных структур Азии – Сибирской платформы и эпигерцинской Западно-Сибирской плиты (рис. 3). Структурный шов между этими платформами проходит всего в 5-6 км западнее участка работ (рис. 4). Восточно-Сибирская платформа в пределах участка работ представлена своим юго-западным выступом складчатого фундамента – Южным (Ангаро-Канским) выступом Енисейского кряжа, консолидация которого произошла в Байкальскую эпоху.

1.2.1 Стратиграфия

В геологическом строении района работ принимают участие гнейсовые толщи канского и енисейского метаморфических комплексов, угленосные осадки юры и современные элювиально-делювиальные рыхлые отложения (Рис. 4).

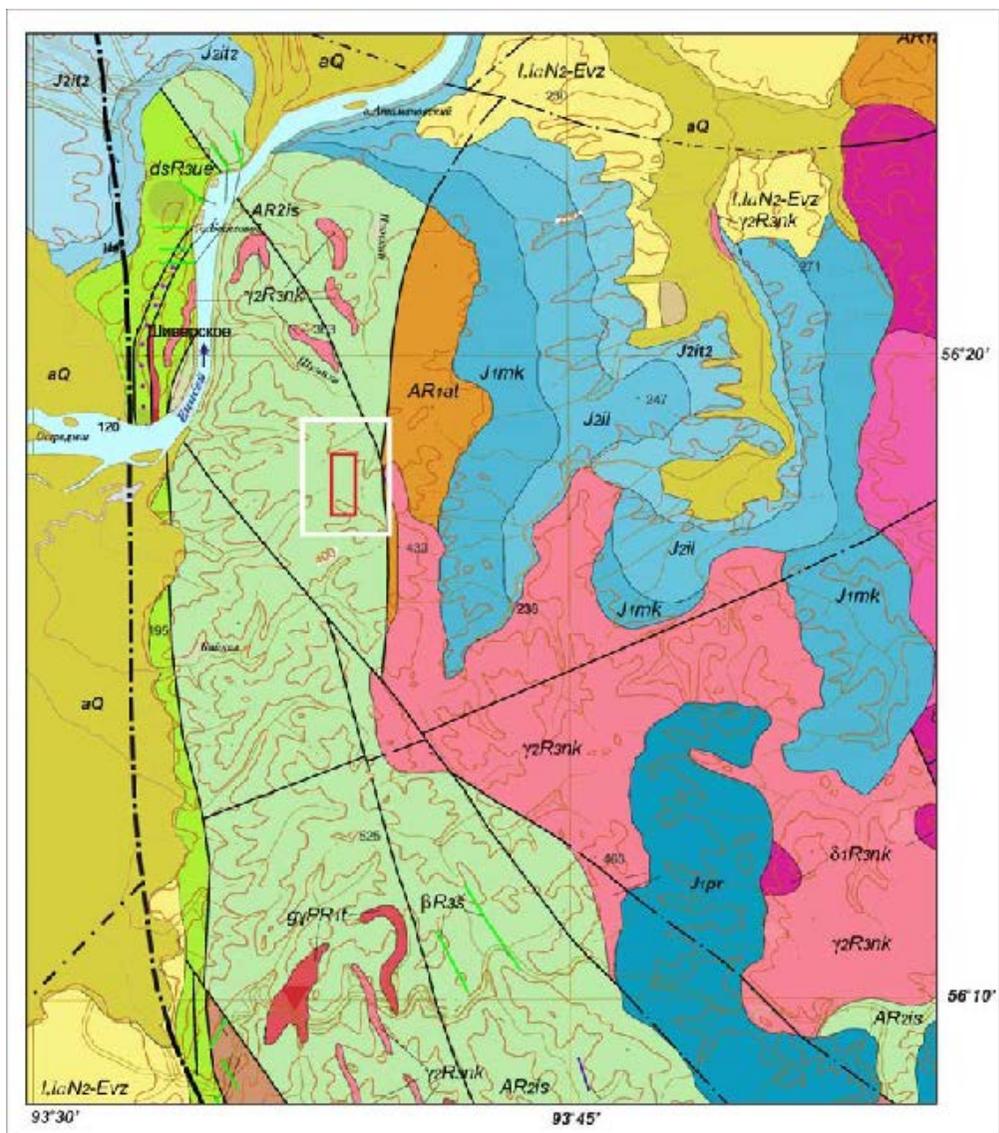


Условные обозначения

МЕЛОВАЯ СИСТЕМА	 K ₂	Верхний отдел. Кварцевые пески с каолином, галечники с прослоями и линзами глин, алевролитов и песчаников	 €	Кембрийская система. Известняки, доломиты, диабазы, туфы, сланцы, кварциты, песчаники	
	 K ₁	Нижний отдел. Переслаивающиеся пестроцветные каолиновые глины, пески, песчаники и галечники		 PR	Протерозой. Гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы, мраморизованные известняки, доломиты, сланцы, диабазы
	 J ₃ -K ₁	Юрская система. Верхний отдел — меловая система, нижний отдел — нерасчлененные образования. Пестроцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты, каолиновые глины			
ЮРСКАЯ СИСТЕМА	 J _{3t2}	Верхний отдел. Тяжинская свита. Пестроцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты с прослоями известняков	ИНТРУЗИВНЫЕ ПОРОДЫ		
	 J _{2t2}	Верхняя подсвита (бородинская J _{2br} свита). Серые песчаники, алевролиты, аргиллиты, бурые угли	 γ	Граниты (γ), гранодиориты (γδ), нерасчлененные образования от гранитов до сиенитов (γ-ξ), от гранитов до гранодиоритов (γ-υδ), от гранитов до диоритов (γ-δ)	
	 J _{2t1}	Нижняя подсвита (камалинская J _{2km} свита). Серые песчаники, алевролиты, аргиллиты, бурые угли	 δ	Диориты (δ), диорито-сиениты (δξ), нерасчлененные образования от диоритов до сиенитов (δ-ξ)	
	 J _{1il}	Иланская свита. Зеленоцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты	 v	Габбро (v), габбродиориты (vδ), долериты (vδ), нерасчлененные образования от габбро до диоритов (v-δ), от габбро до анортозитов (v-υ), от габбро до гипербазитов (v-σ)	
	 J _{1mk}	Макаровская (перясловская J _{1pr} свита). Серые и темные песчаники, алевролиты, аргиллиты, бурые и каменные угли	 σ	Гипербазиты	
	 C	Каменноугольная система. Песчаники, аргиллиты, алевролиты, пласты каменных углей, туфы, туффиты, известняки, конгломераты	 εγ	Щелочные граниты (εγ), щелочные сиениты (εξ), щелочные образования от сиенитов до гранитов (εξ-γ)	
	 D	Девонская система. Порфириты, ортофиры, туфы, песчаники, алевролиты, конгломераты	 a б	Выходы мощных пластов угля достоверные (a) и предполагаемые (б)	
 S	Силурийская система. Песчаники, алевролиты, мергели		Горельники		
 O	Ордовикская система. Песчаники, известняки, алевролиты, аргиллиты, туфы, туфо-песчаники, гравелиты		Границы разновозрастных геологических образований достоверные (a) и предполагаемые (б)		
			Границы несогласного залегания образований достоверные и предполагаемые		
			Тектонические нарушения достоверные (a) и предполагаемые (б)		

Рисунок 3. Обзорная схематическая геологическая карта района исследований

Масштаб 1:1 000 000[16]



Условные обозначения

	1		11
	2		12
	3		13
	4		14
	5		15
	6		16
	7		17
	8		18
	9		19
	10		

Рисунок 4. Геологическая карта района исследований, по материалам государственного доизучения Масштаб 1:200 000. [16]

Условные обозначения

к рисунку 4 Геологическая карта района исследований [16]

Стратиграфические (петрографические) подразделения. 1 – четвертичные аллювиальные отложения. Гравий, галечники, пески, супеси, суглинки, реже глины, торф (до 20 м). 2 – плиоценовые-эоплейстоценовые озерные и озерно-аллювиальные отложения. Галечник, песок, конгломерат, алевриты, глины (до 35 м). 3 – Средняя юра. Верхнеитатская подсвита. Песчаники, прослои алевролитов, аргиллитов, бурых углей (до 280 м). 4 – Средняя юра. Среднеитатская подсвита. Песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослои и пласты бурых углей, прослои и линзы конгломератов (65-270 м). 5 – Нижняя юра. Иланская свита. Алевролиты, песчаники, аргиллиты (0-180 м). 6 – Нижняя юра. Макаровская свита. Песчаники, алевролиты, прослои аргиллитов и, редко, бурых углей, в основании – конгломераты (0-225 м). 7 – Нижняя юра. Переясловская свита. Песчаники гравелитистые, прослои аргиллитов, углистых аргиллитов и алевролитов, в основании иногда – конгломераты (0-60 м). 8 – Шишинский магматический комплекс. Дайки долеритов. 9 – Рифей. Нижнеканский магматический комплекс. $\delta_1 R_{3nk}$ – первая фаза: диориты, тоналиты, гранодиориты. $\gamma_2 R_{3nk}$ – вторая фаза: граниты биотитовые. 10 – Рифей. Южно-енисейский комплекс тектоносланцев. Катаклазиты, милониты, бластомилониты, диафториты зеленосланцевой фации. 11 – Протерозой. Таракский ультраметаморфический комплекс гнейсо-гранитов. 12 – Архей. Среднянская серия. Гнейсы, плагиогнейсы, кристаллические сланцы (1600-1800 м). 13 – Архей. Исаевская серия. Гнейсы, плагиогнейсы, амфиболиты (1500-1700 м). 14 – Архей. Атамановская серия. Биотитовые гнейсы (до 2200 м).

Прочие обозначения. 15 – геологические границы между стратиграфическими и петрографическими подразделениями. 16 – главные разломы (структурные швы), скрытые под четвертичными отложениями. 17 – прочие разломы (а – достоверные; б – предполагаемые). 18 – вероятная проектная площадь размещения подземного сооружения по захоронению РАО. 19 – площадь поисковых работ.

Архей

Канский метаморфический комплекс (AR_{kn})

Архейские образования канского метаморфического комплекса, регионально метаморфизованные в условиях гранулитовой фации метаморфизма подразделены (снизу вверх) на кузеевскую (AR_{kz}) и атамановскую (AR_{at}) метаморфические серии. Кузеевскую метасерию составляют существенно гиперстеновые, гранат-гиперстеновые и гранат-биотитовые плагиогнейсы и двупироксеновые кристаллические сланцы, имеющие в

средней части разреза горизонты гранат-двуполевошпатовых, а в верхней – кордиеритсодержащих разновидностей гнейсов. В составе атамановской метасерии доминируют силлиманит-гранат-кордиеритовые и гранат-биотитовые гнейсы и биотит-кордиеритовые кристаллические сланцы. Видимая мощность канского метаморфического комплекса 4000...4500 м. Граница между сериями проводится условно по исчезновению гиперстена в породообразующих количествах в кузеевской и появлению кордиерита в породообразующих количествах в атамановской метасериях. Архейский возраст комплекса определен по монацитам из чарнокитов 4100 ± 200 млн. лет. По циркону из плагиогнейса Шилкинского блока Pb-Pb термоионным методом получен возраст 3,2...3,1 млрд.лет [13], который интерпретируется как возможная эпоха гранулитового метаморфизма.

Ранний протерозой

Енисейский метаморфический комплекс (PR_{1en})

Раннепротерозойские образования амфиболитовой фации регионального метаморфизма енисейского метаморфического комплекса со стратиграфическими угловым несогласием (Рис. 3, 4) залегают на гранулитах канского метаморфического комплекса и представлены (снизу вверх) исаевской (PR_{1is}) и среднянской (PR_{1sr}) метасериями. Исаевскую метасерию мощностью до 1500...1700 м слагают мигматизированные биотитовые, гранат-биотитовые и гранат-биотит-амфиболовые плагиогнейсы с прослоями биотитовых и гранатовых амфиболитов и, реже, силлиманитовых гнейсов. Среднянская метасерия представлена переслаивающимися биотитовыми и двуслюдяными, часто с гранатом и силлиманитом, гнейсами, амфиболитами, прослоями мраморов и кварцитовидных сланцев. Мощность серии – 1800...2100 м.

Контакты между канским и енисейским комплексами практически всеми исследователями картируются тектоническими. Модельный возраст вулканитов енисейского метакомплекса около 2457 млн.лет, а жильных гранитов, залегающих в них, 1687 млн.лет [17; 18].

Возраст пород енисейского комплекса различными исследователями трактуется от раннепротерозойского до рифейского [13]. Рифейский возраст обосновывается тем, что в комплекс рядом исследователей включаются и выделяемые ранее в самостоятельный юксеевскую серию [11] метаморфизованные в эпидот-амфиболитовой фации образования юдинской и предивинской толщ (PR_{1juk}), Представлены последние грубо полосчатыми метабазами и кислыми метаэффузивами, которые к верхам разреза переходят в тонко

полосчатые породы преимущественно туфового и вулканомиктового состава с горизонтами кварцитов и гематит-магнетитовых(железистых) кварцитов, кислых и основных эффузивов. В составе толщюксеевской серии принимает участие соскладчатое тело метагабброидов ярлычихинского комплекса, к комагматам которых отнесены и все дайки метадолеритов, а также габбро-диабазов и диабазовых порфиритов и трахидолеритов на участке Енисейском [16].

Возраст амфиболов из амфиболитов Ярлычихинского массива [5] по результатам Ar-Ar метода - $600,2 \pm 2,4$ млн. лет, а U-Pb датировка вмещающих метареолитов Предивинского островодужного комплекса – $637 \pm 5,7$ млн. лет. Главные же рубежи формирования и преобразования метариолитов предивинской толщи [9] составляют 2750, 1450, 1050 и 600 млн. лет (определения Pb-Pb методом по цирконам). Поэтому, претерпевшие в период завершения гранулитового метаморфизма метадолериты основного комплекса послонных и секущих гнейсовидного облика даек на участке Енисейском по возрасту можно сопоставить со временем образования будинированных даек гранатовых метадолеритов основания исаевской толщи, то есть на рубеже позднего архея – раннего протерозоя. Возможно, дайки долеритов первого этапа внедрения принадлежат к выделенному А.Д. Ножкиным из состава исаевской толщи бобровскому вулканическому комплексу, что соответствует времени завершения прогрессивного регионального метаморфизма канского метаморфического комплекса. Возраст секущих исаевскую метасерию гранитов в устье р.Посольной составляет 2600 млн. лет [4].

Комплекс даек габбро-диабазов и диабазовых порфиритов и трахидолеритов, секущих инъекционные мигматиты таракского времени и дайки первого этапа, соответствует времени внедрения даек комаровского комплекса. Радиологический Rb-Sr возраст последнего оценивается около 1870 ± 200 млн. лет [18].

Юрская система, нижний и средний отделы (J_{1-2})

Северо-восточнее площади работ в пределах Тельской впадины откартированы осадочные отложения юрского возраста (Рис. 4). Налегают они трансгрессивно на консолидированном и глубоко эродированном выступе докембрийского фундамента в опущенном блоке с вероятно сохранившейся корой химического выветривания. В бассейне р. Б.Тель рифейские граниты и раннедокембрийские гнейсы и кристаллосланцы обнажены в нижних частях склонов и в тальвиге долины, а юрскими породами сложены повышенные участки.

Горизонтально залегающие юрские отложения представлены континентальной угленосной формацией. В нижней юре выделяется макаровская (J_{1mk}) и иланская (J_{1il})

свиты. Среднеюрские отложения представлены итатской свитой, которая расчленяется на три подсвиты: нижне-, средне- и верхнеитатскую. Макаровская свита трансгрессивно налегает на докембрийское основание. В основании её залегают конгломераты. Выше сложена она в основном рыжевато-розоватого цвета песчаниками и алевролитами с прослоями аргиллитов и маломощными прослоями бурых углей. Согласно на макаровской свите залегают зеленовато-серые алевролиты и аргиллиты иланской свиты с прослоями углистых аргиллитов и редкими прослоями углей. Мощность иланской свиты первые десятки метров.

Итатская свита с размывом ложится на разные уровни иланской свиты или же довольно круто прилегает к метаморфическим образованиям Южно-Енисейского кряжа. Свита сложена песчаниками, часто известковистыми, алевролитами, аргиллитами, реже углистыми алевролитами и аргиллитами с прослоями и пластами бурых углей.

Общая мощность юрских отложений до 350 м.

Четвертичные отложения (Q)

Непосредственно на площади работ и её окружении повсеместно развиты современные рыхлые элювиально-делювиальные отложения, представленные суглинками, супесями и песками с включением дресвы и щебня подстилающих раннедокембрийских пород. Мощность отложений колеблется от 5...6 м на склонах до первых десятков метров на плоских водоразделах и в долинах логов. В руслах ручьев аллювиальные отложения представлены илистыми песками с включением слабо окатанного галечно-гравийного материала. В 4...5 км к западу от площади работ развиты плейстоцен-голоценовые галечники, пески супеси 6-ти террас долины р. Енисей, мощность аллювиальных отложений которых колеблется от 12 до 20 метров.

1.2.2 Магматизм

К интрузивным породам архея относятся метагабброиды кимбирского комплекса, представленного дифференцированными разновидностями от дунитов, перидотитов через габбро-нориты и габбро до анортозитов. Внедрение интрузивных пород трактуется как дометаморфическое и произошло в период ранних дислокаций ещё неконсолидированной коры, а присутствие интрузивных тел приурочено, в основном, к низам разреза, то есть к образованиям кузеевской метасерии. Среди пород атамановской метасерии они встречаются значительно реже в виде маломощных послойных тел метагабброидов. В результате ультраметаморфических процессов в архее образовались чарнокиты

кузеевского и богунайского комплексов и ортоклазовые гранитоиды березовского комплекса. Контакты интрузивных образований с вмещающими гнейсовыми толщами архея расплывчатые с постепенными переходами. В пределах участка Енисейского докембрийские магматические образования представлены серией мощных секущих и послонных архей-раннепротерозойских даек метадолеритов, внедрившихся в заключительную стадию регионального метаморфизма, а также постметаморфическими маломощными дайками габбро-диабазов, как правило, трассирующих сеть диагональных разрывных нарушений.

В пределах площади работ вместе с гранулитами канского комплекса дайковые образования претерпели значительное изменение в эпоху как таракской гранитизации (1850-1890 млн. лет), так и в рифее в результате становления нижнеканского массива гранитоидов рифейского возраста. Собственно Таракский массив гранитоидов палингенно-анатектического типа расположен (Рис. 3) на восточном фланге Ангаро-Канского выступа, а в районе работ он представлен отдельными небольшими выходами южнее площади работ (Рис. 5). Ультраморфизм таракского времени в пределах площади выразился в проявлениях наложенной на предшествующую ему метаморфическую дифференциацию вещества инъекционной мигматизации.

Внедрение секущего батолитообразной формы, вытянутого в северо-западном направлении массива гранитоидов нижнеканского комплекса рифея происходило по В.М. Даценко в 2 фазы. Первая фаза представлена диоритами, тоналитами, гранодиоритами, биотит-амфиболовыми плагиогранитами, вторая – биотитовыми и биотито-мусковитовыми порфиробластическими гранитами [8]. На площади работ породы комплекса представлены жильными образованиями. Внедрение гранитоидов происходило с участием регрессивного по отношению к раннедокембрийским образованиям метасоматоза.

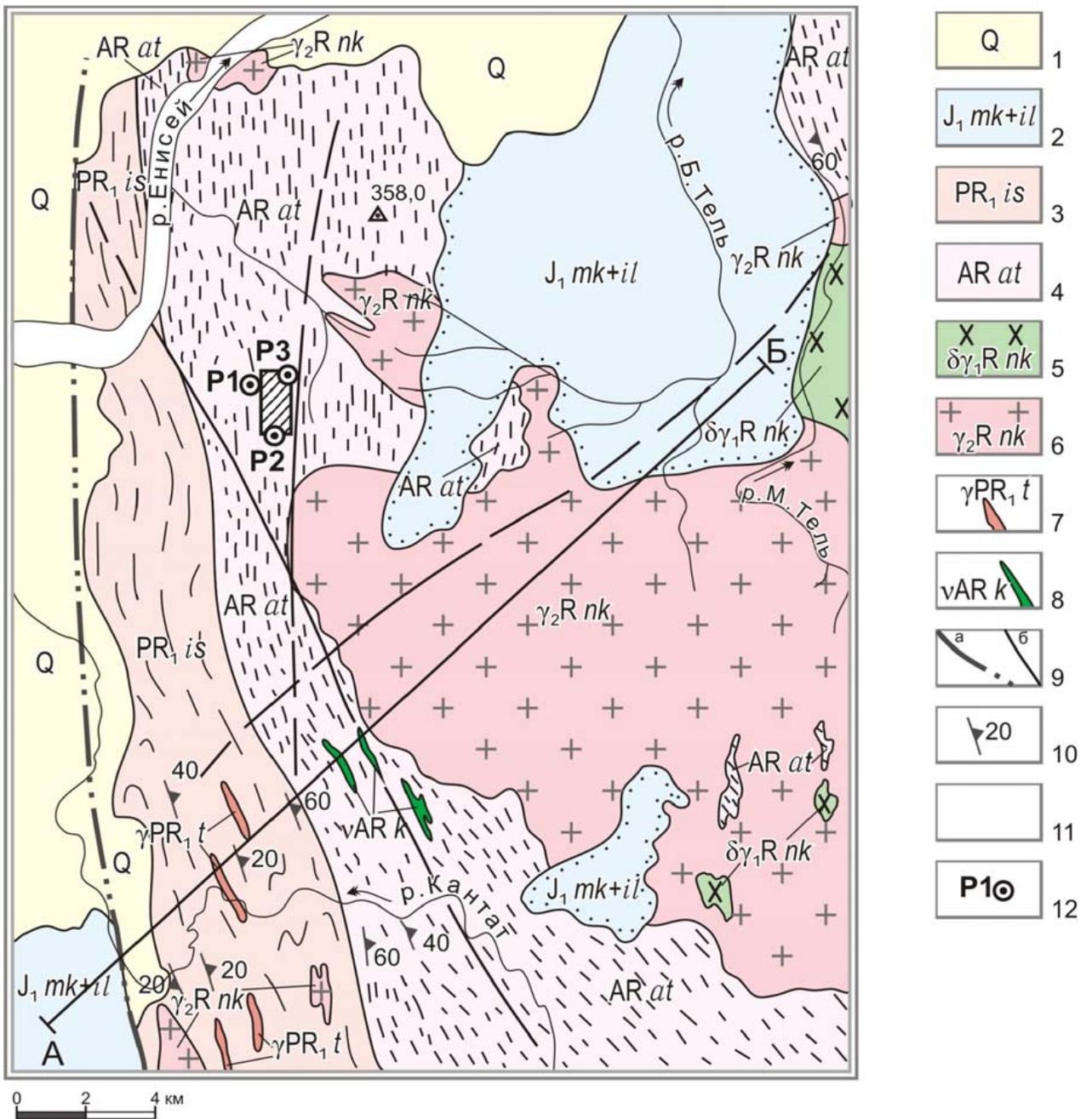
1.2.3 Тектоника

Ангаро-Канский выступ представляет собой докембрийскую складчатую область, характеризующуюся полициклическостью развития и сложностью геологического строения. Здесь развиты архейские и раннепротерозойские метаморфические и интрузивные магматические образования, сформированные в условиях повышенных давлений и температур и специфических условий ранней истории Земли.

Архейские образования слагают в структурном отношении типичный для пород такого возраста гранито-гнейсовый, вытянутый в северо-западном направлении купол с

пологими крыльями. Раннепротерозойские образования за пределами площади работ со стратиграфическим и угловым несогласием (Рис. 3; 5) залегают на гранулитах архея. В локальных впадинах раннедокембрийские образования перекрыты угленосными осадками юрского времени.

Основной разрывной структурой Ангаро-Канского выступа является Приенисейский (фрагмент Саяно-Енисейского сдвига) глубинный и долгоживущий разлом, шовная часть которого находится восточнее площади работ (Рис. 3). Мощность шовной части Приенисейского разлома достигает 1 и более км. Оперяющая разлом продольная сеть трещин, как и шовная его часть, характеризуется северо-западным (320-340°) простиранием с проявлениями надвигового на юго-запад характера и с падением плоскостей сместителей под углом до 50-80° на северо-восток. К числу таких разломов можно отнести севернее района работ Муратовский надвиг, а непосредственно в районе работ, откартированные по результатам дешифрирования АФС и геофизическим данным вдоль правобережья р. Енисея (Рис. 5) и подтвержденные геологическими наблюдениями разломы Атамановский и Правобережный, наследующие структуру Краевого Шва Сибирской платформы и входящие в систему близмеридиональных разломов Саяно-Енисейского глубинного разлома [14]. Другая сеть оперяющих Приенисейский разлом трещин, диагональных и более поздних поперечных также широко развита в районе работ. Фрагменты её нашли свое отражение и на участке Енисейском. Непосредственно к площади работ примыкают с юго-запада Байкальский разлом с его поперечным ответвлением по ручью Безымянному с сетью параллельных разрывных трещин, прослеживающихся через участок Енисейский до встречи с Шумихинским разломом на северо-восточном фланге участка.



Разрез по линии А-Б

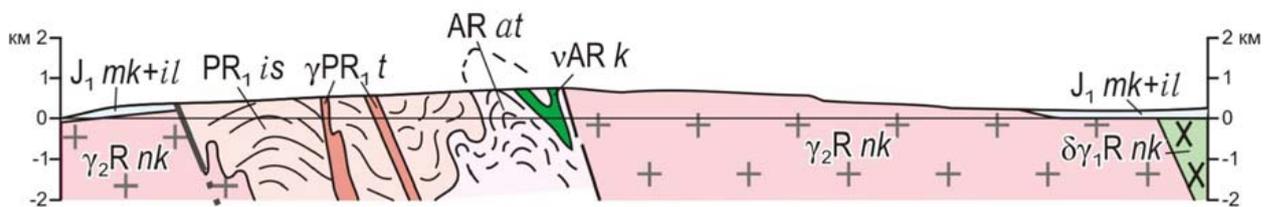


Рисунок 5 Схематическая геологическая карта района работ. Масштаб 1:200 000 [20].

Условные обозначения

к рисунку 5 Схематическая геологическая карта. Масштаб 1:200 000.

- 1 – четвертичные песчано-галечниковые отложения террас р. Енисея (Q);
- 2 – песчаники, алевролиты, аргиллиты с прослоями бурых углей макаровской и иланской свит нижней юры (J_{1mk+il});
- 3 – раннепротерозойские гнейсы, кристаллосланцы и амфиболиты исаевской серии енисейского метакомплекса (PR_{1is});
- 4 – архейские гранат-биотитовые и биотит-кордиеритовые плагиогнейсы и кристаллосланцы атамановской метасерии канского метакомплекса (AR_{1at});
- 5-6 – гранитоиды нижнеканского комплекса рифея: 5 – диориты и роговообманковые гранодиориты I фазы ($\delta\gamma_1R_{nk}$), 6 – порфиробластические биотитовые плагиограниты и пегматиты II (главной) интрузивной фазы (γ_2R_{nk});
- 7 – гнейсограниты и граниты таракского комплекса раннего протерозоя (γPR_{1t});
- 8 – габбро и габбро-нориты кимбирского комплекса архея (vAR_k);
- 9 – разрывные нарушения: главные (а) и второстепенные (б);
- 10 – элементы залегания гнейсовидной полосчатости;
- 11 – контур рабочего блока;
- 12 – местоположение поисковых скважин №№ P-1, P-2 и P-3

В процессе становления выступа фундамента раннедокембрийские образования, обладая довольно высокими прочностными свойствами, сетью разнонаправленных разрывных нарушений разбиты на разновеликие, в том числе крупные монолитные блоки. Выведенные на дневную поверхность они в палеозое подверглись обширным процессам выветривания, продукты которых в результате неоднократного подновления тектонических движений в приподнятых блоках нацело эродированы, а в опущенных блоках сохранились под осадками мезозоя. Примером может служить наличие кор химического выветривания в основании угленосных отложений юрского времени (макаровская и иланская свиты) в Тельской мульде, примыкающей по меридиональному взбросовому взбросо-надвиговому Правобережному разлому с северо-востока к участку Енисейскому.

Плоскости сместителей и Атамановского и Правобережного разломов падают в восточном направлении с невыдержанными (от 45 до 75...89°) углами падения. Расстояние между разломами достигает 4...5 км.

1.3 Гидрогеология и инженерная геология

1.3.1 Гидрогеологические условия

Характеристика гидрогеологических условий района работ приводится по результатам проведения геологической и гидрогеологической съемок масштаба 1:200 000 в 1997-2000 гг. [26]. Выделение гидрогеологических таксонов выполнено на основе представлений о геологическом строении территории [16] с учетом особенностей залегания пород, степени их литификации, структуры коллекторского пространства и условий формирования и движения подземных вод. Представления о пространственном распространении гидрогеологических подразделений дает геологическая карта (рис. 4). Гидрогеологическая карта [26] содержательно мало отличается от геологической, а фактический гидрогеологический материал по изучаемому участку в ней отсутствует, поэтому здесь эта карта не приводится.

По гидрогеологическому районированию России, территория исследований находится в области сочленения двух гидрогеологических регионов: Западно-Сибирского артезианского мегабассейна и Енисейской гидрогеологической складчатой области (Рис. 6).



Условные обозначения:

	Гидрогеологические платформенные области:	XII	Зейско-Буреинская
I	Восточно-Европейская	XIII	Сихотэ-Алинская
II	Туранская	XIV	Верхояно-Чукотская
III	Западно-Сибирская	XV	Корякско-Камчатско-Курильская

IV	Восточно-Сибирская	XVI	Сахалинская
	Гидрогеологические складчатые области:	XVII	Таймырская
V	Карпатско-Крымско-Кавказская		Океанические платформы:
VI	Копетдагско-Больше-Балханская	XVIII	Нинсена
VII	Тянь-Шаньско-Джунгаро-Памирская	XIX	Восточная (Гиперборейская)
VIII	Центральноказахстанская		Область расположения участка работ
IX	Тимано-Уральская		Граница гидрогеологических областей
X	Саяно-Алтайско-Енисейская		Граница между современными арктическими и континентальными бассейнами подземных вод
XI	Восточно-Сибирская		

Рисунок 6. Гидрогеологическая карта СССР

Юго-восточная окраина Западно-Сибирского региона характеризуется широким распространением грунтовых вод в четвертичных аллювиальных отложениях Енисея и его притоков, а также порово-пластовых, напорных вод в юрских отложениях.

Енисейская гидрогеологическая складчатая область представлена своей юго-западной частью, в пределах которой развиты трещинно-грунтовые и трещинно-жильные воды, приуроченные к зоне открытой трещиноватости и тектоническим нарушениям в кристаллических породах докембрия.

Характеристика водоносных подразделений

Водоносный современный аллювиальный горизонт (aQ) распространен в пойменных и русловых отложениях Енисея и его притоков. Водоносными являются гравийно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем, иногда – пески. Иногда водоносные породы перекрыты слабопроницаемыми суглинками и супесями, в этих случаях подземные воды приобретают небольшой напор. Кровля горизонта или свободная поверхность находится на глубинах 1,5-5 м. Мощность горизонта в долине Енисея – 10-12 м, в притоках – несколько метров. Дебиты скважин составляют от 3,5 до 144 м³/ч, при понижениях от 20...40 см до 1,5...2 м. Коэффициент фильтрации меняется от 270 до 706 м/сут, составляя в среднем 495±188 м/сут. Выше по течению Енисея от территории ЗАТО подземные воды эксплуатируются крупными инфильтрационными водозаборами, расположенными на островах Есауловский, Осиновский. Гидрогеологические параметры аллювиальных пойменных отложений более мелких водотоков имеют более низкие значения. Питание и формирование запасов подземных вод пойменных отложений осуществляется за счет атмосферных осадков и поверхностных вод. Годовой ход изменения залегания уровня подземных вод повторяет с небольшим опозданием

изменение уровня воды в водотоке. В солевом составе преобладают гидрокарбонаты и катионы кальция или натрия. Значения рН колеблются от 7,3 до 8,2, что характеризует воды как слабощелочные. Жесткость воды в пойменных отложениях р. Енисей изменяется от 1,5 до 2,2 °Ж, а в современных аллювиальных отложениях более мелких водотоков - от 5,6 до 7,0 °Ж. По результатам спектрального анализа в подземных водах наблюдается превышение содержания в 1,5 -2,5 ПДК бария.

Водоносный среднеюрский комплекс (J_{2it}) включает отложения итатской свиты. В 2006 году, в этом комплексе было выявлено Сухобузимское месторождение подземных вод для резервного водоснабжения Красноярска на период чрезвычайной ситуации с запасами 30 тыс. м³/сут. Именно за счет этих подземных вод осуществляется хозяйственно-питьевое водоснабжения населения Сухобузимского района. На левом берегу Енисея комплекс залегает в долине Большой Тели. Инженерно-геологические условия.

Водоносными являются очень слабые песчаники («пески»), реже алевролиты, пласты бурого угля. Слои песчаников разделены относительно водоупорными толщами аргиллитов и алевролитов. Глубина залегания подземных вод колеблется от 22,0 до 483,0 м. Воды напорные, от субнапорных в приповерхностных условиях до высоконапорных на глубине. Величины напоров над кровлей глубоких горизонтов могут превышать 500 м. При этом нередко в скважинах наблюдается самоизлив (давление на устье отдельных скважин достигает 4,1 атм.). Водообильность отложений колеблется в значительных пределах. Дебиты картировочных скважин составляют 1,5-8,2 л/с при понижениях 16,5-80,0 м, водозаборных – 11-21 л/с при понижениях 19,2-44,7 м. Водопроницаемость варьирует от 5 до 297,8 м²/сут.

По физическим свойствам вода без цвета, запаха, пресная (с минерализацией 0,4-0,8 г/дм³), с температурой 8-20 °С. По химическому составу воды гидрокарбонатные с преобладанием катионов кальция (у поверхности) или натрия (на глубине). Из специальных компонентов в химическом составе воды выше ПДК присутствуют фтор, железо реже, барий, хром. За исключением железа элементы имеют природное происхождение, т.е. следует говорить не о степени загрязнения, а о повышенных природных концентрациях данных элементов в подземных водах.

Из-за глубокого залегания подземные воды, в целом, имеют высокую степень защищенности от поверхностного загрязнения.

Водоносный нижнеюрский комплекс (J₁) на правобережье Енисея образует Тельско-Томнинскую мульду (рис. 3), а на левом берегу Енисея залегает на больших глубинах (200-736 м). Он включает отложения макаровской (перясловской) и иланской свит.

Водоносными здесь также являются очень слабые песчаники («пески») и пласты бурого угля. При этом базальные песчаники («пески») залегают на кристаллических породах фундамента.

Воды, чаще всего, высоконапорные. Величины напоров составляют 150-800 м и увеличиваются от краевых участков Чулымо-Енисейского бассейна к его центральной части. Глубина залегания подземных вод колеблется от 21-144 м при неглубоком залегании горизонтов до 640-736 м в погруженной части Западно-Сибирской плиты.

Нередко из скважин, вскрывших подземные воды данного комплекса, наблюдается самоизлив, при этом уровни подземных вод устанавливаются выше земли на 6-45 м. Водообильность отложений умеренная. Дебиты картировочных скважин варьируют от 0,5 до 16,5 л/с при понижениях 38,5-55,0 м, водозаборных -3,7-16,8 л/с при понижениях 172,4-55,3 м. Удельные дебиты не превышают 0,52 л/с. Водопроницаемость по данным откачек и выпусков воды из скважин колеблется от 12 до 108 м²/сут, а в среднем составляет 32,6 м²/сут. Пьезопроводность по единичным определениям варьирует в пределах $2,4 \times 10^5$ – $6,9 \times 10^5$ м²/сут.

По физическим свойствам вода без цвета, без запаха, с температурой 10-12 °С на большой глубине – до 20-22 °С. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные натриевые, пресные (минерализация в среднем 0,4 г/л, чаще всего, 0,8-0,9 г/л), щелочные по показателю рН (7,5-9,0). По отдельным пробам наблюдаются превышения над ПДК за счет железа и фтора.

Формирование запасов подземных вод макаровского комплекса из-за значительных глубин их залегания происходит, вероятно, за счет бокового и вертикального перетоков. Пополнение ресурсов за счет инфильтрации атмосферных осадков имеют подчиненное значение. Движение основного водного потока направлено в сторону долины Енисея, которая является региональной дренажной. Частично разгрузка подземных вод вероятно осуществляется по зонам тектонических разломов.

Относительная водоносная верхнерифейская зона (R₃) включает трещиноватые породы Нижнеканского гранитоидного массива ($\gamma, \delta R_{3нк}$) и южно-енисейского комплекса тектоносланцев. Они развиты на правом берегу р. Енисей, в пределах юго-западной части Енисейской гидрогеологической области. Водоносной является зона открытой трещиноватости в гранитах, гранито-гнейсах, диоритах, тектоносланцах и милонитах и других рифейских породах. Сверху она практически повсеместно перекрыта элювиальными и элювиально-делювиальными отложениями. Результаты исследований предшественников показали, что обводненность зоны трещиноватости весьма

неравномерна и зависит от абсолютных отметок местности, степени расчлененности рельефа, тектонических и геоморфологических особенностей.

Обводненной является, как правило, верхняя часть разреза до глубин 50-100 м. Геофизические исследования, проведенные в пределах Нижнеканско гогранитоидного массива, показали, что трещиноватость пород практически затухает на глубине до 250 м [3]. Подземные воды имеют, чаще всего, свободную поверхность, которая повторяет в сглаженном виде рельеф. Зеркало грунтовых вод залегает на глубине до 20-30 м на водоразделах и до 1-5 м – в поймах долин. Питание осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, Разгрузка подземных вод происходит в гидросеть в виде нисходящих родников и мочажин. Как правило, на участках разгрузки широко развиты процессы заболачивания и переувлажнения. При этом родники имеют небольшие дебиты (до 0,1-0,8 л/с). Многочисленные мочажины в верховьях водотоков носят здесь рассеянный и сочащийся характер и дают начало густо развитой в этом районе гидрографической сети. Модули подземного стока изменяются в пределах от 0,09 до 7,0 л/с × км² [3].

Химический состав подземных вод по составу близок к химическому составу воды поверхностных водотоков. Воды пресные с минерализацией 0,1-0,3 /дм³. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные (НСО₃ 93-98%-экв.). Из катионов в составе преобладают ионы кальция (50-64%-экв.), магния (до 25%-экв.).

Относительно водоносная протерозойская зона (PR) условно выделена в гнейсо-гранитах протерозойского таракского комплекса, ограниченно распространенных к югу от участка работ. В гидрогеологическом отношении эти образования не изучены и не имеют значения применительно к изучаемой проблеме.

Относительно водоносная позднеархейская зона (AR₂), приурочена к гнейсам среднянской и исаевской метаморфическим сериям. Характеристика данного водоносного подразделения приводится по результатам бурения 2-х гидрогеологических скважин при проведении гидрогеологической съемки масштаба 1:200 000, а также декларируемому материалу по гидрогеологическим условиям горного массива, в котором расположены подземные цеха Красноярского ГХК. Подземные воды здесь связаны с зоной открытой трещиноватости, возникшей в результате экзогенного выветривания. Нижняя граница данной зоны достигает глубины 70-80 м. Водоносной является зона трещиноватости в биотитовые гнейсах, плагиогнейсах, амфиболитах, кристаллических сланцах. Воды трещинно-грунтовые, со свободной поверхностью. Водообильность пород высокая. Дебиты буровых скважин изменяются от 0,006 до 0,8 л/с при понижении 36,7 м.

Глубина залегания уровня подземных вод по всей территории изменяется от 8 до 60 м. Дебиты мочажин и родников, изученных при гидрогеологической съемке, изменяются от 0,1 до 0,95 л/с. Коэффициенты фильтрации по данным проведения опытных и геофизических работ, варьируют от дневной поверхности до глубины 90-100 м от 0,055 до 0,001 м/сут. Глубже коэффициенты фильтрации уменьшаются до величины 0,0001 м/сут, что соответствует глубине полного затухания региональной трещиноватости [26].

По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные кальциевые или кальциево-магниевые, пресные с минерализацией 0,14-0,72 г/л, слабощелочные, с водородным показателем, равным 7,4-8,5, умеренно жесткие и жесткие. По степени защищенности они относятся к незащищенным. Из-за отсутствия вблизи значительных источников загрязнения, они имеют допустимый уровень загрязнения.

Относительно водоносная раннеархейская зона (AR₁) относится к трещиноватым породам Канского метаморфического комплекса (атамановской серии). Водоносной является зона открытой трещиноватости в гнейсах и кристаллических сланцах атамановской серии. Предшественниками эта зона изучена по результатам исследования родников и мочажин, без бурения картировочных скважин [26]. Дебиты родников чаще всего составляют 0,2-0,5 л/с, реже достигают 1,5-3,8 л/с. Родники и мочажины, как правило, дают начало поверхностным водотокам. Глубина залегания подземных вод колеблется от 2-5 м в пониженных участках до 50-60 м на водоразделах. Подземные воды в большинстве случаев, имеют свободную поверхность. Питание осуществляется за счет атмосферных осадков, разгрузка – в поверхностные водотоки. Региональной дренажной является Енисей.

По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные кальциевые, слабощелочные и умеренно жесткие по значению жесткости. Из микрокомпонентов по данным спектрального анализа сухих остатков установлено повышенное содержание титана (17,4 ПДК) и бария (1,7 ПДК), что обусловлено, вероятней всего, петрографическим составом пород. Подземные воды практически не используются для хозяйственно-питьевых и культурно-бытовых нужд из-за необжитости территории. Площадь распространения архейских пород характеризуется широким развитием тектонических нарушений с трещинно-жильными водами.

По химическому составу подземные воды относятся к пресным гидрокарбонатным кальциевым или натриевым. Содержания нормируемых элементов не превышают хозяйственно-питьевых нормативов.

1.3.2 Инженерно-геологические условия

Характеристика инженерно-геологических условий приводится по материалам инженерно-геологического картирования [26], с использованием других фондовых материалов, полученных предшественниками [2].

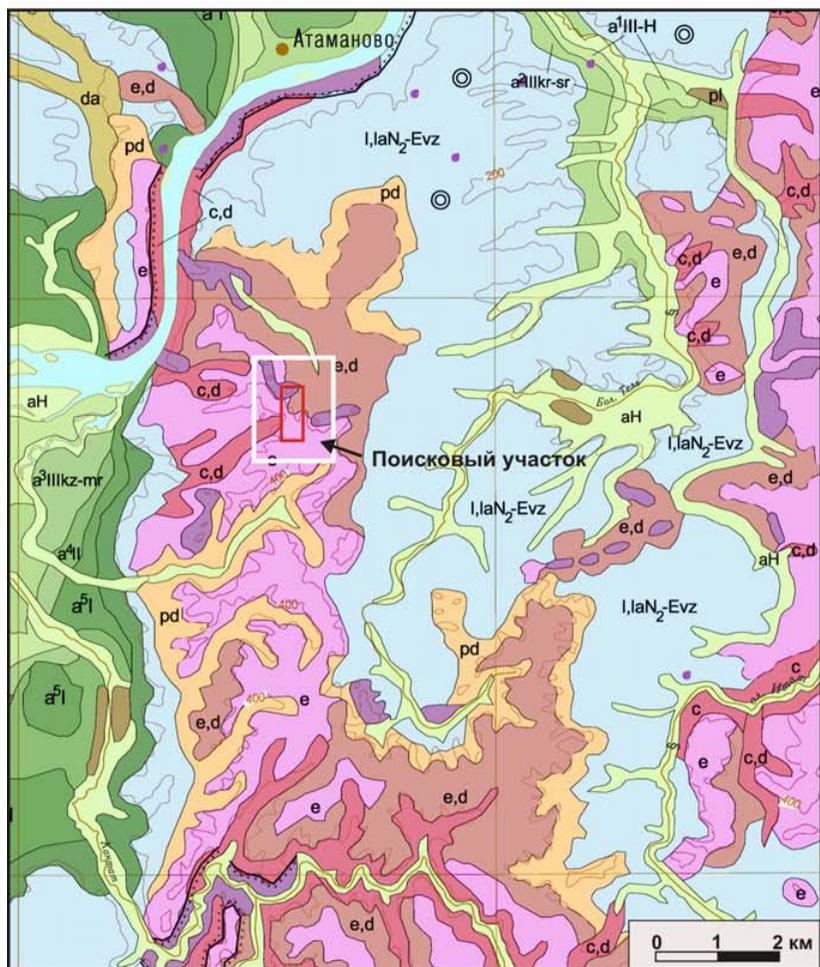
На инженерно-геологической карте района масштаба 1:200 000 отображены стратиграфо-генетические комплексы (СГК) четвертичных отложений и подстилающих коренных пород, их литологический состав и мощность, обводненность, а также современные экзогенные и техногенные процессы.

В соответствии со стратиграфическим и литолого-формационным принципами в рыхлых неоген-четвертичных отложениях района первыми от поверхности выделяются следующие стратиграфо-генетические комплексы (СГК) (Рис 7):

- голоценовый аллювиальный комплекс пойм рек, ручьев и днищ балок (aH);
- элювиальный и элювиально-делювиальный нерасчлененный (e;e,d);
- коллювиально-делювиальный нерасчлененный комплекс (c,d);
- пролювиально-делювиальный комплекс (pd);

В дочетвертичных отложениях выделены следующие СГК:

- вознесенский озерный и озерно-аллювиальный комплекс (1,1aN2-Evz);
- стратиграфо-генетические комплексы в отложениях коренной основы:
- рифейский интрузивный комплекс (γ , β , δR_3);
- архей-протерозойский метаморфический комплекс (AR-PR).



Стратиграфо-генетические комплексы

- e
- d
- e,d
- c,d
- c
- dl
- da
- pd
- ap
- pl
- aH
- tH
- a¹III-H
- a²III-kr-sr
- a³III-kz-mr
- a⁴II
- a⁵I
- a⁶EII-III
- I,laN₂-Evz
- Стратиграфо-генетические комплексы в отложениях коренной основы
- Буровые картировочные скважины

Рисунок 7 Схематическая инженерно-геологическая карта района [26]

Глава 2. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ УЧАСТКА «ЕНИСЕЙСКИЙ» И АНАЛИЗ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ

2.1 Виды и объемы работ

В связи с большой глубиной залегания целевого горизонта (450-525 м) и большой глубиной исследований (700 м) был проведен обширный комплекс геологических работ, одним из основополагающих, было бурение геологических скважин. Во всех упомянутых выработках был выполнен полный комплекс геофизических каротажных работ, а также поинтервальные опытно-фильтрационные работы через 10-50 м. Эти работы позволяют выполнить изучение геологического строения, физико-механических свойств, проницаемости горных пород в образцах или в массиве, а также исследования химического состава подземных вод.

Главными сопутствующими видами были выбраны площадные геофизические работы: магнитометрическая съемка, вертикальное электрическое зондирование и сейсморазведка МОГТ 3D.

Сопутствующими дополнительными видами оценочных геологоразведочных работ были специальные исследования по изучению напряженного состояния пород, их сорбционной емкости и теплофизических свойств, определению абсолютного возраста подземных вод, выполнявшиеся ведущими в данных направлениях российскими организациями и специалистами.

2.1.1 Буровые работы

На участке «Енисейский» было пройдено и опробовано десять поисково-оценочных скважин и четыре проектных (рис. 8).

Бурение осуществлялось станками колонкового бурения СКБ-5. Забурка и бурение скважин до вхождения снаряда в твердые скальные породы проводилось твердосплавными коронками всухую укороченными рейсами. Бурение скважин производилось с полным отбором керна. В процессе бурения керн укладывался в керновые ящики и документировался по принятой стандартной форме. После укладки керна в ящики производилось его фотографирование.

В 2010 году пройдены вертикальные скважины №№ Р-1; Р-2; Р-3 глубиной 700 м, Р-4 и Р-5 глубиной соответственно 600м и 600,7 м; скважины Р-7, Р-8 глубиной 700,3 и 700 м соответственно. Для проведения опытно-фильтрационных исследований в районе скважин Р-2 и Р-7 пробурено по две кустовых 200 метровых скважины (2-2, 2Ц и 7-2, 7Ц), отстоящих на расстоянии 30 и 20 м от основных.

В 2011 году дополнительно пройдено три 700 метровых скважины Р-6, Р-9, Р-10.

Бурение контрольно-стволовых скважин Р-11, Р-12, Р-13 осуществлялось в 2013 г. Глубина скважин составила: Р-11 – 508,2 м; Р-12 – 531 м, Р-13 – 539м.

Для проведения опытно-фильтрационных исследований в районе скважины Р-11 пройдено две кустовых скважины (Р-11-1 и К-1 глубиной 509 и 51 м соответственно, отстоящих на расстоянии 6 и 15 м от основной.

В процессе бурения керн укладывался в керновые ящики и документировался (Рис. 9).

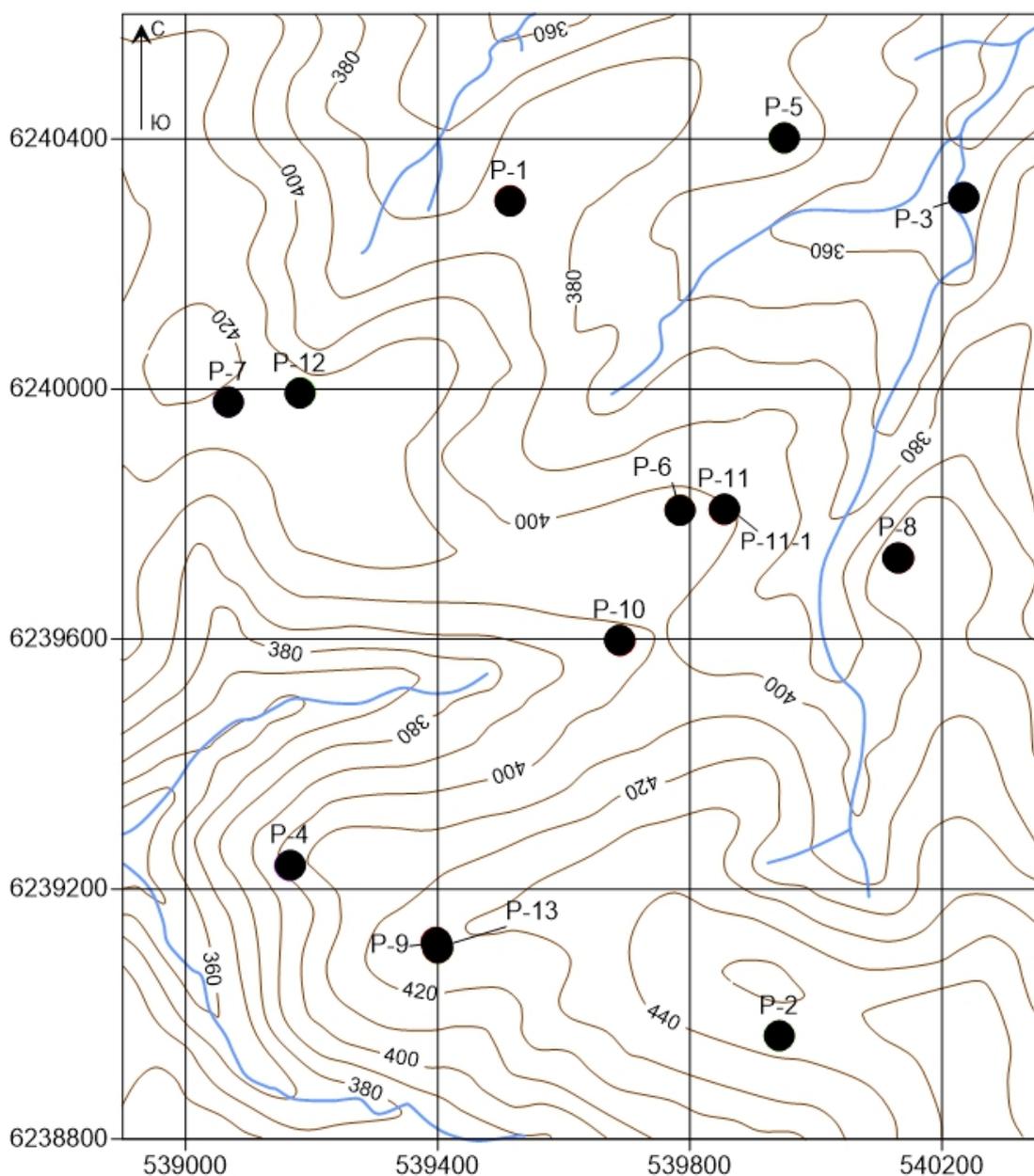


Рисунок 8. Расположение скважин на участке работ



Рисунок 9. Фото керна скважины Р-4

2.1.2 Геофизические исследования в скважинах

Геофизическими исследованиями в скважинах решались следующие задачи:

- 1) Расчленение разреза скважин на основные литологические разности;
- 2) Изучение гидрогеологических условий (выделение интервалов водоносных горизонтов и определение мест водопритока или водопоглощения);
- 3) Определение пространственного положения стволов скважин;

Исходя из поставленных задач, опыта работ применялся следующий комплекс методов ГИС:

- 1) Гамма каротаж – ГК
- 2) Гамма-гамма каротаж плоскостной – ГГК-П
- 3) Каротаж сопротивлений - КС
- 4) Кавернометрия – КВ
- 5) Самопроизвольная поляризация – ПС
- 6) Резистивиметрия
- 7) Расходомерия
- 8) Инклинометрия

Результаты ГИС были использованы в данной работе и приведены в главе 3.2.2.

2.1.3 Опробование керна скважин

Опробование керна скважин при геологоразведочных работах проводилось для получения сведений о вещественном (литолого-петрографическом и химическом) составе горных пород, их физико-механических свойствах, естественной радиоактивности, а также емкостных свойствах и проницаемости.

При проведении инженерных изысканий для подземного строительства опробование на определение физико-механических свойств проведено по основным разновидностям грунтов согласно требованиям ГОСТ 12071-2000.

2.2 Геологическое строение участка «Енисейский»

С геологической точки зрения рассматриваемый район приурочен к краю Сибирской платформы и расположен в области сочленения двух крупнейших платформенных структур – собственно Сибирской платформы и эпигерцинской Западно-Сибирской плиты (Рис.10). На юге к этим структурам примыкает Западно-Саянская орогеническая область. Сибирская платформа в пределах участка «Енисейский» представлена юго-западным выступом своего складчатого фундамента – Южным (Ангаро-Канским) выступом Енисейского кряжа, консолидация которого произошла в Байкальскую эпоху.

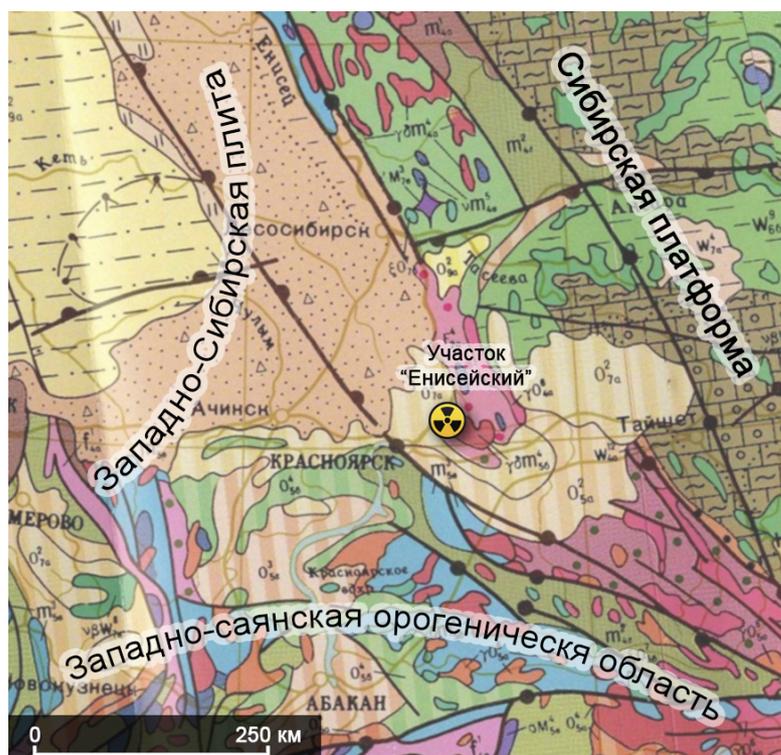
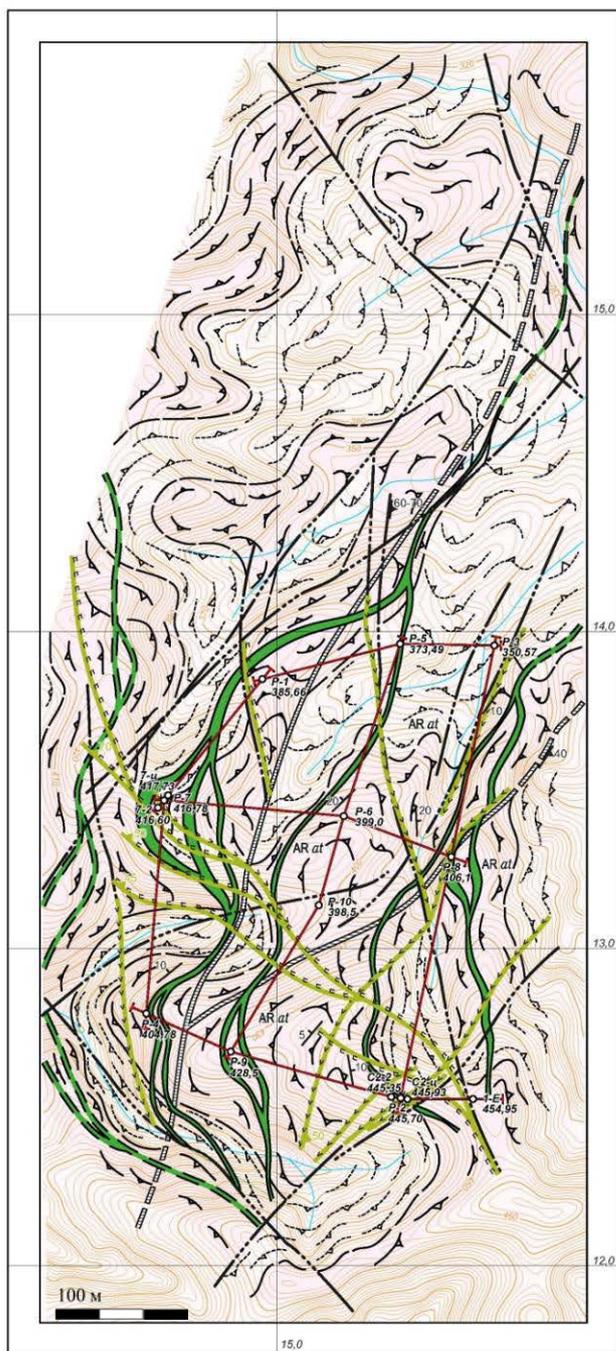


Рисунок 10. Схема расположения участка работ относительно крупнейших платформенных структур

В геологическом строении участка «Енисейский» принимают участие гнейсовая толща атамановской серии канского метаморфического комплекса архея, дайки основного состава архей-раннепротерозойского и рифейского возрастов, гранитоидные образования раннепротерозойского таракского комплекса, жильная фаза рифейских гранитоидов нижнеканского комплекса и современные элювиально-делювиальные отложения [25].

Основная часть разреза массива коренных пород представлена мигматизированными плагиогнейсами, биотитовыми, гранат-биотитовыми, кордиерит-биотитовыми и гиперстен-биотитовыми гнейсами. Гнейсовая толща пронизана серией

даек долеритов как минимум двух генераций с их вертикальной мощностью от 0,3 до 39 м (Рис.11, 12).



Условные обозначения:

Раннедокембрийские метаморфические образования атамановской метасерии архея:



1 – преимущественно мелкозернистые и среднезернистые биотитовые и двусюдяные гнейсы с редкими прослоями кордиерит и силлиманит содержащих гнейсов



2 – биотитовые плагиогнейсы с редкими прослоями кристаллических сланцев

Докембрийские дайковые образования:



3 – Комплекс метаморфизованных секущих и реже послойных даек метадолеритов первого внедрения



4 – Секущие дайки долеритов, габбро-диабазов (а), порфиритов (б) второго этапа внедрения

Разрывные дислокации:



5 – Зоны сцементированных тектонических брекчий древнего заложения, подтвержденные данными бурения (а), предполагаемые по геофизическим данным (б)



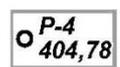
6 – Постметаморфические разрывные нарушения, трассируемые секущими дайками габбро-диабазов второго этапа внедрения с проявлениями милонитизации



7 – Прочие разрывные нарушения, выделенные по геофизическим данным



8 – Элементы залегания: гнейсовидной полосчатости (а), угол падения дайковых тел (б) и разрывных нарушений (в)



9 – Буровые скважины с указанием номеров и абсолютных отметок устья



10 – Линии геологических разрезов

Рисунок 11. Схематическая геологическая карта участка «Енисейский» [20]

Первым внедрился комплекс падающих на восток-юго-восток под углом от 20 до 65 градусов комплекс даек габбро-долеритов. Внедрение даек этого комплекса происходило, по-видимому, до завершения главной фазы метаморфизма атамановской метасерии. Второй этап внедрения комплекса маломощных крутопадающих даек габбро-диабазов происходил по разветвленной сети тектонических трещин. Эти дайки по отношению к дайковому комплексу первого этапа являются секущими.

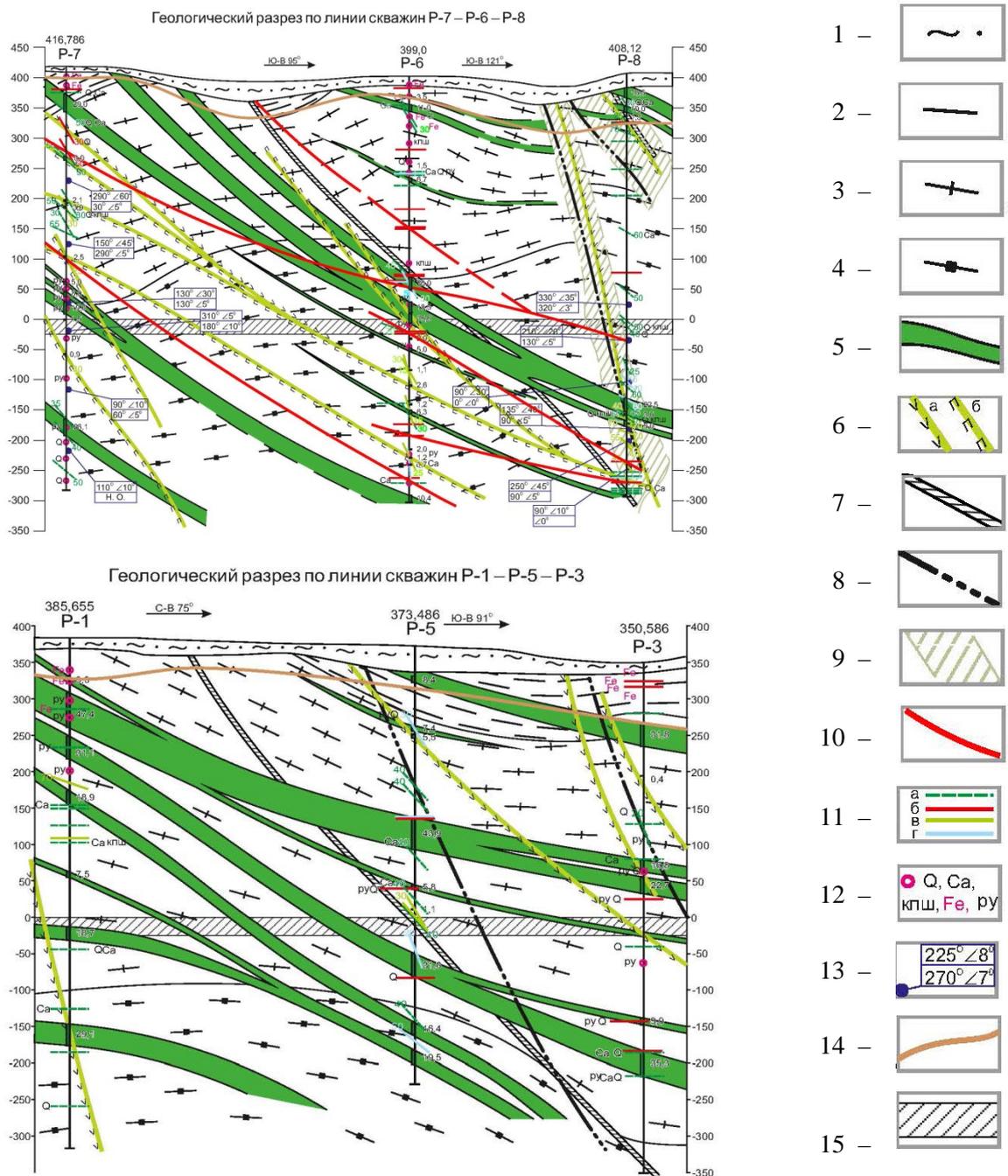


Рисунок 12. Геологический разрез по схематической геологической карте участка «Енисейский». [20].

Условные обозначения к геологическому разрезу по схематической геологической карте участка «Енисейский»

1 – четвертичные суглинки, пески и супеси; 2 – биотитовые и двуслюдяные гнейсы и сланцы с редкими прослоями силлиманит-кордиерит содержащих гнейсов; 3 – биотитовые плагиогнейсы с редкими прослоями гранат-биотитовых гнейсов и силлиманит-кордиеритовых сланцев; 4 – биотит-кордиеритовые гнейсы и кристаллические сланцы с прослоями биотитовых и биотит-гиперстеновых гнейсов; 5 – дайки долеритов и габбро-диабазов первого этапа внедрения; 6 – немасштабные дайки габбро-диабазов и диабазовых порфириров второго этапа внедрения: (а – габбро-диабазов, б – порфириров); 7 – зона сцементированных брекчий раннего этапа разрывных дислокаций; 8 – разрывные нарушения с открытой трещиноватостью; 9 – зоны брекчирования пород на контактах трассирующих даек второго этапа, с проявлениями продуктов метасоматоза и жильных образований кварц-полевошпатового состава; 10 – зоны поздних (рифейских?) немасштабных (мощностью до первых метров) тектонических брекчий, сцементированных преимущественно кварц-микроклиновым материалом. 11 – локальные проявления изменения пород по керну скважин: а – брекчирования и милонитизации пород, б-г – прожилков: кварцевого и кварц-полевошпатового состава (б), порфириров (в), кальцита (г); 12 – символы процессов изменения пород: **Q** – окварцевание, **Ca** – кальцитизация, **кпш** – калишпатизация, **Fe** – ожелезнение, **py** – пиритизация; 13 – места отбора ориентированных образцов керна, азимут падения и угол падения: в числителе гнейсовидной полосчатости; в знаменателе реликтовой первичной полосчатости; 14 – нижняя граница экзогенной трещиноватости. 15 – целевой горизонт.

Основной разрывной структурой Ангаро-Канского выступа является Приенисейский глубинный и долгоживущий разлом, шовная часть которого отнесена на восток от площадки работ на 45 км. Мощность шовной части Приенисейского разлома достигает 1 и более км. Оперяющая разлом продольная сеть трещин, как и шовная его часть, характеризуется северо-западным (320-340°) простираем с проявлениями надвигового на юго-запад характера и с падением плоскостей сместителей под углом до 50-80° на северо-восток. К числу таких разломов можно отнести севернее района работ Муратовский надвиг, а непосредственно в районе работ вдоль правобережья р. Енисей разломы Атамановский и Правобережный, наследующие структуру Краевого Шва Сибирской платформы (Рис.12). Другая сеть оперяющих Приенисейский разлом трещин, диагональных и более поздних поперечных также широко развита в районе работ. Непосредственно к площади работ примыкают с северо-востока Шумихинский разлом, а с

юго-запада Кантасткий разлом [25]. Плоскости сместителей и Атамановского и Правобережного разломов падают в восточном направлении с невыдержанными (от 45 до 75-89°) углами падения. Расстояние между разломами достигает 4-5 км. Собственно площадка участка «Енисейский» расположена внутри относительно монолитного блока пород (Рис.13).

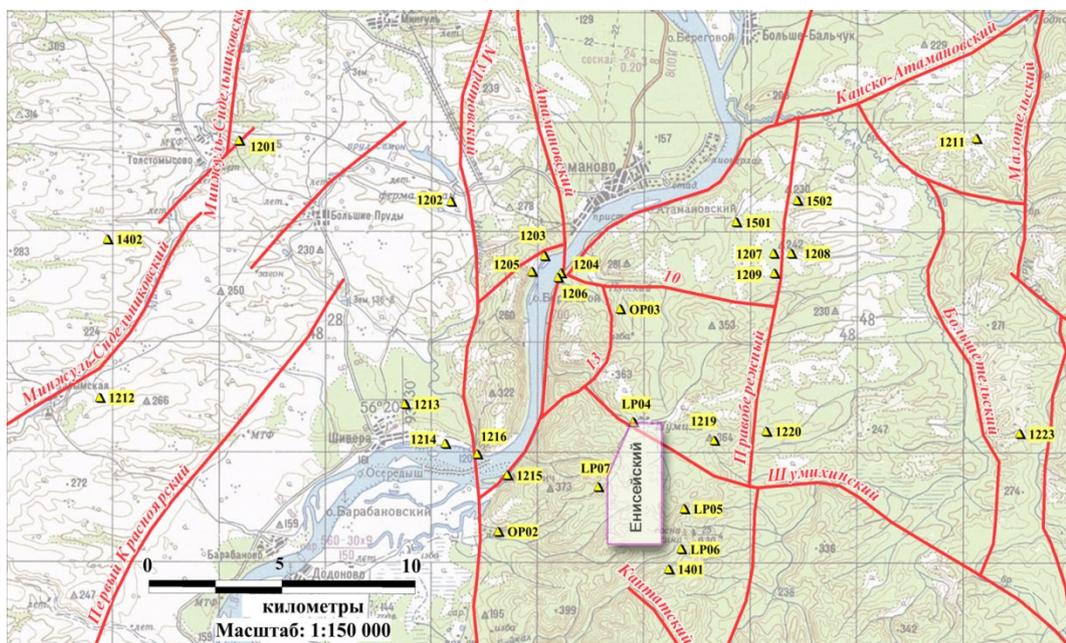


Рисунок 13. Схема размещения пунктов наблюдения, предназначенных для GPS-измерений [30]

2.3 Гидрогеологические условия

2.3.1 Описание гидрогеологического разреза

В гидрогеологическом отношении участок исследований приурочен к Ангаро-Канскому гидрогеологическому массиву Енисейской складчатой области, который характеризуется преимущественно распространением трещинных и трещинно-жильных вод. Питание подземных вод происходит за счет атмосферных осадков.

Основная область питания бассейнов, формирующих региональный поток подземных вод, – водораздел в междуречье Енисея и Кана, представленный приподнятым участком Нижне-Канского массива. 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.

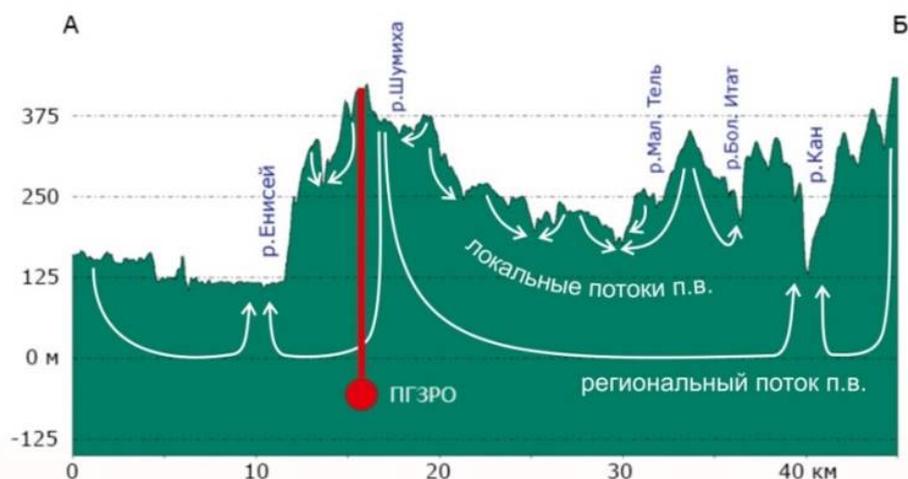


Рисунок 14. Геоморфологическая схема расположения участка «Енисейский» (площадка ПГЗРО) на региональном профиле, где стрелками показаны характерные линии тока в зоне активного и замедленного водообмена

Таким образом, в рассматриваемой гидрогеологической структуре выделяются две профильные зоны (снизу вверх) – замедленного и активного водообмена [27]. С ними связаны два типа фильтрационных потоков, выделение которых является принципиальным моментом гидрогеологической схематизации (Рис. 14):

- региональный поток подземных вод, контролируемый разгрузкой в региональные дрены – 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.

Характеристики регионального и локального фильтрационных потоков, в частности, геометрия формируемых ими профильных зон захвата, определяется распределением проницаемости массива, величиной инфильтрации, степенью гидродинамического несовершенства поверхностных водотоков, и положением границы «нижнего водоупора».

На возвышенности в зоне питания гидрогеологического массива формируются напоры, которые постепенно уменьшаются с глубиной. Такое сочетание природных условий создает нисходящее направление подземных вод в районе проектируемых горных выработок. А в зонах разгрузки (реки Енисей и Кан), напротив, наблюдается рост напоров с глубиной, и как следствие, восходящее направление потока подземных вод (Рис.15, 16).

По условиям обводненности в геологическом разрезе участка исследований можно выделить следующие гидрогеологические подразделения [25]:

- 1) локально обводненный горизонт четвертичных покровных отложений;

2) относительно водоносную зону экзогенной трещиноватости раннеархейских пород;

3) слабопроницаемую зону раннеархейских пород.

Водонепроницаемая зона начинается с глубин 50...150 м. Коэффициенты фильтрации основного объема зоны, вскрытой скважинами, не превышают 0,0005 м/сут. В отдельных интервалах коэффициент фильтрации может повышаться до сотых и даже до первых десятых долей м/сут. В целом, интервалы увеличенной проницаемости не имеют безусловной корреляционной связи ни с петрографическим составом пород, ни с зонами тектонических и магматических контактов.

В таблице 2 приведено изменение осредненных фильтрационных параметров по глубине. Более детально эти параметры рассмотрены в главе 2.4.

Таблица 2. Изменение фильтрационных параметров по глубине

Зона	Глубины, м	Значение k_f для массива, м/сут	Значение k_f , м/сут	Эффективная пористость, %
1	0–150	0,001–0,09	0,01–0,9	0,4–0,6
2	150–1000	10^{-5} –0,001	10^{-4} –0,09	0,3–0,5
3	>1000	10^{-9} – 10^{-6}	$<10^{-5}$ (чаще $<10^{-7}$)	нет данных

Питание водонепроницаемой зоны происходит за счет перетока подземных вод из вышележающих интервалов по сложной схеме экзо- и эндогенной трещиноватости и микропорам. Разгрузка происходит за пределами изученного участка в смежные гидрогеологические подразделения.

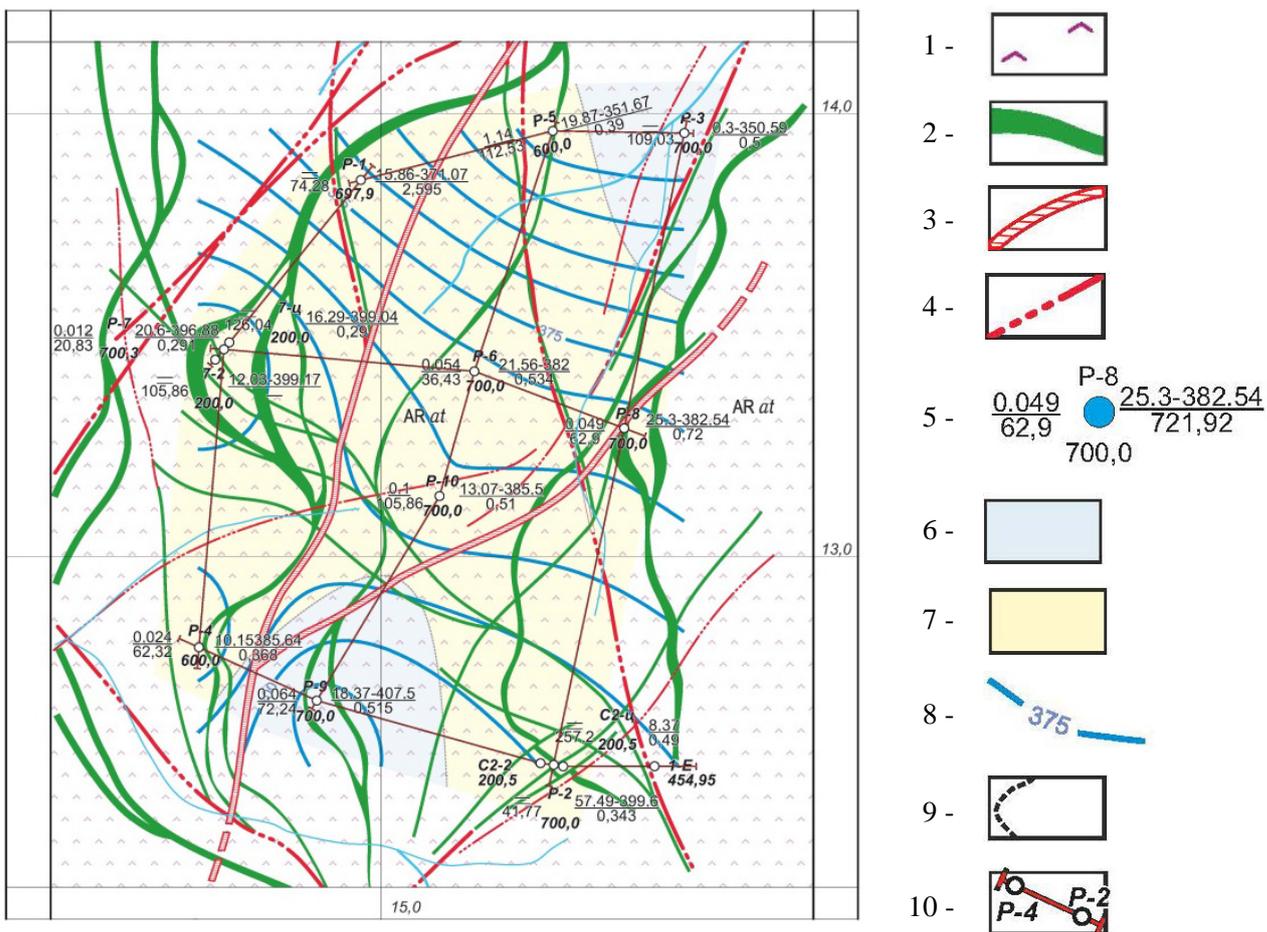


Рисунок 15. Схематическая гидрогеологическая карта участка «Енисейский»

Условные обозначения

к рисунку 15 «Схематическая гидрогеологическая карта участка Енисейский»

Распространения гидрогеологических подразделений и структурных элементов. 1 – Зона слабопроницаемых и водонепроницаемых раннеархейских пород. Гнейсы, плагиогнесы, кристаллические сланцы. 2 – дайки первого и второго внедрения. Метадолериты, долериты, габбро-диабазы, диабазовые порфириты, трахидолериты. 3 – Зоны сцементированных тектонических брекчий древнего заложения. 4 – Постметаморфические разрывные нарушения.

Водоупункты. 5 – Скважина. Вверху номер. Слева в числителе дебит, л/сек, 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.

Гидрогеодинамические элементы. 6 – Зона слабоводопроницаемых пород. Коэффициент фильтрации 0,005 – 0,3 м/сут. 7 – Зона водонепроницаемых пород. Коэффициент фильтрации <0,005 м/сут. 8 – Гидроизогипсы на 30.03.11 г.

Прочие знаки. 9 – Граница зон различной проницаемости. 10 – Линия гидрогеологического разреза.

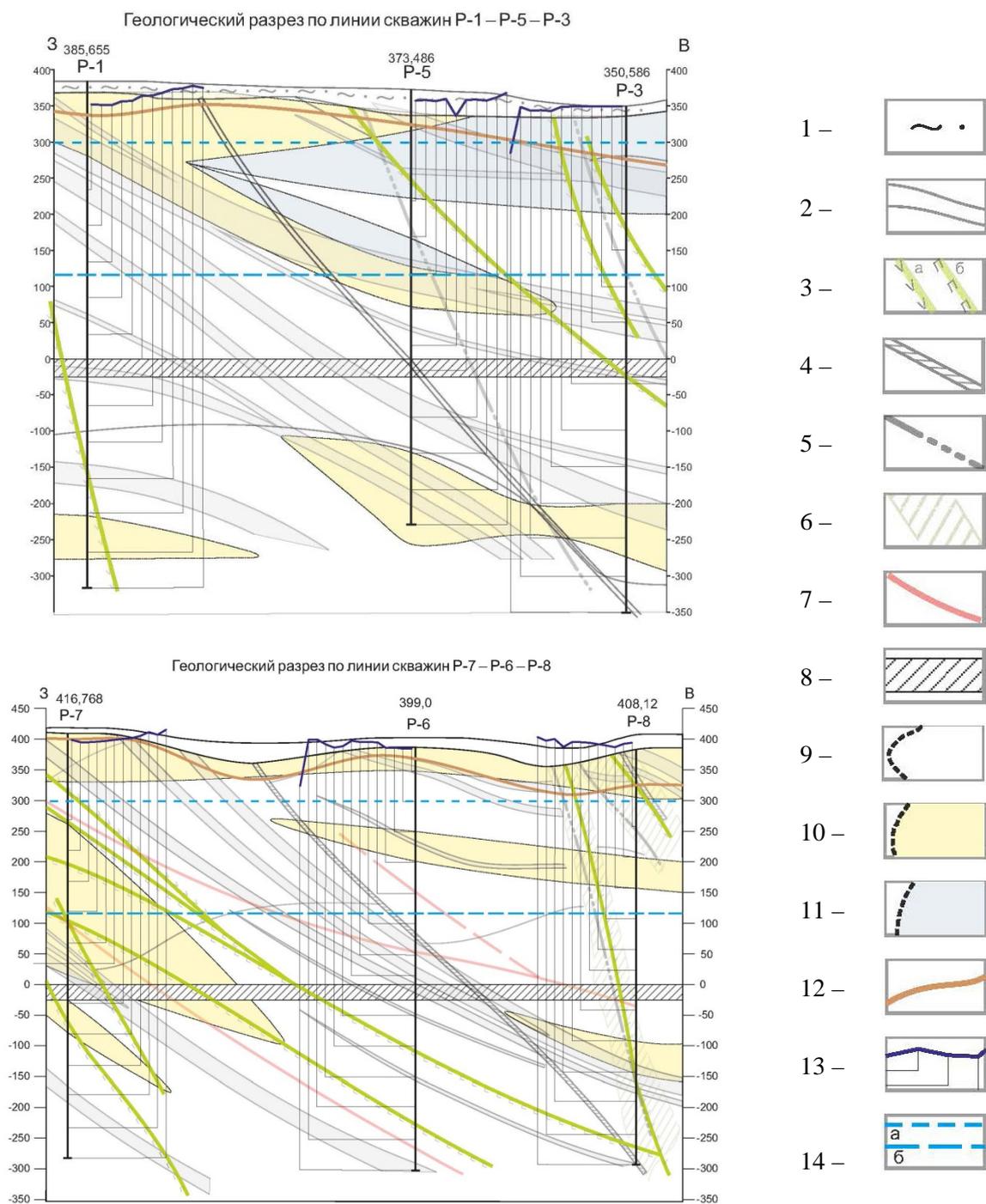


Рисунок 16. Схематический гидрогеологический разрез участка Енисейского

Условные обозначения

к рисунку 16 «Схематический гидрогеологический разрез участка Енисейского»

1 – Четвертичные суглинки, пески и супеси. 2 – Дайки долеритов и габбро-диабазов первого этапа внедрения. 3 – Внемасштабные дайки габбро-диабазов и диабазовых порфириров второго этапа внедрения: (а – габбро-диабазов, б – порфириров).

4 – Зона цементированных брекчий раннего этапа разрывных дислокаций. 5 – Разрывные нарушения с открытой трещиноватостью. 6 – Зоны брекчирования пород на контактах трассирующих их даек второго этапа, с проявлениями продуктов метасоматоза и жильных образований кварц-полевошпатового состава. 7 – Зоны поздних (рифейских?) немасштабных (мощностью до первых метров) тектонических брекчий, цементированных преимущественно кварц-микроклиновым материалом. 8 – Целевой горизонт.

Степень водопроницаемости (по коэффициенту фильтрации Кф):

неводопроницаемые породы: 9 – Кф менее 0,001 м/сут. 10 – Кф от 0,0011 м/сут до 0,005 м/сут; слабоводопроницаемые породы: 11 – Кф от 0,0051 м/сут до 0,3 м/сут; 12 – нижняя граница экзогенной трещиноватости; 13 – уровень воды в скважинах по интервалам. 14 – базис дренирования: а) местный базис дренирования р. Шумиха на северной рамке участка, б) региональный базис дренирования р. Енисей.

2.3.2 Общая характеристика гидрогеологических условий

Локально обводненный горизонт четвертичных эллювиально-деллювиальных отложений (edQ) распространен с поверхности до глубины 6- 31 м, выдержанного по площади горизонта не образует. Водовмещающие отложения представлены суглинками, супесями и песками с включением дресвы и щебня мощностью от 5-6 м на склонах до первых десятков метров на плоских водоразделах и в долинах логов. Целиком эллювиально-деллювиальные отложения обводнены в периоды снеготаяния и затяжных дождей. Химический состав подземных вод обусловлен непродолжительным периодом фильтрации атмосферных осадков в характеризующей зоне.

Естественная радиоактивность подземных вод горизонта находится ниже аналитической чувствительности (α -активность $<0,01$ Бк/л; β -активность $<0,1$ Бк/л)

Относительно водоносная зона экзогенной трещиноватости раннеархейских пород (AR²) выделяется в верхней части разреза до глубины 50 – 150. В пределах зоны распространены биотитовые и силлиманит-кордиерит-биотитовые плагиогнейсы, биотит-кварц-плагиоклаз-кордиеритовые и плагиоклаз-биотит-кварцевые кристаллические сланцы с секущими их дайками долеритов и габбро-диабазов. Гидрогеологическое подразделение приурочено к зоне распространения открытой экзогенной и эндогенной трещиноватости в этих породах, определенной по керну скважин.. Содержит трещинные и трещинно-жильные воды.

Питание подземных вод характеризуемой зоны происходит за счет атмосферных осадков. Основное направление транзита – горизонтальное, вертикальное, нисходящее имеет подчиненное значение. Разгрузка происходит преимущественно в долинах ручьев, значительно меньше - в подстилающую толщу массивных пород.

В выделенной зоне распространены гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 0,1-0,3 г/дм³, показатель рН составляет 6,8-8,9, общая жесткость не превышает 5 °Ж, содержание нитрат-иона не превышает 2 мг/дм³ содержание хлоридов находится в пределах 2-50 мг/дм³, общее содержание железа достигает 2,5 мг/дм³, аммония до 13 мг/дм³, определение свободной углекислоты при проведении общего химического анализа показало ее содержание в пределах 1- 26,4 мг/дм³.

Естественная α -активность подземных вод зоны имеет аналитически значимые концентрации в 60% проб (3 анализа из пяти), в остальных пробах она находится ниже аналитической чувствительности (<0,01 Бк/л). Средняя α -активность подземных вод зоны равна 0,1 Бк/л, значимые уровни активности колеблются от 0,06 до 0,4 Бк/л.

Естественная β -активность имеет аналитически значимые концентрации в 40% проб (2 анализа из пяти). Средняя β -активность подземных вод зоны равна 0,09 Бк/л, значимые уровни активности колеблются от 0,14 до 0,29 Бк/л.

Водонепроницаемая зона раннеархейских пород (AR¹) начинается с глубины 50-150 м. Характеризуемая зона сложена довольно монолитным блоком переслаивающихся разновидностей архейских высокопрочных гнейсов и кристаллических сланцев с внедрившимися и претерпевшими изменения вместе с вмещающими породами дайками габбро-диабазов. К этому гидрогеологическому подразделению относятся подземные воды во всех разновидностях пород, распространенных на поисковом участке, т.к. их водопроницаемость, по-видимому, не имеет прямой связи с петрографической принадлежностью.

В водонепроницаемой зоне ограничено распространены трещинно-жильные и поровые подземные воды.

Питание выделенного гидрогеологического подразделения происходит за счет перетока подземных вод из водоносной зоны экзогенной трещиноватости. транзит подземных вод за счет поровой проницаемости, по-видимому, происходит в вертикальном нисходящем направлении, а трещинная проницаемость контролирует движение подземных вод в латеральном направлении на север. При этом с возрастанием глубины залегания массивных пород происходит снижение градиентов напора и, соответственно, скоростей фильтрации.

Подземные воды характеризуемой зоны по проведенным аналитическим определениям имеют минерализацию от 0,3 до 3,8 г/дм³. По всему разрезу состав воды гидрокарбонатный кальциево-магниевый с минерализацией 0,3-0,52 г/дм³.

По аналитическим исследованиям показатель рН составляет 6,9-9,1, общая жесткость не превышает 3 °Ж (за исключением пробы отобранной при глубине скважины 155,7 м), содержание нитрат-иона не превышает 1 мг/дм³, содержание хлоридов находится в пределах 5,2-2054 мг/дм³, общее содержание железа достигает 15,2 мг/дм³, аммония не превышает 1 мг/дм³, определение свободной углекислоты при проведении общего химического анализа показало ее содержание в пределах 0-30,8 мг/дм³,

Естественная радиоактивность подземных вод зоны изучена в одной пробе, она равна 0,14 Бк/л для α-активности и 0,15 Бк/л для β-активности.

По-видимому, с глубиной естественная радиоактивность подземных вод несколько увеличивается, хотя ни в одном случае она не превышает питьевых ПДУ [20].

2.3.3 Условия формирования подземных вод

В ходе изучения изотопного состава трещинных и поровых вод Нижне-Канского массива получены указания на то, что два основных фактора определяют циркуляцию подземных вод:

во-первых, – это быстрое затухание трещиноватости с глубиной;

во-вторых, – существенное влияние климатических условий на формирование и движение воды в кристаллическом массиве.

В период последнего похолодания 12–100 тыс. лет назад массив, по-видимому, неоднократно промораживался. На поверхности земли в эти периоды господствовали сухие холодные климаты, близкие к условиям современных арктических пустынь. Сумма осадков была весьма мала, а в самом массиве, из-за наличия мерзлоты, в эти периоды наступала стагнация подземных вод.

В периоды потепления, в том числе, в голоцене массив размораживался и мерзлота таяла. Однако, вследствие общей относительно малой проницаемости вмещающих пород, замены ранее поступивших вод свежими инфильтрационными водами не происходило.

В настоящее время в приповерхностной зоне массива до глубин 100–150 м преобладают современные воды. Далее на глубинах 150–350 м обнаруживаются воды с изотопным составом и признаками, указывающими на их происхождение из талой мерзлоты, по-видимому, относящейся к последнему максимуму оледенения, имевшему

место около 20 тыс. лет назад. Еще глубже (максимальная глубина опробования – 700 м) расположена зона изотопически легких вод, поступивших в массив, вероятнее всего, во время последнего ледникового периода 20–100 тыс. лет назад. Расчетная среднегодовая температура воздуха в период их формирования составляла приблизительно $-9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (современная среднегодовая температура в г. Красноярске $t = -6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). В поровой системе гнейсов обнаружены воды, являющиеся, по изотопным признакам, остатками от замерзания. Их начальный изотопный состав позволяет оценить среднегодовую температуру в период их формирования величиной $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вероятнее всего эти воды поступили в массив в период предпоследнего микулинского межледниковья, которое было существенно теплее нынешнего [25].

2.4 Опытнo-фильтрaционные работы

Опытнo-фильтрaционные работы проводились для изучения водопроницаемости отложений, слагающих оцениваемый участок, определения предварительных расчетных гидродинамических параметров, оценки изменчивости фильтрaционных свойств отложений в разрезе, а также для отбора проб воды для проведения химического анализа.

Комплекс опытнo-фильтрaционных исследований производился во всех пробуренных скважинах. В зависимости от водообильности пород, до глубины 150 м в процессе проведения буровых работ проводились поинтервальные (через ~ 50 м) пробные откачки, или, в случае вскрытия безводных отложений, производилось экспресс-опробование. Ввиду низких фильтрaционных свойств, продолжительность пробных откачек не превышала 1 суток и определялась получением расчетной прямой на графике прослеживания снижения уровня построенного в координатах S-Igt. В конце откачки и желонирования отбиралась проба воды для производства полного химического анализа (ПХА), спектрального анализа сухого остатка (САСО) и определения α - и β -активности. После прокачки проводились наблюдения за восстановлением уровня до статического либо до его стабилизации. Длительность восстановления достигала 3 суток.

Для получения данных о пьезопроводности условно водоносных зон, распространенных на изучаемой площади были выполнены опытные откачки на специально подготовленных кустах скважин в районе скв. Р-2 и Р-7. Кусты однолучевые, центральная и дальняя наблюдательная скважина куста имели глубину 200 м, с целью безусловного опробования зоны экзогенной трещиноватости. В качестве ближней наблюдательной скважины использовались поисковые скважины Р-2 и

Р-7 соответственно. Расстояние между центральной и наблюдательными скважинами было при откачке принято минимально возможным, при котором деформация плоскорадиального потока не оказывала бы критического влияния на положение уровня.

2.4.1 Методика проведения ОФР

Рассмотрим типовые условия проведения опытно-фильтрационных опробований на примере скважин Р-11, Р-12 и Р-13, пробуренных в 2013 г. В этих скважинах производились поинтервальные опробования гнейсовой формации архейского возраста при помощи разжимных пакеров, смонтированных на буровом снаряде. Как правило, до глубины 200 м интервалы испытания составляли около 10 м, ниже длина увеличивались до 50 м. Концептуальная схема проведения эксперимента представлена на рисунке 17. После установки испытательной колонны труб производились замеры уровня воды собственно в колонне и затрубном пространстве.

Ввиду слабой обводненности пород, основным опытным режимом являлась относительно кратковременная откачка (посредством желонирования продолжительностью несколько часов) с последующим достаточно длительным (до 1–3 суток) наблюдением за восстановлением уровня воды в опробуемом интервале. Желонирование скважин проводилось с помощью желонки объемом 10–12 л и лебедки бурового станка. Замеры уровня выполнялись с обычной частотой замеров при выполнении откачек. Восстановление длилось до стабилизации уровня, отметки которого, однако, часто не совпадали с ненарушенным режимом (до откачки/желонирования). Контроль герметичности пакера производился с помощью замеров уровня в затрубном пространстве. Дополнительно необходимо обратить внимание на различия диаметров водоприемной части скважины и колонны, где проводились замеры уровня, что должно учитываться при интерпретации опытов.

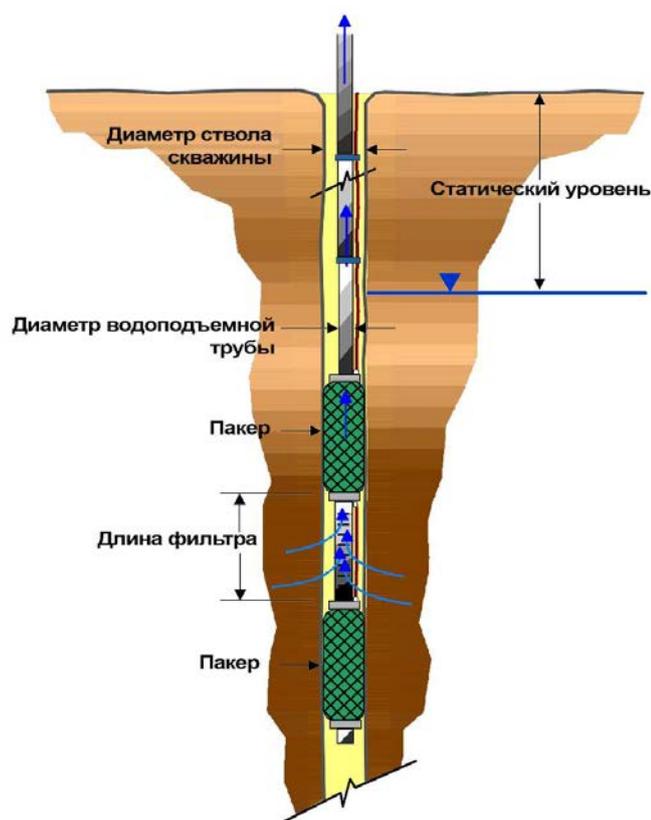


Рисунок 17. Схема пакерного эксперимента

Для скважины Р-13 часть интервалов опробовалась методом откачки-налива. Суть метода заключалась в том, что после отбора воды проводилось восстановление уровня в течение 3 часов, после чего часть откачанной воды заливалась в скважину до устья и проводились наблюдения за снижением уровня до стабилизации уровня [21].

В табл. 3 представлены типовые условия, в которых проводились опытно-фильтрационные работы.

Таблица 3. Типовые условия проведения ОФР для скважин Р-11, Р-12, Р-13

Параметры	Значение
Расход, л/с	0,05–0,3
Длительность откачки, час	0,5–1,5
Максимальное понижение,	25–70
Длительность восстановления, сут	1–2
Диаметр фильтра, мм	95,6
Длина фильтра, м	10–50
Диаметр водоподъемной трубы, мм	69,9–88,9
Глубина скважины, м	до 530

2.4.2 Анализ результатов опытно-фильтрационных работ

Данные о фильтрационно-емкостных свойствах пород участка «Енисейский» получены по результатам многочисленных поинтервальных откачек (наливов), проведенных с использованием разжимных пакеров, смонтированных на буровом снаряде [20, 22, 23]. В большинстве скважин величина интервала опробования составила 50 м, однако в скважинах, пробуренных на заключительной стадии гидрогеологических работ (Р-11, Р-12, Р-13) верхняя часть разреза исследована более детально – с интервалом 10 м. Начиная с глубины 200 м и до забоя длина испытываемого интервала скважины составляла уже 50 м. ОФР представлены в основном кратковременными откачками (желонированием) продолжительностью несколько часов с последующим длительным наблюдением за восстановлением уровней воды в опробуемом интервале. Изоляция опробуемого интервала контролировалась путем измерения уровня в затрубном пространстве.

В районе скважины Р-11 выполнено четыре кустовые откачки длительностью около 3-х суток, в районе скважины Р-12 – одна кустовая откачка. В первом случае наблюдательные скважины по окончании откачки из скважины Р-11 использовались в качестве центральных при проведении следующих откачек. В скважине Р-13 часть интервалов опробовалась методом откачки-налива, при котором по окончании отбора воды в течение 3 часов прослеживалось восстановление уровня, после чего часть откаченной воды заливалась в скважину до устья и проводилось наблюдение за снижением уровня. Интерпретация результатов производилась с использованием схем и решений, учитывающих несовершенство скважины по степени вскрытия водоносного горизонта и ее емкость.

Обработка опробований велась несколькими способами (Решения Nguyen и Pinder, Jacob, Bouwer-Rice, Cooper-Bredehoeft-Papadopoulos и др. [20, 22, 23]).

Вскрытая скважинами часть разреза до глубины 500–700 м по преобладающим величинам коэффициента фильтрации относится к неводопроницаемой по ГОСТ 25100-95 ($k < 0,005$ м/сут). Медианные значения по 13-и скважинам находятся в диапазоне от 0,00014 до 0,0033 м/сут.

В верхней части кристаллического массива выделяется относительно водопроницаемая зона с повышенными значениями коэффициента фильтрации. Медианное значение k до глубины 100 м по всем скважинам составляет 0,003 м/сут, тогда как в интервале глубин 100–700 м – 0,0004 м/сут. Гистограмма распределения коэффициентов фильтрации, приведенная на рис. 18, показывает, что наиболее часто встречаемые значения находятся в диапазоне 0,00025–0,0005 м/сут.

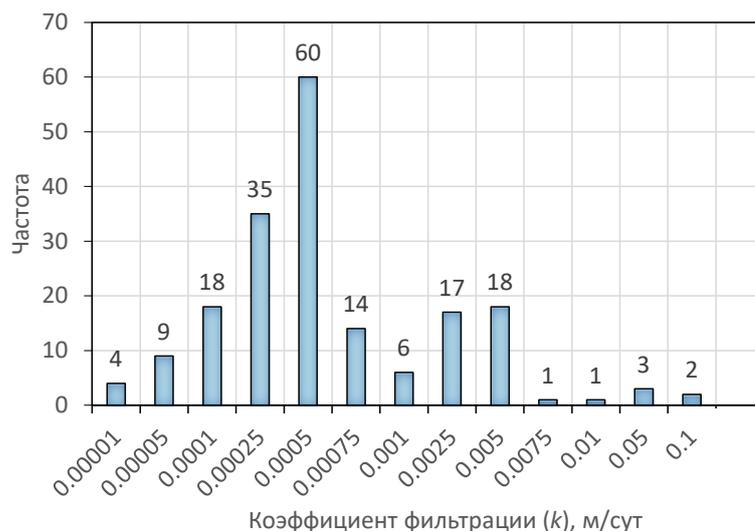


Рисунок 18. Гистограмма распределения значений коэффициента фильтрации

Важно отметить, что в условиях весьма низкой проницаемости пород результаты экспресс-опробований характеризуют локальную зону вблизи скважины. Как показано в работе [24], при коэффициентах фильтрации $n \cdot 10^{-4}$ м/сут радиус данной зоны составляет 3–5 м, а при значениях $n \cdot 10^{-3}$ – 20–30 м.

Результаты кустовых откачек в целом подтверждают низкие фильтрационные свойства породного массива, сведения о которых получены на ранних стадиях изысканий и согласуются с данными экспресс-опробований, по результатам которых суммарная водопроницаемость массива (скв. Р-1–Р-3) составляет 0,36–1,71 м²/сут.

Наиболее отчетливо связь коэффициента фильтрации с глубиной прослеживается интервалах опробования до глубины 150–250 м по скважинам Р-11, Р-12, Р-13 (см. рисунок 19, левый), в которых проведено детальное опробование верхней (водоносной) зоны. Ниже указанных глубин значения k стабилизируются. В скважинах, пробуренных на поисковой и оценочной стадиях (Р-1–Р-10) детального фильтрационного опробования верхней части разреза не выполнялось, однако по ним также видно, что начиная с глубины 150 м связь k с глубиной практически отсутствует (см. рисунок 19, правый). По-видимому, это связано с убывающим по мере удаления от поверхности количеством гидродинамически взаимосвязанных трещин и снижением степени их раскрытия, что также способствует постепенному затуханию интенсивности водообмена. Целевой интервал, расположенный на глубинах 400–500 м по данным опытно-фильтрационных работ приурочен к неводопроницаемой зоне, медианное значение k составляет $4 \cdot 10^{-4}$ м/сут. Несмотря на то, что экспресс опробования затрагивают только локальную зону вблизи скважины, отсутствие существенной вариации фильтрационных параметров ниже

глубины 200 м говорит о возможности применения результатов ОФР ко всей площади участка изысканий.

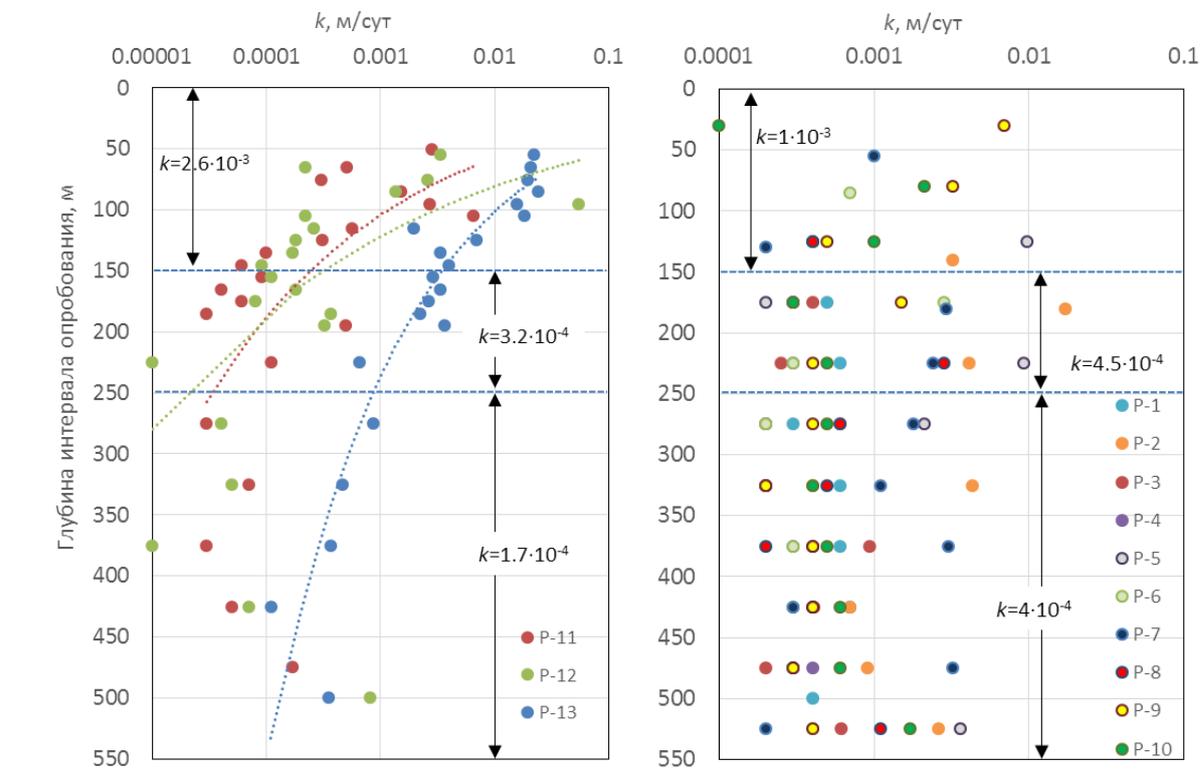


Рисунок 19. Изменение коэффициента фильтрации (k) с глубиной

Реакция наблюдательных скважин, расположенных на расстоянии 7–60 м от центральной (P-11) в ходе кустовой откачки указывает на наличие гидродинамической связи отдельных водопродводящих зон (каналов). С другой стороны, при кустовой откачке в районе скважины P-12 понижения уровня в наблюдательных скважин, находящихся на удалении 156–162 м не отмечено. Учитывая это можно предположить, что плановые размеры структурных «блоков», в пределах которых зоны трещиноватости имеют хорошую гидравлическую связь не превышают 100–200 м.

В субвертикальном направлении (вкrest полосчатости гнейсов) фильтрационное сопротивление пород оказывается выше, чем в горизонтальном. На это указывает слабая в целом реакция уровней подземных вод в смежных с опробуемыми интервалах в большинстве скважин. Профильные размеры гидравлически относительно изолированных структурных элементов массива, скорее всего не превышает первых десятков метров. Разобщенность отдельных блоков (зон трещиноватости) также подтверждается многочисленными случаями невосстановления уровня подземных вод после фильтрационного опробования.

Объемная диаграмма на рисунке 20 дает общее представление о характере распределения коэффициента фильтрации в исследуемой части массива пород. Она построена путем интерполяции методом обратных взвешенных расстояний (IDW) значениями k между опробуемыми интервалами на трехмерной сетке.

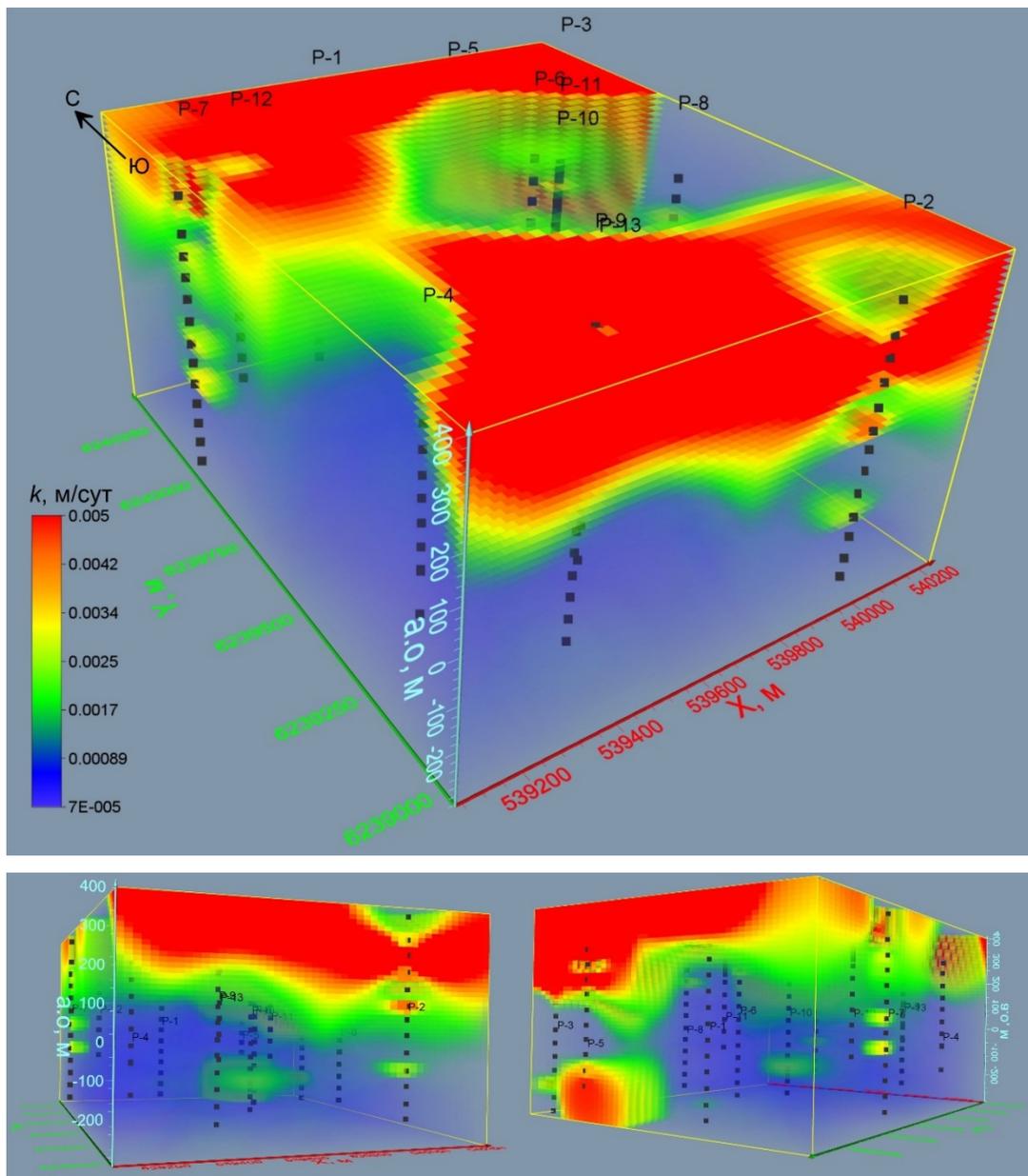


Рисунок 20. Пространственное распределение коэффициента фильтрации

Как видно, водопроницаемые участки массива со значениями $k > 0,005$ м/сут (на рисунке обозначены красным цветом) развиты в верхней части разреза до глубины 100–200 м, не выдержаны по мощности и простиранию. Породный массив на уровне целевого интервала (0–25 м БС) являются водонепроницаемым. Отдельные локальные участки с несколько повышенными значениями k (0,001–0,005 м/сут), встреченные ниже

водоносной зоны экзогенной трещиноватости, имеют спорадическое распространение и, вероятно, гидравлически между собой не связаны.

Глава 3. ИЗУЧЕНИЕ ТРЕЩИННОЙ СТРУКТУРЫ И СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ МАССИВА

3.1 Обзор классификаций нарушений сплошности среды

3.1.1 Инженерные классификации нарушений сплошности

Отечественная инженерная классификация нарушений сплошности скального массива выполняется на основании как протяженности трещин, так и по величине раскрытия трещин и соответствует методическим рекомендациям по оценке склонности рудных и нерудных месторождений к горным ударам, утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 мая 2013 г. № 216 (табл. 4).

Таблица 4. Российская классификация по характеру нарушения сплошности массива

Порядок	Характер нарушения сплошности массива	Мощность ЗД или ширина трещин	Протяженность нарушения
I	Разломы глубинные, сейсмогенные	n·100 - n·1000 м	n·100 - n·1000 км
II	Разломы глубинные, несейсмогенные и частично сейсмогенные	n·10 - n·100 м	n·10 - n·100 км
III	Разломы	n·1 - n·10 м	n·1 - n·10 км
IV	Разломы	n·10 - n·100 см	n·100 - n·1000 м
V	Трещины крупные	2 - 10 см	10-100 м
VI	Трещины средние	10 - 20 мм	1-10 м
VII	Трещины мелкие	2 -10 мм	0,1-1 м
VIII	Трещины тонкие	1 - 2 мм	<0,1 м
IX	Трещины локальные	< 1 мм	< 1 м

Схожая инженерная классификация имеется за рубежом (см. таблицу 5). В рамках зарубежной классификации нарушения сплошности массива ранжируются с первого по седьмой порядок, при этом длина трещин и разломов варьируется от 10 км до <0.1 м, интервал расстояний между нарушениями от 1 км до 0.01 м, мощность нарушений (мощность зон дробления, или ширина трещин) от 100 до 0.00001 м. Кроме того, в классификации учитываются физико-механические показатели: водопроницаемость, степень заполнения трещин и прочность на скол.

Таблица 5. Зарубежная классификация по характеру нарушения сплошности массива [35].

Порядок	Геометрия			Свойства	
	Протяженность, м	Расстояние м/у зонами, м	Мощность/ширина, м	Проницаемость	Прочность
I	>10 000	>1 000	>100	Оч. высокая, высокая	Оч. низкая
II	1000 - 10 000	100 – 1 000	10 - 100	Высокая, средняя	Низкая
III	100 – 1 000	10 - 100	1 - 10	Средняя	Средняя, высокая
IV	10 - 100	1 - 10	< 0.01	Низкая, средняя	Средняя, высокая
V	1 – 10	0.1 - 1	< 0.001	Низкая	Высокая
VI	0.1 -1	0.01 - 0.1	<0.0001	Оч. низкая	Оч. высокая
VII	< 0.1	< 0.01	< 0.00001	Нет	Оч. высокая

Авторы зарубежной классификации подчёркивают, что зачастую нарушения сплошности третьего и более высоких порядков не могут быть обнаружены вплоть до этапа строительства или начала захоронения радиоактивных отходов. Кроме того, делается вывод, что нарушения четвертого и третьего порядков наиболее важны при проектировании подземных захоронений [33,35], так как совокупность именно таких нарушений определяет водо- и газо- проницаемость горного массива в целом.

При этом авторы отмечают, что наличие трещин более низких порядков (меньше III) недопустимо в пределах, где предполагается размещение подземных захоронений РАО. Нарушения первого – третьего порядков представляют собой зоны активного массопереноса подземных вод и служат вероятными участками тектонических подвижек в блоках горных пород.

3.1.2 Геологические классификации трещин

Наряду с инженерной классификацией зон дезинтеграции существуют геологические классификации, которые разделяют типы трещин по характеру сил, приведших к их возникновению, или по генезису.

По характеру сил, трещины разделяются на 2 крупные группы: трещины скалывания и трещины отрыва [10].

Трещины отрыва образуются в плоскости, параллельной сжимающим силам и перпендикулярной растягивающим силам, когда величина последних превышает предел прочности породы на отрыв. В момент образования эти трещины открыты. Вдоль стенок трещин отрыва наблюдается только небольшие смещения, т.к. перемещение породе направлено перпендикулярно к стенкам трещины. Размеры трещин отрыва колеблются в

широких пределах – от микроскопических (не видимых глазом) до нескольких десятков сотен метров в длину, при ширине открытия от мм до м. К трещинам отрыва часто приурочены дайки магматических пород, рудные и нерудные жилы. Они могут быть коллекторами нефти и газа, подземных вод. Открытые трещины отрыва часто водоносны и нередко они обуславливают большой приток подземных вод к горным выработкам.

Трещины скалывания возникают вдоль плоскостей, в которых действуют максимальные скалывающие напряжения, когда величина последних превышает предел прочности породы на сдвиг. Эти трещины теоретически располагаются под углом 45° к сжимающим и растягивающим силам, образуя сопряженные системы трещин скалывания. В момент образования трещины скалывания были закрытыми. Вдоль стенок трещин скалывания при их образовании происходит некоторое смещение блоков пород, о чем свидетельствуют следы перемещения на стенках трещин: глина трения, штрихи, борозды, ступени скольжения, зеркала скольжения. В результате перемещения вдоль трещины может возникнуть тектоническая брекчия, могут смещаться геологические границы. Трещины скалывания часто имеют большую протяженность и обычно образуют системы трещин. Трещины скалывания, как правило, не водоносны или слабоводоносны, водопроницаемость по ним небольшая. В процессе рудообразования и магматизма сколовые трещины могут приоткрываться и вмещать рудные жилы и дайки магматических пород.

В генетических классификациях, наиболее полной является классификация трещин И.И. Амосова и И.Е. Еремина (см. таблицу б) в которой отражены процессы, вызывающие возникновение трещин того или иного генезиса, характеристика поверхности этих трещин.

Таблица 7. Генетическая классификация трещин [11]

Трещины по генетическому типу	Подтипы трещин	Основные геологические факторы, вызвавшие образование трещин	Характер действующих напряжений при разрыве	Основные направления трещин по отношению к слоистости	Излом			Характер поверхности трещин
					По основной плоскости	По торцу	тангенциальный	
Эндогенные	-	Метаморфизм	Растяжение	Перпендикулярное (или почти перпендикулярное)	Ровный	Неровный – зубчатый, раковистый	Ступенчатый, черепичный, чешуйчатый	Онороная, глазковая, овально-глазковая, ленточная, табличная
Экзогенные	Скалывания	Метаморфизм	Сжатие	Разнообразное (от 0 до 90°)	Разнообразный – от ровных гладких до неровных различно штрихованных и струйчатых			Зеркальная, штриховая, волнистая
	Отрыва	Тектоника	Растяжение	Перпендикулярное (или почти перпендикулярное)	Неровный	Ступенчатый		Неинородная, бугорчатая
Гипергенные	-	Выветривание		Разнообразное	Неровный			

3.2 Методы и результаты исследования трещинной структуры гнейсового массива участка «Енисейский»

Как уже отмечалось, участок «Енисейский» приурочен к блоку относительно монолитных пород, ограниченному двумя субмеридиональными разломами (Атамановским и Правобережным), и двумя диагональными по отношению к ним субширотными разломами (Байкальским и Шумихинским). Это – структуры 2 порядка. Настоящий раздел посвящен дальнейшей детализации структуры массива в пределах выделенного блока, где, согласно классическим представлениям об иерархической организации геологических объектов, должны выделяться структуры более высоких (3–5) порядков.

3.2.1 Характеристика фактического материала и подходы к его систематизации

3.2.1.1 Геолого-структурные элементы, характеризующие нарушения сплошности массива и создание базы данных (БД)

Геолого-структурные особенности массива пород в пределах выделенного блока определяются наличием:

- тектонических (тектоно-метасоматических) брекчий;
- интрузивных тел в виде магматических даек нескольких генераций, трассирующих разрывные нарушения в гнейсовом массиве;
- зон тектонической постмагматической дезинтеграции массива.

Все эти геологические объекты, так или иначе, связаны с нарушением сплошности гнейсового массива, имевшим место на различных этапах геологического развития территории. Наиболее древние из них имели связь с магматическими очагами, что, с одной стороны, способствовало формированию новых геологических объектов посредством заполнения тектонических зон магматическим расплавом или метасоматоза (дайки и зоны брекчирования), с другой стороны, вмещающие гнейсы вблизи тектонических нарушений претерпевали дополнительные метасоматические изменения.

Крупные зоны брекчирования, как результат ступенчатых надвигов пород, были заложены на самом раннем древнем («до-даечном») этапе формирования массива.

Несколько позже по сети разрывных нарушений произошло внедрение магматических расплавов, сформировавших дайковые тела как минимум двух генераций.

Мощных тектонических движений в более поздний постмагматический период не происходило. Возникновение сдвиговых напряжений при тектонических подвижках, приведших к дезинтеграции массива (формированию зон повышенной трещиноватости и дробления), могли унаследовать пространственную ориентацию древних структур.

Собственно вмещающие гнейсы представляют собой антиклинальную структуру с полого-падающими крыльями, ось которой полого погружается на северо-запад. В процессе метаморфизма возникли разнообразные пликативные структуры и первичная (нетектоническая) трещиноватость. Верхняя часть разреза до глубин 100–180 м была подвержена экзогенным процессам физического и химического выветривания, что обусловило повышенную степень раздробленности и трещиноватости массива.

Для выделения и типизации геологических объектов использовались данные, полученные в ходе бурения и геологического описания кернового материала, геофизического каротажа, опытно-фильтрационного опробования скважин глубокого бурения, а также изучения кернового материала в лабораторных условиях.

Документация геолого-структурных элементов массива выполнена на основе обработки фотографий и анализа геологических колонок, где метаморфические и магматические образования расчленены по петрографическому составу, охарактеризованы их структурно-текстурные особенности, условия залегания и их взаимоотношения. Необходимо отметить, что по фотографиям без журнала документации керна выделяемые геолого-структурные элементы, в частности, зоны дезинтеграции, не могут быть охарактеризованы в полной мере. В тоже время, при наличии геологических колонок с описанием керна и данных по трещиноватости, такая оценка вполне информативна.

Обработка фактического материала включала перевод в цифровой формат и занесение в базу данных (БД) ряда специфических параметров, зависящих от типа геологического объекта.

Для зон брекчирования более 1 м в БД также указывается один из двух типов:

- а) монолитные,
- б) трещиноватые или раздробленные.

При количественной характеристике указывается мощность таких зон и их положение в разрезе. Материал сопровождается описанием и фотографиями каждой зоны брекчирования мощностью более 1 м.

Для линейных магматических образований основного состава в БД указываются состав, глубины залегания верхнего и нижнего контактов с вмещающими породами, одна из двух генераций:

- а) ранней генерации (комплекс даек габбро-долеритов),
- б) поздней генерации (комплекс даек габбро-диабазов, диабазовых порфиритов и трахидолеритов) [22].

Для зон тектонической дезинтеграции массива указывается один из двух структурно-генетических типов:

- а) зона трещиноватости (рассланцевания),
- б) зона дробления (и, как правило, со следами милонитизации – перетирания по тектоническим контактам).

Для количественного описания трещиноватости (рассланцевания) используется так называемый модуль трещиноватости ($M_{тр}$ – количество трещин на 1 п.м., т.е. размерность м-1), причем к зонам повышенной трещиноватости относятся участки разреза с $M_{тр} > 10-15$ м-1; диапазон более низких значений $M_{тр}$ отвечает «фоновой»/первичной трещиноватости, сформированной литогенетическими процессами без участия тектонических напряжений (раздел 3.2.3.3 - статистика). В БД указывается угол падения трещин (если соответствующие измерения были занесены с журнал).

Для характеристики другого типа дезинтеграции массива (зон дробления) в разведочных скважинах выделялись тектонически раздробленные интервалы (глубины залегания верхнего, h_v , и нижнего, h_n , контактов с ненарушенной породой); соответственно, в БД заносилась мощность элементарной зоны дробления (ЭЗД) $M_{зд} = h_n - h_v$ (м) и собственно текущие значения h_n и h_v , впоследствии пересчитанные на а.о.

Дополнительно определялась суммарная мощность элементарных зон раздробленной породы на каждом 10 метровом участке керновой колонки ($M_{зд10}$). Следуя формальной логике, можно было бы ожидать, что, в идеальном случае (неограниченная протяженность ЭЗД), модуль $M_{зд10}$ коррелирует с проводимостью 10 метрового интервала. Фактически, прямой корреляции значений $M_{зд10}$ и проводимости не наблюдается (см. 2.4.2).

При редактировании сводных таблиц в БД из описания кернового материалы были исключены участки керна в начале и конце каждого интервала проходки скважины, поскольку эти участки были, как правило, представлены частично разрушенными в процессе бурения породами (как следствие вибрации буровой колонки при забурировании и возникновение разрушающих напряжений при отрыве керна в начале подъема бурового

снаряда). Впоследствии влияние техногенного фактора было дополнительно проконтролировано посредством использования геофизического каротажа (раздел 3.2.3).

В таблицы по каждой скважине внесены данные RQD (выход керна в процентах).

Ниже приводятся определения для выделенных зон тектонической дезинтеграции.

Под зоной трещиноватости понимается интервал, в пределах которого все индивидуальные трещины могут быть подсчитаны; они имеют примерно одинаковую пространственную ориентацию (угол и азимут падения). В процессе бурения не применялись специальные технологические приемы для отбора ориентированного керна, что не позволяет оценить истинный азимут падения трещин.

Зона дробления (и милонитизации) – интервал, заполненный кусковидной породой, где выделить отдельные трещины невозможно. Характеризуется небольшими блоками, смещенными и повернутыми относительно первоначального залегания. Значительная часть зон дробления может быть представлена милонитизированными породами. В отдельных интервалах зона дробления полностью представлена милонитами.

Зона брекчирования – интервал пород, подвергшийся вторичным изменениям и характеризующийся наличием обломков и цементирующего материала. Такие зоны, как отмечалось, являются реликтами ранних тектонических деформаций, подвергшихся впоследствии метаморфизму и метасоматическим преобразованиям.

Комплексный геофизический каротаж включал в себя следующие виды работ: 1) ГГК – гамма-гамма каротаж, 2) ГК – гамма каротаж, 3) КС – каротаж сопротивлений (данные пересчитаны в значения электропроводимости), 4) ПС – собственная поляризация, 5) КМВ – каротаж магнитной восприимчивости, 6) расходомерия (статическая или динамическая).

В базе данных для каждого вида каротажа указаны абсолютные отметки точек измерения и полученные в них значения.

Данные лабораторных испытаний образцов породы, включая отобранные из перекрывающих рыхлых отложений, включали четыре десятка параметров.

В созданной базе данных указывались абсолютные отметки отбора образцов, а также значения перечисленных выше параметров в данных точках.

Данные ОФР представлены в форме значений коэффициента фильтрации (k_{ϕ}) – среднее для 50 метрового интервала, и абсолютная отметка его середины.

Описанная база данных в форме ex1-таблиц была интегрирована в графический пакет GRAFER.

Как уже было сказано, роль техногенного фактора, обусловленного бурением, может существенно сместить оценки в определении характера природной дезинтеграции

массива. Поэтому наличие зон повышенной трещиноватости и дробления должна быть проконтролирована независимыми (от визуального описания) методами. Таким методом является геофизический каротаж скважин методом кажущегося электрического сопротивления (КС). Физическая сущность такого подхода заключается в следующем. В процессе бурения буровой глинистый раствор, давление которого на стенку скважины, выше пластового давления жидкости, проникает в массив по зонам повышенной трещиноватости или дробления, создавая в этих зонах области пониженного сопротивления (повышенной электропроводности). Таких областей не формируется, если повышенная раздробленность керна обусловлена техногенным фактором (бурением). Сопоставление данных описания керна, «отфильтрованных» посредством исключения начальных и конечных интервалов бурения, с результатами КС каротажа, показало хорошую подтверждаемость выделенных зон тектонической дезинтеграции массива, о чем будет сказано далее в разделе 3.2.3.1.

3.2.1.2 Дополнительное обследование kernового материала и отбор породных проб

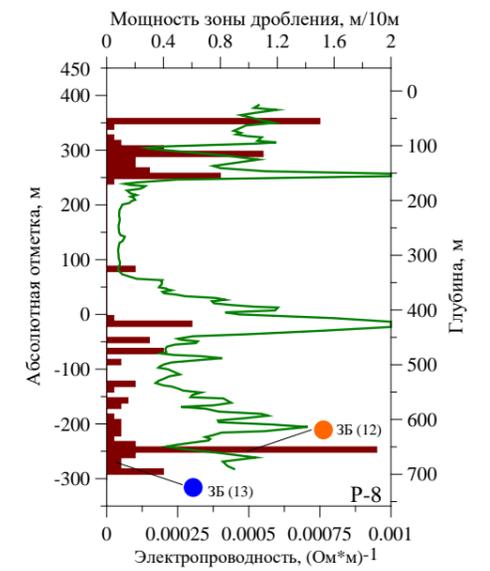
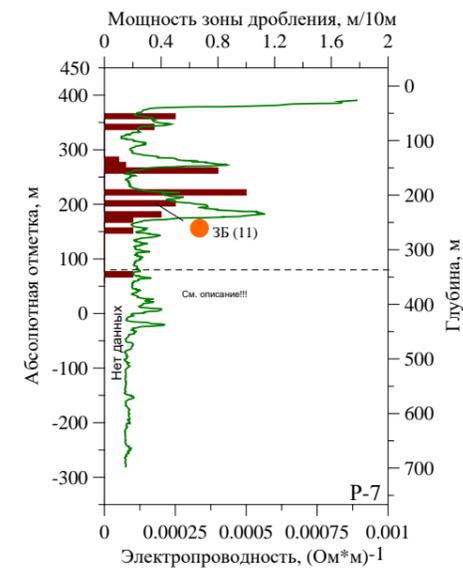
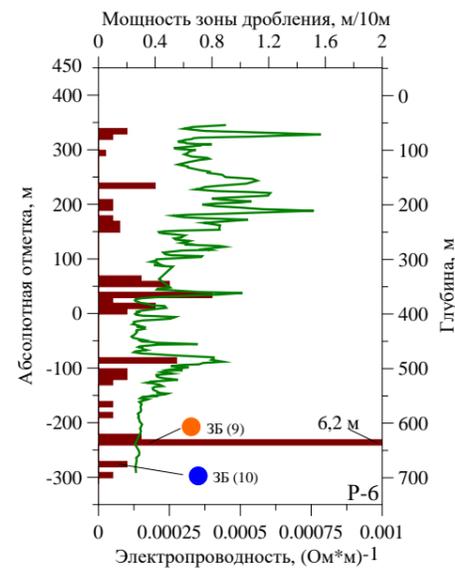
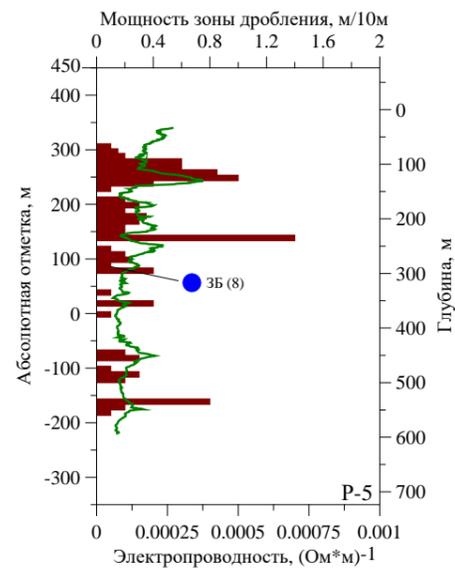
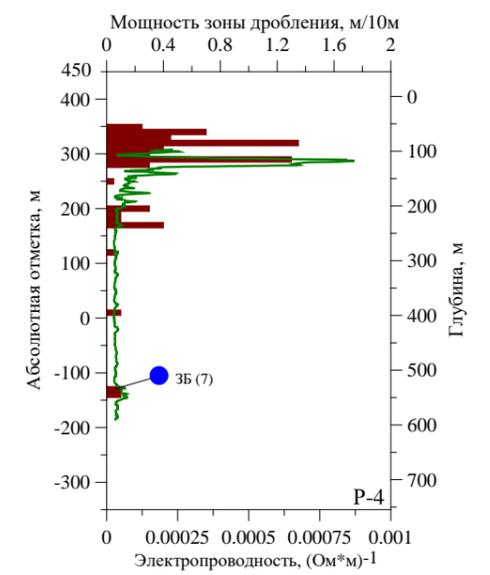
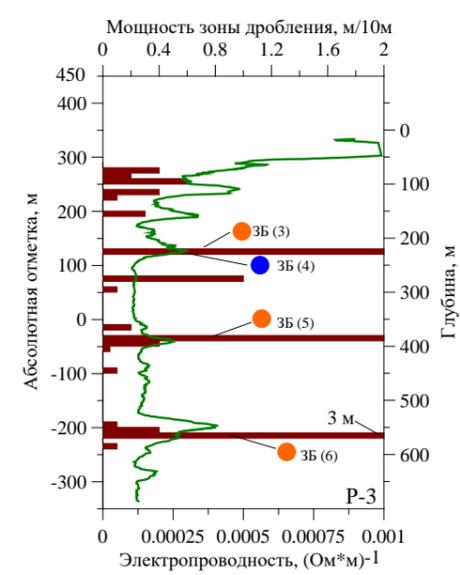
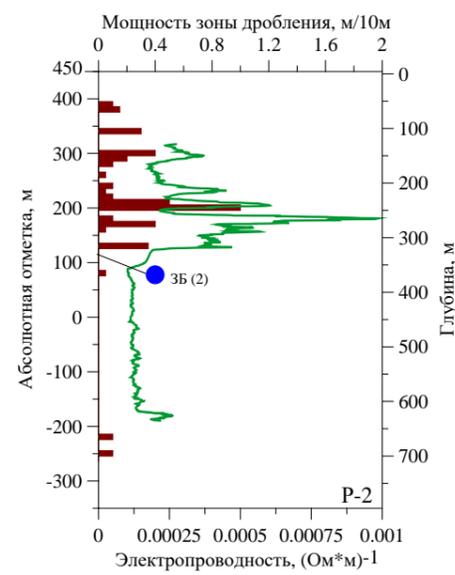
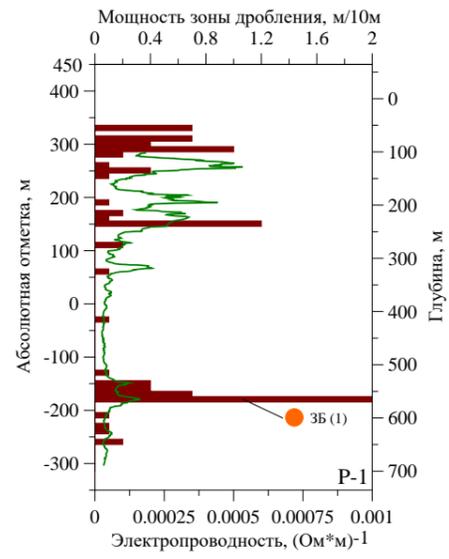
В целях уточнения информации, представленной в геологических колонках по скважинам Р-1–Р-13, дополнительно были отобраны образцы kernового материала из kernохранилища (в ходе кратковременной командировки на объект), представляющий собой фактически весь петрографический набор горных пород на территории участка «Енисейский». В частности, большое внимание было уделено отбору проб из интервалов глубин, характеризующихся повышенной трещиноватостью. Дополнительно, целью посещения kernохранилища была проверка сохранности kernов, а также оценка условий их хранения. В результате, нами было отобрано 19 образцов, представленных гнейсами, долеритами, брекчированными породами, а также материалом в виде щебня из зон дробления. Сохранность керна может быть оценена в целом удовлетворительно, хотя некоторые породы частично подверглись процессам выветривания.

На момент отбора проб (12 октября 2016 г.) образцы находились на территории полигона «Северный» (Железнодорожный филиал ФГУП «НО РАО») (скв. Р-11, Р-11-1, Р-12, Р-13), а также на территории ФГУП «ГХК» (скв. Р-8, Р-9, Р-10). На территории полигона «Северный» образцы kernов хранятся в неотапливаемом закрытом помещении, в деревянных закрытых ящиках. Часть отобранных образцов была использована для установления минерального и химического составов, а также для работ по изучению сорбционных свойств материала-заполнителя трещинного пространства.

3.2.2 Оценка корреляционных связей геофизических параметров и физических свойств пород с геолого-структурными элементами массива

3.2.2.1 Исследования в скважинах

Поиск устойчивых корреляционных зависимостей между разнородными физическими характеристиками пород представляет особый интерес для рассматриваемой толщи. Это связано с трудностью и неоднозначностью выделения отдельных структурных элементов из-за техногенного воздействия на керновый материал при бурении. В первую очередь, это касается диагностики зон нарушения сплошности массива. Анализ полученного материала показал относительно хорошее совпадение (примерно, в 7–8 из 10 случаев) пиковых значений электропроводности (КС метод) с зонами, выделенными нами (после исключения участков техногенного нарушения сплошности при бурении) как зоны с повышенными значениями показателя раздробленности пород, обычно $M_{зд10} > 0.4$ м/10 м (рисунок 21). Немногим более низкая, но вполне значимая корреляция отмечается между зонами повышенной трещиноватости ($M_{тр} > 15–20$) и пиками электропроводности. Такая согласованность разнородных параметров позволяет интервалы, где наблюдается подобное совпадение, относить к зонам истинной (тектонической) дезинтеграции массива. В частности, на графиках каротажа и $M_{зд10}$ (рисунок 21), хорошо видно, что верхняя часть разреза до глубин, примерно, 150–200 м, характеризующаяся высокой электропроводностью, отличается повышенной степенью раздробленности. Монолитные участки пород характеризуются слабо меняющимися по глубине значениями электрической проводимости.



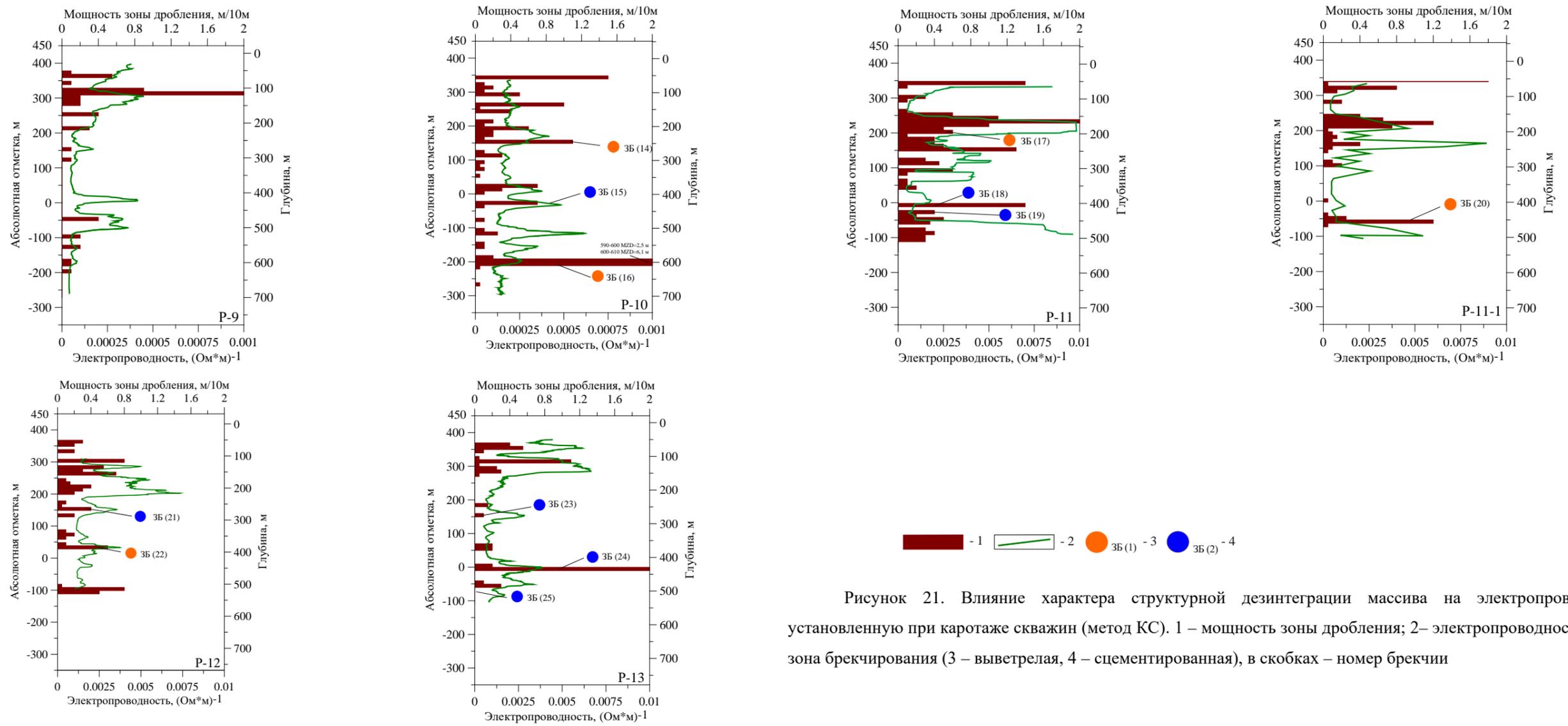
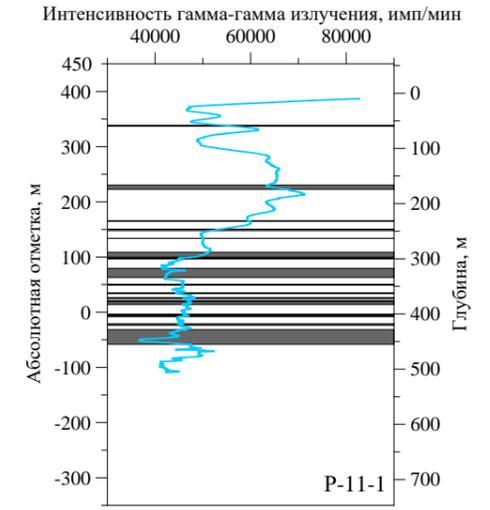
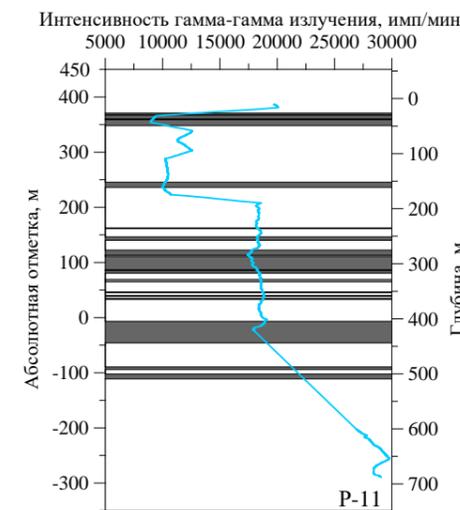
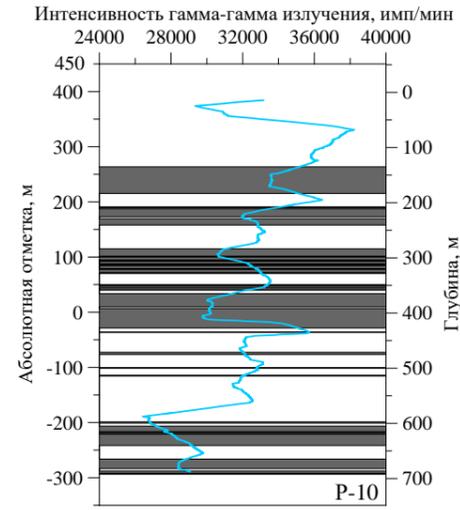
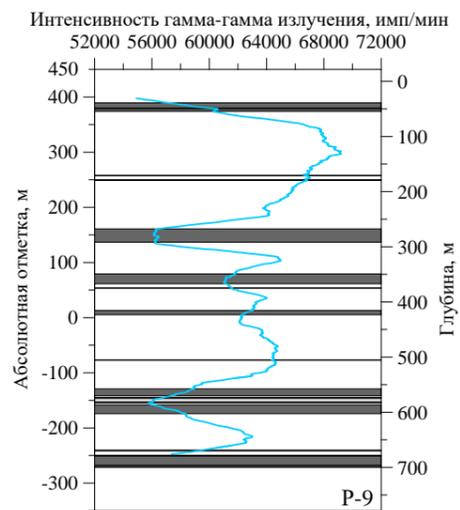
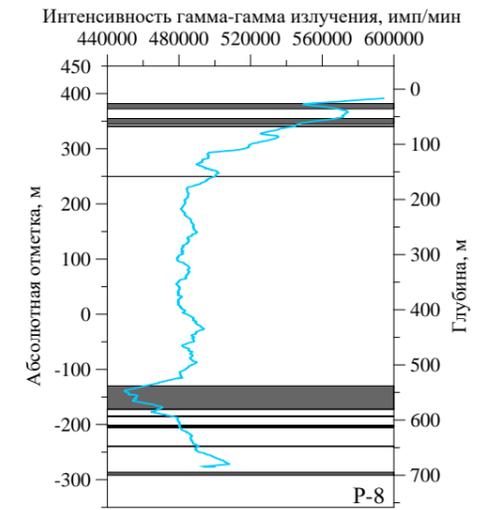
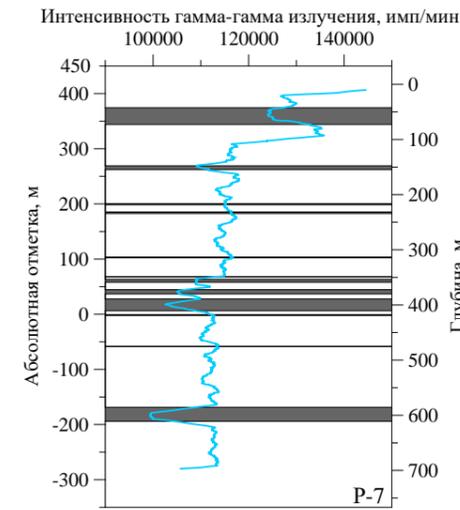
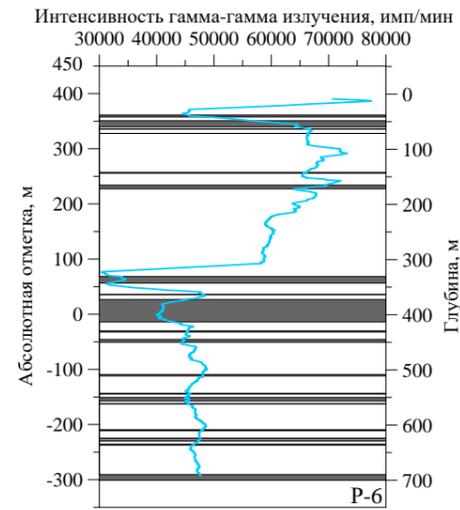
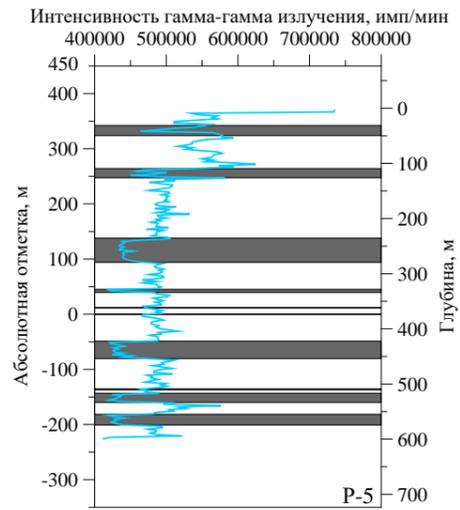
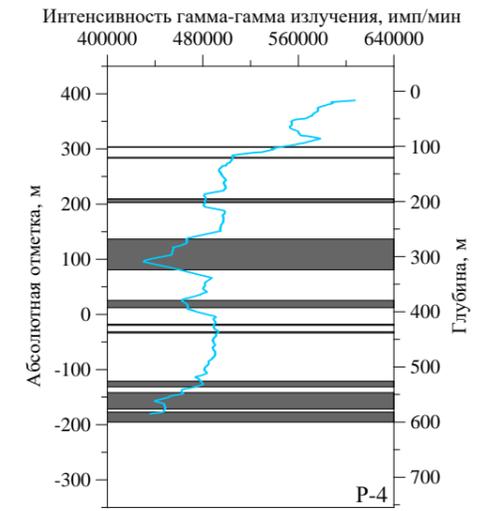
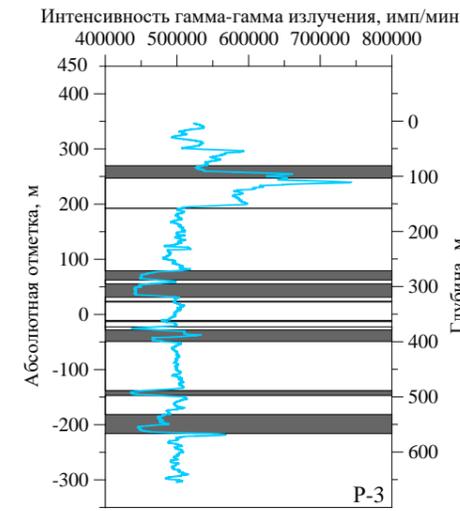
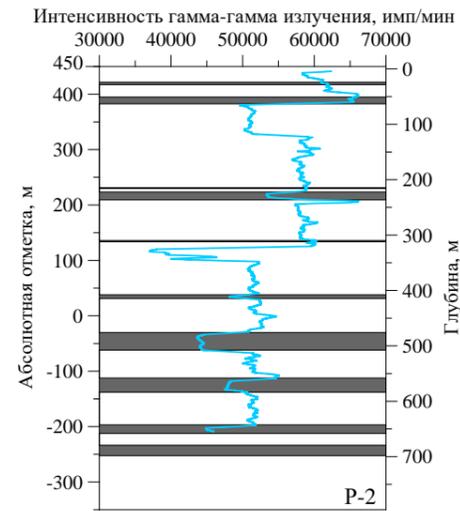
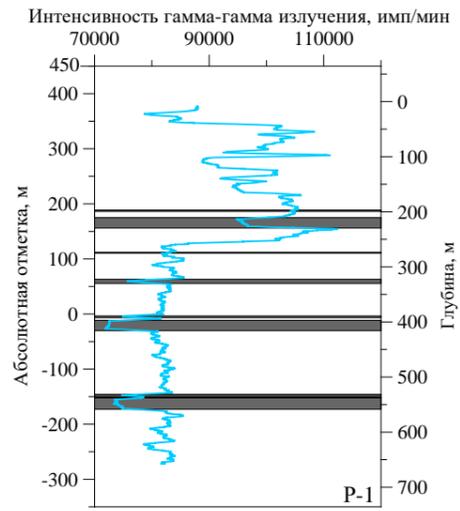
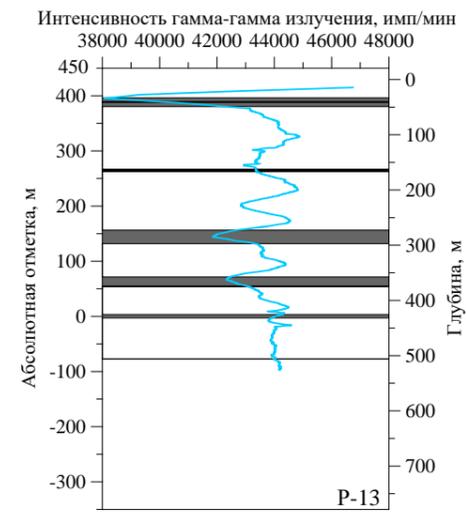
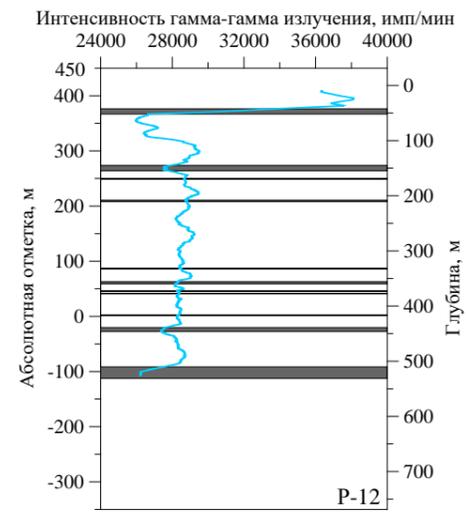


Рисунок 21. Влияние характера структурной дезинтеграции массива на электропроводность, установленную при каротаже скважин (метод КС). 1 – мощность зоны дробления; 2– электропроводность; 3, 4 – зона брекчирования (3 – выветрелая, 4 – цементированная), в скобках – номер брекчии





■ - 1 □ - 2

Рисунок 22 – Влияние расположения интрузивных образований массива на интенсивность гамма-гамма излучения, установленную при каротаже скважин (метод ГГК). 1 – интрузивное тело (дайка), 2 – интенсивность гамма-гамма излучения

Вполне однозначно по данным ГК и ГГК устанавливается положение в разрезе области пересечения скважины долеритовых даек (рисунок 22). Это говорит о пониженном радиоактивном фоне пород основного состава (дайки) по сравнению с породами кислого состава (гнейсы).

Кроме того, данные лабораторных испытаний пород, отобранных на различных глубинах, показывают, что долеритовые дайки отличаются повышенной плотностью и крепостью в сравнении с вмещающими гнейсами.

3.2.2.2. Площадные геофизические исследования

На стадии проектирования сооружения подрядной организацией ОАО «КрасноярскГеология» был проведен целый комплекс площадных геофизических исследований, которые включали в себя:

- вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ),
- магнитную съемку,
- сейсморазведочные работы.

Метод ВЭЗ позволил измерить электрическую проводимость осадочных отложений и коренных пород. Было выявлено, что мощность кор выветривания и осадочных пород в целом согласуется с формами рельефа (уменьшение толщины осадочного слоя на положительных формах, увеличение мощности на отрицательных). Кроме того, была обнаружено, что увеличение электрического сопротивления пород осадочной толщи возрастает с увеличением дресвяно-щебнистой фракции и уменьшается с увеличением песчано-глинистой.

Результаты магнитной съемки показали, что магнитное поле на участке неоднородно. Оказалось, что можно достаточно точно отследить расположение магнетитсодержащих даек основного состава (долериты), а также выделить фактически немагнитные районы, представленные биотитовыми гнейсами. Однако площадная магнитная съемка не позволила дифференцировать литологические разности в том случае, если дайки долеритов располагались среди толщ магнетитсодержащих плагиогнейсов. Кроме того, существует вероятность, что интерпретация результатов измерения магнитного поля становится затруднительной при увеличении мощности рыхлых осадочных отложений (что наблюдается, например, в СВ направлении).

По этой причине был использован подход, когда геофизические данные, полученные разными методами, накладывались друг на друга (метод суперпозиции) на всей площади участка и в дальнейшем интерпретировались. Так была составлена «карта физических полей» путём наложения друг на друга результатов магнитной съемки и

площадных измерений электрической проводимости коренных пород. Итог такого подхода отображен на рисунке 23 а.

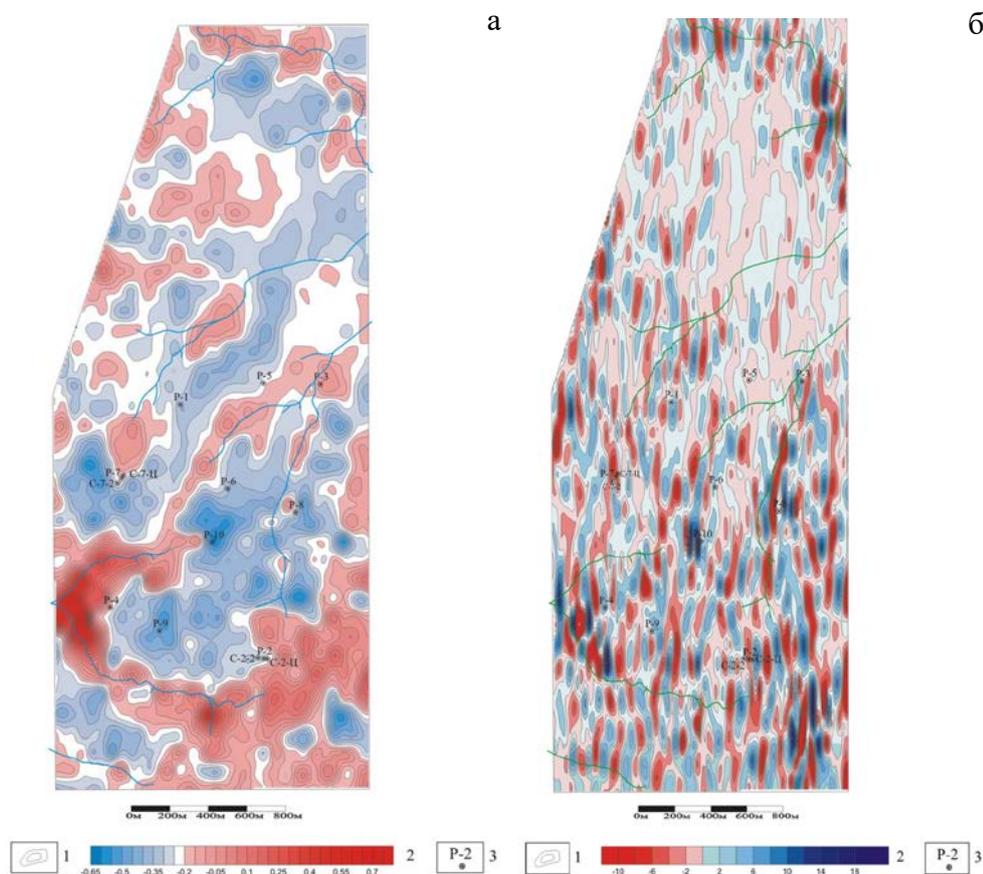


Рисунок 23. Интерпретация площадной геофизической съемки

а – Соразмерное совмещение аномалий магнитного поля и удельного электрического сопротивления коренных пород; б – аномалии тонкой структуры магнитного поля; 1 -изолинии аномалий; 2 - шкала интенсивности аномалий у.е.; 3 - скважины и их номера [22]

Метод совмещения физических полей позволил авторам отчёта сделать интерпретацию, согласно которой они выделили отдельные блоки в пределах изученного участка, а границы этих блоков пролегают по разрывным нарушениям. В физических полях эти разрывные нарушения отслеживаются по сдвигам аномальных зон, поперечным их простиранию. Магнетитсодержащие секущие дайки представлены как узкие положительные аномалии, а области, которые сопровождают эти дайки в виде зон трещиноватости (а также зоны метасоматического и гранитно-жильного преобразований) – отрицательными. Для уточнения положения интрузий основных пород (ввиду их незначительной мощности) была составлена так называемая карта «аномалий тонкой структуры магнитного поля» (рисунок 23 б).

Для получения такой карты результаты площадной магнитной съемки были обработаны, применив сложный математический подход. Оказалось, что отфильтрованные таким образом данные представлены совокупностью параллельных остаточных аномалий, положение которых соответствует (по все видимости) выходам даек долеритов под покров рыхлых отложений.

Сейсморазведочные работы позволили выделить три отражающих горизонта (ОГ-3 – верхний, ОГ-2 – средний и ОГ-1 – нижний), каждый из которых соответствует границам определенных литологических комплексов. Отражающий горизонт ОГ-3 интерпретируется как подошва зоны выветривания. Авторы отмечают, что в целом мощность этой зоны увеличивается в северо-восточном направлении от 125 до 265 м. В пределах площадки размещения ПГЗРО, мощность зоны выветривания по ОГ-3 составляет 80–130 м. Достаточно четко фиксируется отражающий горизонт ОГ-2, (на глубинах 700–750 м), который интерпретируется как подошва метаморфического атамановского комплекса. На этих отметках он имеет субгоризонтальное залегание, с небольшим склонением к западу. Нижний горизонт ОГ-1, залегающий на глубинах 3600–4000 м, отражает поверхность подстилающего атамановский метаморфический комплекс слой.

В целом сейсморазведочные данные отличаются невысокой достоверностью в отношении небольших глубин. Выделенная по данным атрибутивного анализа сеть «разрывных нарушений» в целевом интервале небольших глубин участка (от 0 до 700 м) в общем не нашла подтверждения при бурении разведочных скважин.

На основе выше сказанного можно сделать вывод, что наземные геофизические исследования, хотя и являются важным дополнением к геологическим методам анализа, они не позволяют однозначно выделить те или иные структуры, связанные с нарушением сплошности массива.

3.2.3 Локализация, статистика и пространственная корреляция зон дезинтеграции

3.2.3.1 Зоны брекчирования

Характерной особенностью разреза является наличие нескольких древних зон брекчирования, которые вместе с дайками первой генерации маркируют тектонические нарушения (рис. 12), сформировавшиеся на начальной стадии геологического развития Нижнеканского массива (около 2.5 млрд. лет тому назад).

Брекчированные породы – результат тектонических подвижек, приводящих к дроблению породы (в данном случае, гнейсов) вдоль разломов. Крупные обломки в таких

брекчиях обычно погружены в мелко раздробленную массу. Цементом для обломков служат полевой шпат, кальцит – минералы, формирующиеся в процессе метасоматоза. Зоны брекчирования на данном участке представлены как монолитными, так и раздробленными породами. Такое дробление – результат более молодых тектонических подвижек.

Нами были выделены, задокументированы и занесены в БД те из них, которые имеют мощность более 1 м. Их количество в колонках разведочных скважин меняется от 1 до 4 (Рис. 8). Как видно, наиболее значимыми являются интервалы брекчированных пород, вскрытые скважинами Р-4 и Р-1, Р-3, Р-5, Р-6, Р-8, Р-9, Р-10. Интересно, что многие зоны брекчирования, подверженные дроблению, не отмечаются на графиках электропроводности. Возможно, это говорит о сцементированности обломочного материала глинистым заполнителем, легко разрушающимся при бурении, но являющимся слабопроницаемым для раствора вне границ стенки скважины.

3.2.3.2 Связь зон трещиноватости с дайками

Исходя из общих представлений, можно предположить, что зоны повышенной трещиноватости могут быть связаны с пространственным положением даек. Уже само наличие в массиве даек говорит о наличии древних разломных зон, по которым происходило внедрение магматических расплавов, кристаллизация которых при остывании и привела к образованию этих геологических объектов.

Приуроченность зон повышенной трещиноватости пород к участкам внедрения даек долеритов и порфириновых долеритов в гнейсы и плагиогнейсы Нижнеканского массива была исследована статистически. Было изучено 14 геологических колонок по скважинам, пробуренных на участке «Енисейский» Нижнеканского массива. Приповерхностная (0–200 м) часть колонок не учитывалась в связи с сильной выветренностью кернового материала на этом интервале глубин. Кроме того, минимальным значением модуля трещиноватости ($M_{тр}$), который учитывался при проведении подсчетов, была величина более 10 трещин на метр. В общей сложности в геологических колонках было выявлено 92 интервала, где значение модуля трещиноватости превышало 10 трещин на метр. Визуально было выделено несколько типов зон повышенной трещиноватости, где положение максимума модуля было приурочено к:

- 1) внедрению дайки долеритов/порфириновых долеритов в гнейсы и плагиогнейсы:
 - а) к верхнему контакту дайки долеритов/порфириновых долеритов,

- б) к нижнему контакту дайки долеритов/порфировых долеритов,
 - в) к центральной части дайки;
- 2) толще гнейсов/плагиогнейсов (или приуроченность к тому или иному типу пород не ясна).

Статистический анализ показал, что в 60% случаев интервалы повышенной трещиноватости ($M_{тр} > 10$) приурочены к зонам внедрения даек долеритов/порфировых долеритов и только лишь в 40 % к вмещающим породам гнейсового массива. Среди зон повышенной трещиноватости, соответствовавших местам внедрения даек было установлено, что на долю участков, где трещиноватость проявлена на верхнем контакте дайки приходилось 77 % зон, на нижнем контакте 12 %. Пиковые значения модулей трещиноватости приурочены к центральным частям даек в 11 % случаев. Данное распределение продемонстрировано на рисунке 24.

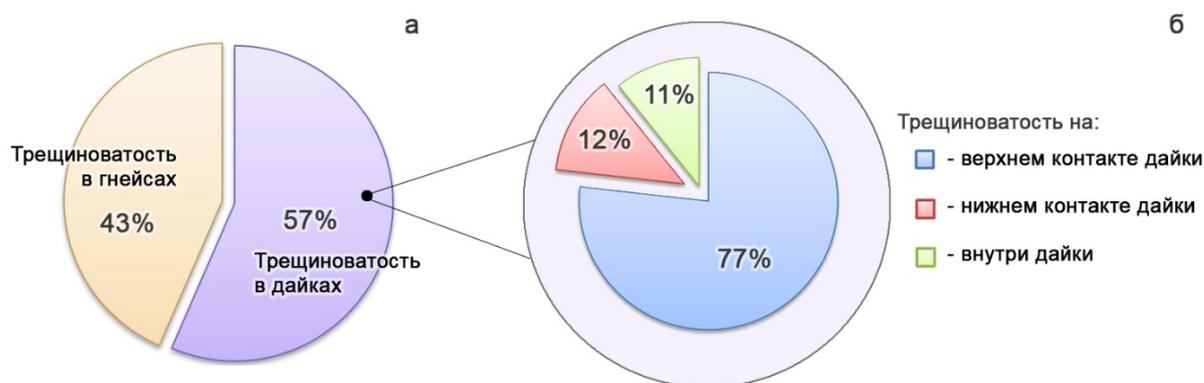


Рисунок 24. Приуроченность зон повышенной трещиноватости.

- а) распределение зон трещиноватости относительно даек и трещин б) распределение зон трещиноватости относительно тела дайки

Результаты кластерного анализа (см. рисунок 25) показали, что совокупность геологических колонок может быть разделена на две категории: 1) колонки из скважин, где зоны повышенной трещиноватости приурочены к гнейсам/плагиогнейсам (скважины Р-2, Р-10, Р-11, Р-13), 2) колонки, где зоны повышенной трещиноватости преимущественно приурочены к внедренным базитовым дайками (скважины Р-1, Р-5, Р-6, Р-3, Р-8, Р-4, Р-7, Р-9, Р-11-1, Р-12)

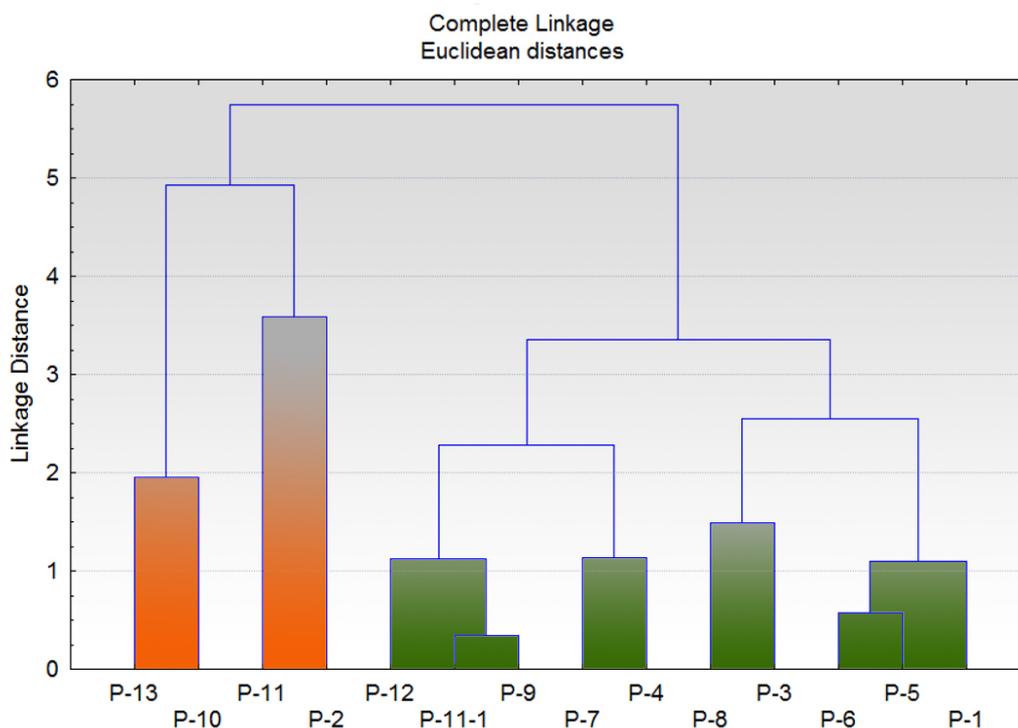


Рисунок 25. Древоподобная кластерная диаграмма, демонстрирующая наличие 2 групп геологических колонок, где зоны повышенной трещиноватости приурочены: (а) к внедрению даек долеритов, (б) к вмещающей гнейсовой/плагиогнейсовой толще

3.2.3.3 Статистические и корреляционные характеристики выделенных структурно-геологических элементов

Созданная по материалам бурения скважин база данных позволяет исследовать статистические закономерности распределения (частоты встречаемости и пространственную корреляцию) тех или иных геолого-структурных элементов. Такой анализ был выполнен применительно к системам трещин, зонам дробления, а также дайкам, пересекающих интервал бурения скважин.

Для анализа степени трещиноватости массива использовались два подхода: 1) документация всех индивидуальных трещин, встреченных при бурении скважин (а.о. и угол падения) и 2) подсчет количества трещин, встреченных при проходке погонного метра каждой разведочной скважины, – прямое определение характеристики, называемой модулем трещиноватости (Мтр).

Оба метода дали весьма близкие результаты, как с позиций определения средней плотности трещин, так и с точки зрения статистического закона распределения, который однозначно идентифицируется как логнормальный. Как видно на рисунке 26, полученные суммарные гистограммы указывают на резкое преобладание интервалов с довольно высокой частотой встречаемости трещин – через каждые 10–15 см и, соответственно,

значением модуля трещиноватости $M_{тр} < 7-10$. Судя по всему, эти диапазоны значений характеризуют первичную («фоновую») трещиноватости гнейса. Доля интервалов, характеризующихся более высокой плотностью трещин, которая может быть отнесена к категории зон с повышенной трещиноватостью (рассланцевания) ($M_{зт} > 15-20$, расстояние между трещинами менее 5–7 см), относительно невелика.

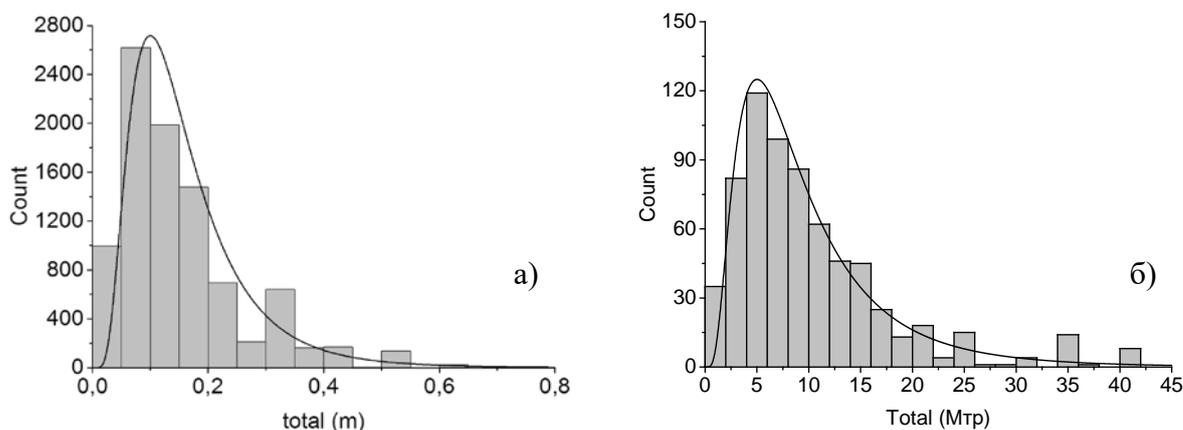


Рисунок 26. Гистограммы распределения: (а) расстояний между соседними трещинами (скв. Р-12, Р-11-1 и Р-11) и (б) модуля трещиноватости пород (все скважины); аппроксимирующие кривые отвечают логнормальному закону распределения

Как уже неоднократно отмечалось, характерной особенностью разреза является присутствие в нем зон дробления. Наряду с представленными выше графиками изменчивости в разрезе модульной (осредненной) характеристики $M_{зд10}$ (рисунок 21), нами исследовалось распределение элементарных зон дробления, а именно: (а) изменчивости мощности таких зон, (б) структура зон неоднородности и характерные масштабы корреляционной функции.

Достаточно представительными являются графики на рисунке 27, полученные на основе детального описания керна скважин Р-12, Р-11-1 и Р-11. Разрезы первых двух скважин характеризуют относительно слабо нарушенные участки массива пород, находящиеся на удалении от пересечения даек различной генерации. Последняя скважина (Р-11) отражает состояние массива с повышенной степенью раздробленности – участок пересечения даек двух генераций.

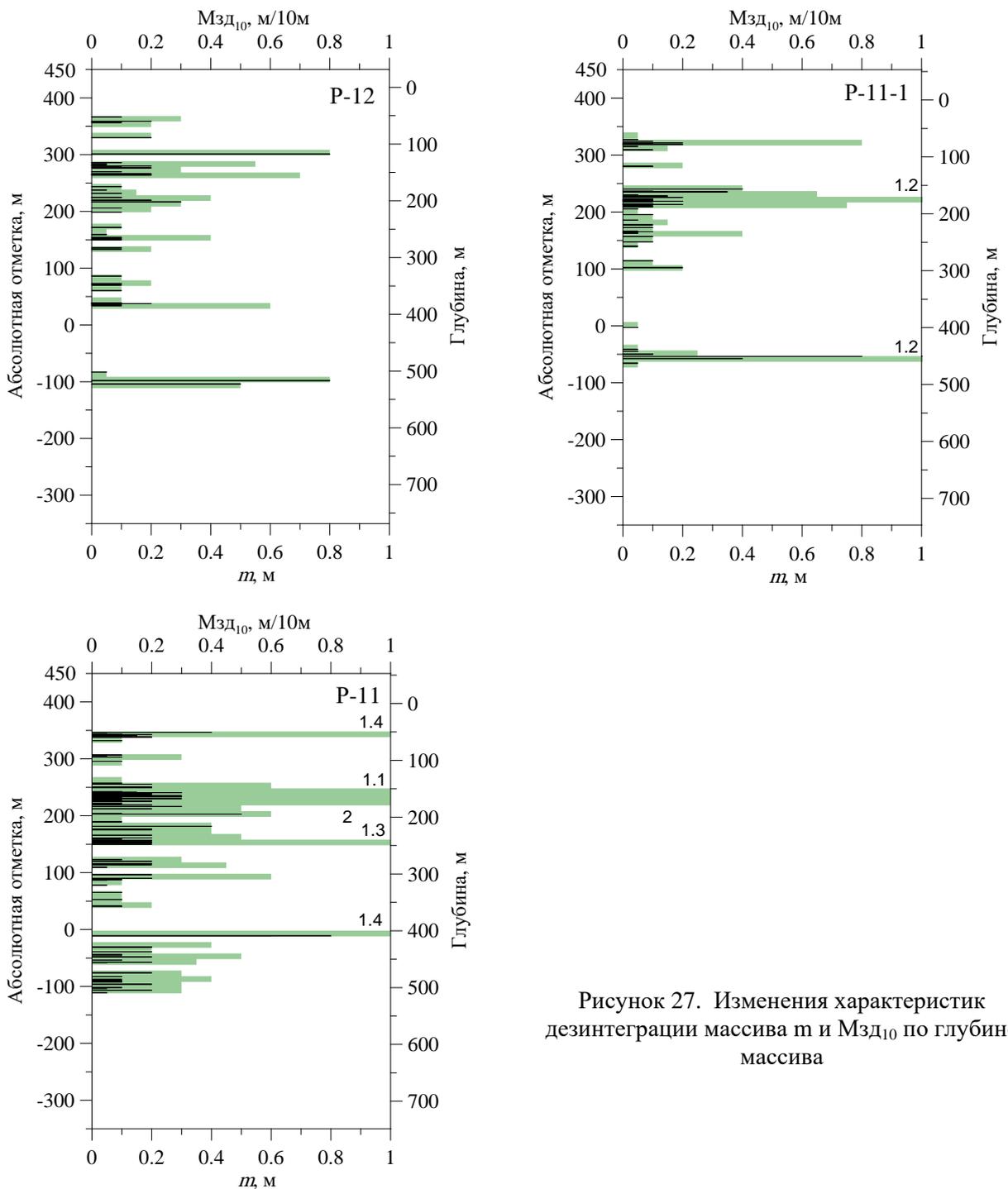


Рисунок 27. Изменения характеристик дезинтеграции массива m и Mzd_{10} по глубине массива

Частоту встречаемости мощностей элементарных зон дробления (ЭЗД, m) иллюстрируют гистограммы на рисунке 28. Как видно, все гистограммы, включая суммарную (рисунок 28 а), имеют ярко выраженные пики и положительную асимметрию, свидетельствующую о логнормальном законе распределения характеристики m . Низкая статистическая дисперсия (таблица 8) свидетельствует о слабой изменчивости рассматриваемого показателя, колеблющегося в довольно узком диапазоне 0.05–0.2 м (среднее значение 0.15 м).

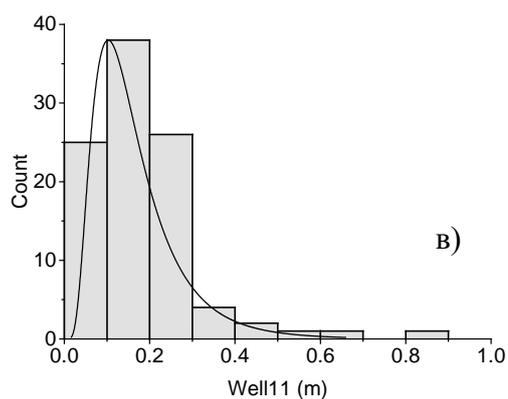
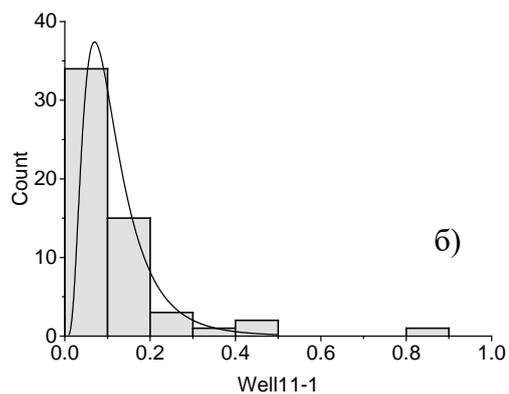
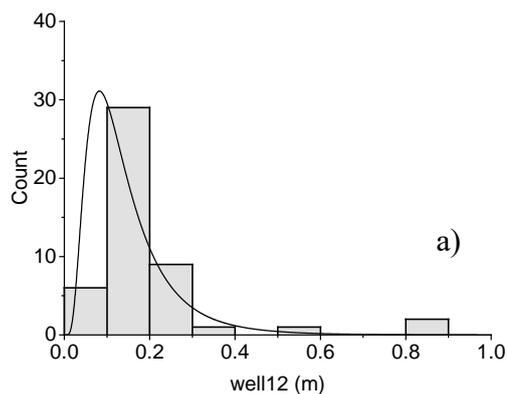


Рисунок 28 – Гистограммы распределения мощностей элементарных зон дробления m (м) в трех скважинах

а – P-12,

б – P-11-1,

в – P-11.

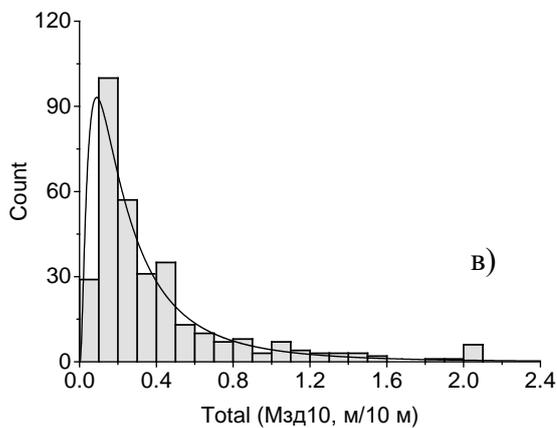
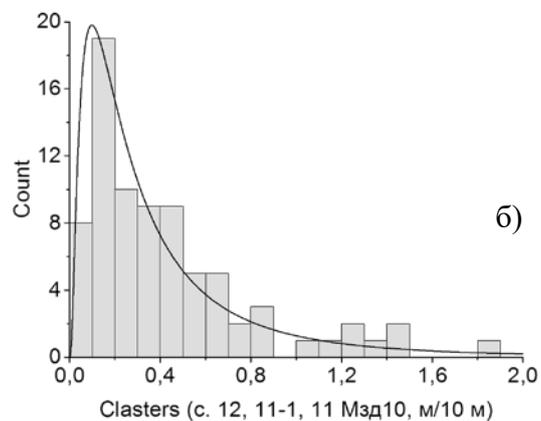
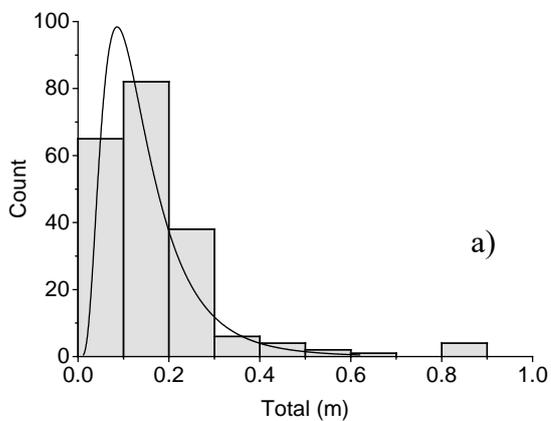


Рисунок 29 – Суммарные гистограммы.

а – для мощности ЭЗД (скв. P-12, P-11-1 и P-11);

б – для модуля $M_{зТ10}$ (скв. P-12, P-11-1 и P-11);

в – для модуля $M_{зТ10}$ (все скважины).

Таблица 8 Статистические параметры логнормального закона распределения для различных элементов дезинтеграции

Характеристика типа нарушения сплошности	ln mean (μ_{ln})	ln sd (σ_{ln})
Мтр	2.08	0.68
m , м	-2.09	0.61
Мзд ₁₀ (скв.Р-12, Р-11-1, Р-11), м/10 м	-1,34	0,99
Мзд ₁₀ (все скважины), м/10 м	-1.47	0.97

ln mean – среднее для натуральных логарифмов значений ряда, ln sd – среднеквадратическое отклонение логарифмов значений.

В отличие от распределения ЭЗТ (m), гистограммы модуля Мзд₁₀, построенные для скважин по отдельности, отличаются прерывистостью и высоким разбросом собственно значений Мзд₁₀ (рисунок 24), что свидетельствует о недостаточном количестве интервалов, необходимых для хорошего статистического осреднения характеристики Мзд₁₀ в отдельно взятых скважинах. В тоже время, суммарные графики дают статистически представительную выборку с логнормальным распределением Мзд₁₀ (рисунок 23 б и в).

Приведенные ранее графики изменения модуля Мзд₁₀ по глубине (рисунок 27) также говорят о существовании эффекта «кластирования» зон дробления, и, как следствие, пространственной неоднородности разреза: интервалы потенциально проницаемых интервалов (Мзд₁₀ > 0) сменяются интервалами монолитных (непроницаемых) пород (Мзд₁₀ = 0). Размер (мощность) последних варьирует от 10 до 100 и даже более метров.

Анализ таблицы 9 показывает, что средние значения степени дезинтеграции пород по всем скважинам достаточно близки: на каждые десять погонных метра приходится от около 30 см раздробленного материала.

Таблица 9. Распределения Мзд₁₀

Скв.	Кол-во, зон	Среднее, м/10 м	Стд. откл.	Мин, м/10 м	Медиана, м/10 м	Макс, м/10 м	Сумма, м
P-1	24	0.32917	0.31274	0.1	0.2	1.2	7.9
P-2	19	0.22368	0.23355	0.05	0.1	1	4.25
P-3	18	0.29722	0.24762	0.05	0.2	1	5.35
P-4	17	0.37353	0.39848	0.05	0.3	1.35	6.35
P-5	32	0.33125	0.30367	0.1	0.2	1.4	10.6
P-6	25	0.236	0.1823	0.05	0.2	0.8	5.9
P-7	11	0.4	0.28548	0.1	0.35	1	4.4
P-8	32	0.275	0.32676	0.05	0.175	1.5	8.8
P-9	18	0.34722	0.46161	0.1	0.2	2	6.25
p10	33	0.30909	0.33968	0.05	0.2	1.5	10.2
P-11	31	0.51935	0.47235	0.1	0.4	2	16.1
P-11-1	23	0.38478	0.47204	0.05	0.15	1.8	8.85
P-12	22	0.27727	0.21477	0.05	0.2	0.8	6.1
P-13	17	0.35882	0.4941	0.05	0.2	2	6.1
По всей выборке	322	0.33276	0.35429	0.05	0.2	2	107.15

Аналогично предыдущему анализу была рассчитана статистика геометрических характеристик даек, включая их взаимное расположение (расстояние между дайками).

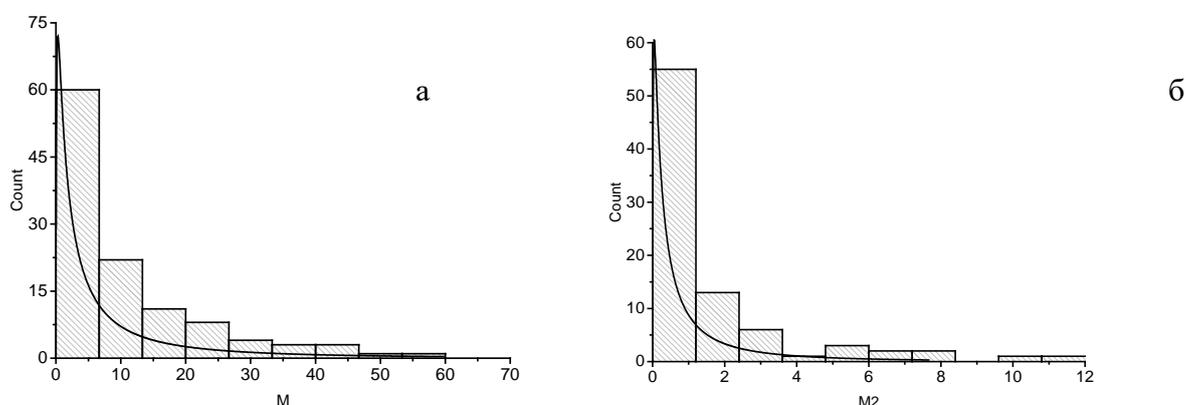


Рисунок 30. Статистическое распределение видимых мощностей даек 1 (а) и 2 (б) генераций, вскрытых скважинами

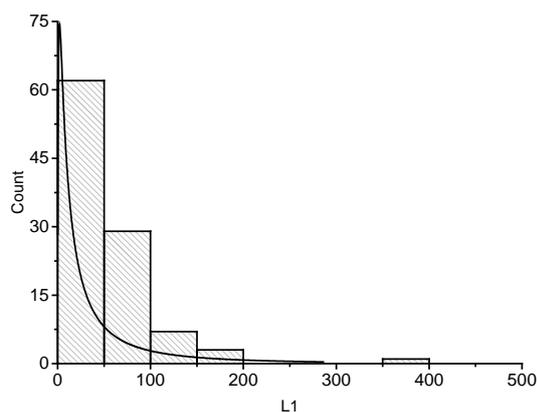


Рисунок 31. Гистограмма распределения расстояний между дайками 1 генерации

Из приведенных статистических данных (рис. 25–26, таблица 10) следует, что средняя мощность даек второй генерации, многократно уступает мощности даек первой генерации. Дайки 1 генерации образуют относительно регулярные линейные структуры. Напротив, пространственная структура даек 2 генерации отличается крайней нерегулярностью: этим дайкам свойственно группироваться в отдельных областях массива, образуя подобие кластеров.

Таблица 10. Статистика параметров для систем даек

	Дайки 1 генерации		Дайки 2 генерации
	Мощность, м	Расстояние м-ду дайками, м	Мощность, м
Среднее	10.33	44.85	1.53
Ст. откл.	12.10	52.63	2.31
Сумма	1167.56	4574.53	128.52
Мин.	0.03	0.10	0.01
Медиана	6.10	24.50	0.60
Макс.	55.80	379.50	11.50
Кол-во.	113		84

3.3. Структурные порядки зон дезинтеграции массива в пределах участка «Енисейский»

Геологический анализ кернового материала, характеризующего степень дезинтеграции массива исследованного участка в пределах структуры 2 порядка (ограниченной упомянутыми выше региональными разломами), позволяет однозначно диагностировать трещинные структуры более высоких (3, 4 и 5) порядков (см. таблицу 11)

Таблица 11. Выделение структурных порядков зон дезинтеграции геологического массива на участке «Енисейский» по данным бурения скважин

Порядок	Характеристика	Длина, м	Расстояние, м	Мощность, м
1	Континентальные разломы*	> 10 000	> 1 000	> 100
2	Региональные разломы**	1 000–10 000	100–1000	10–100
3	ЗБ, Д	100–1000	10–150	1–50
4	ЭЗД (КЗД)	10–50	1–10	0.1–0.3
5	ПТ	1–10	0.1–1	0.001–0.01

ЗБ – зона брекчирования, Д – дайки, ЭЗД – элементарная зона дробления, КЗД – кластер зоны дробления, ПТ – первичная трещиноватость.

*¹За пределами Нижне-Канского массива, **²Атамановский, Правобережный, Байкальский и Шумихинский.

Локальные разломные структуры 3 порядка трассируются положением в разрезе древней тектонической брекчии и даек двух генераций, сформировавшихся на заключительной стадии метаморфизации массива гнейсовых пород. Контакты этих геологических объектов с вмещающими гнейсами характеризуются различной степенью метаморфизации и трещиноватости. Существенных тектонических подвижек по этим контактам не отмечается.

Трещинные структуры 4 порядка сформировались в постмагматический период. Они представлены преимущественно маломощными зонами дробления и повышенной трещиноватости, затрагивающими все литологические разности пород. Их генезис связан с развитием в массиве сдвиговых деформаций. Специфической особенностью данных геологических объектов является тенденция к их организации в кластерные структуры (КЗД).

Попытки пространственной 3D корреляции ЭЗД и их кластеров на основе данных, полученных по всем скважинам, не дали положительного результата. Отсутствие

корреляции говорит об относительно небольшой протяженности этих элементов и случайном характере их распределения в массиве.

Отмечаются участки полностью залеченных трещин. Отдельные системы трещин заполнены высокопористым материалом – продуктами выветривания.

Трещинные структуры 5 порядка – это первичная трещиноватость, сформировавшаяся на стадии метаморфизма. Характеризуется устойчивыми показателями модуля трещиноватости ($M_{тр} < 10$).

В целом, выявленные масштабы зон дезинтеграции массива (их протяженность, мощность и частота встречаемости) на участке «Енисейский» и проведенное ранжирование находятся в хорошем соответствии с известными представлениями о пространственном распределении подобных структур в массивах гнейсовых пород, сформировавшихся в других регионах, а также опубликованными классификациями зон дезинтеграции (раздел 3.1.1).

3.4. Изучение сорбции радионуклидов на породах

3.4.1 Общие представления о радиоактивных отходах и системах их захоронения

3.4.1.1 Конструктивные особенности ПГЗРО Енисейский

На рис. 32 показана общая схема расположения ПГЗРО. Захоронение РАО предполагается осуществлять в диапазоне 450 – 475 м от поверхности, площадь участка около 1 км². В рамках первой очереди предстоит захоронить остеклованные ВАО «ПО Маяк» (4500 пеналов по 3 бидона), во 2-ю очередь – еще 3000 пеналов, а всего 4500 м³ ВАО такого типа. Эти ВАО будут размещены в вертикальных скважинах длиной 70 м и диаметром 1.2 м. Учитывая, что диаметр пенала с канистрами составляет около 0,8 м, свободное оставшееся пространство будет заполнено прессованным бентонитом. Долгоживущие ВАО и САО размещаются в тонкостенных металлических контейнерах объемом 1,5 м³ в горизонтальных камерах и после заполнения герметизируются смесью из цемента и бентонита. Общий объем для 2-х очередей определен в 155 тыс. м³. Толщина стенок пенала и контейнера – 15 мм: нержавеющая (5 мм) и углеродистая (10 мм) сталь.

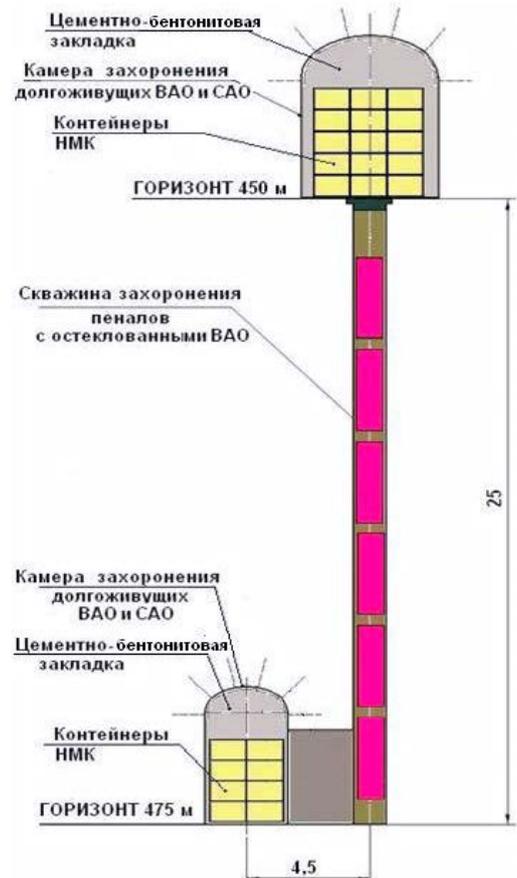
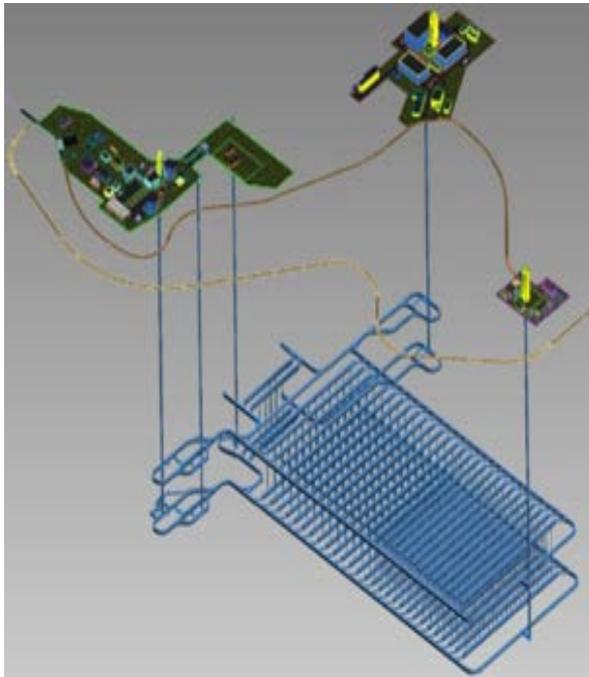


Рисунок 32. Схема подземных выработок и захоронения отходов (тепловыделяющие остеклованные ВАО – в вертикальных скважинах, красное; долгоживущие ВАО и САО с низким тепловыделением – в камерах, показаны зеленым)

В заключение отметим, что в имеющихся стратегиях захоронения остеклованных ВАО ожидаемый срок службы матрицы составляет 10000 лет, а металлического контейнера – не менее 1000 лет. Наиболее близкие к отечественному подходы в отношении СИБ реализуются во Франции и Бельгии. Главное различие связано с разным составом матрицы (Al-Pb в России, В-Si за рубежом).

3.4.1.2 Данные о составе ВАО и их опасности

Для анализа безопасности важны два промежутка времени – краткосрочный- до 300 лет, и долгосрочный – после 300 лет. За первый промежуток времени доля короткоживущих продуктов деления (основные – цезий, стронций) резко снизится, в результате уменьшится их экологическая опасность, а также тепловыделение отходов. В дальнейшем угроза будет связана с долгоживущими трансурановыми актинидами и продуктами деления (I, Tc, Se, ^{135}Cs). Для них характерны высокая подвижность в виде коллоидных форм для актинидов (Np, Pu, Am) или анионов продуктов деления (Se, Tc, I), не задерживаемых геологической средой.

В таблице 11 в качестве примера приведены исходные данные по радионуклидному составу (активности) остеклованных ВАО для первой и второй очередей загрузки ПГЗРО. Они позволяют охарактеризовать радиоэкологическую опасность ВАО, а также тепловыделение и температуру матрицы и ее снижение со временем. Значения радиоактивности для остеклованных ВАО 1-ой и 2-ой очередей размещения различаются в 4 раза, и также будут отличаться их тепловыделение и температура разогрева.

Таблица 11. Состав остеклованных ВАО на момент размещения в объект ПГЗРО «Енисейский»

Радио-нуклид	T _{1/2} , лет	Активность 1-ой упаковки (1500 кг ОВАО), Бк	Радио-нуклид	T _{1/2} , лет	Активность 1-ой упаковки (1500 кг ОВАО), Бк
⁷⁹ Se	6,50E+04	1,8E+10	²³⁷ U	1,85E-2	5,7E+07
⁹⁰ Sr	28,5	1,5E+15	²³⁸ U	4,47E9	3,8E+07
⁹³ Zr	1,53E+06	1,1E+11	²³⁶ Pu	2,85	3,0E+03
⁹⁹ Tc	2,15E+05	7,5E+11	²³⁸ Pu	87,7	1,6E+11
¹⁰⁶ Ru	1,01	2,1E+03	²³⁹ Pu	2,41E4	5,4E+10
¹⁰⁷ Pd	6,50E+06	6,0E+09	²⁴⁰ Pu	6,54E3	7,0E+10
^{121m} Sn	50,0	1,1E+10	²⁴¹ Pu	14,4	2,3E+12
¹²⁵ Sb	2,77	5,8E+09	²⁴² Pu	3,76E5	2,3E+08
¹²⁶ Sn	1,00E+05	3,0E+10	²⁴³ Pu	5,66E-4	7,0E+03
¹²⁹ I	1,57E+07	1,8E+09	²³⁷ Np	2,14E6	3,8E+08
¹³⁴ Cs	2,06	2,9E+09	²⁴¹ Am	432,2	5,1E+13
¹³⁵ Cs	2,30E+06	2,8E+10	^{242m} Am	141,0	1,3E+11
¹³⁷ Cs	30,2	2,1E+15	²⁴² Am	1,83E-3	1,3E+11
¹⁴⁴ Ce	0,78	8,7E-01	²⁴³ Am	7,38E3	8,5E+11
¹⁴⁷ Pm	2,62	8,9E+10	²⁴² Cm	0,45	1,1E+11
¹⁵¹ Sm	87,0	1,6E+13	²⁴³ Cm	28,5	1,7E+11
¹⁵⁴ Eu	8,50	1,5E+13	²⁴⁴ Cm	18,11	2,1E+13
¹⁵⁵ Eu	4,96	7,5E+11	²⁴⁵ Cm	8,5E3	1,0E+10
²³² U	72,0	3,3E+06	²⁴⁶ Cm	4,73E3	2,0E+09
²³⁴ U	2,48E+05	1,7E+08	²⁴⁷ Cm	1,5E7	7,0E+03
²³⁵ U	7,04E+08	2,2E+06	²⁴⁸ Cm	3,39E5	4,5E+03
²³⁶ U	2,37E+07	3,3E+07			
Удельная активность ~ 2,5·10 ¹² Бк/кг (отвержденные ВАО)					

3.4.2 Методика проведения сорбционных испытаний

К ведущим факторам, оказывающим влияние на процессы сорбции, являются характеристика и площадь минеральной поверхности, принимающей участие в сорбции, а также состав водного раствора (подразумеваются также рН-условия, концентрацию растворенного радиоактивного компонента, комплексообразование в растворе, наличие органического материала).

В рамках настоящего исследования предполагается, что процесс сорбции протекает за счёт двух ведущих механизмов:

поверхностное комплексообразование (в ходе, которого растворенный ион взаимодействует со структурной позицией на поверхности минерала и образует с ней устойчивую химическую связь);

ионный обмен (главным образом, в результате электростатического взаимодействия растворенного компонента в катионной форме с отрицательно заряженной минеральной поверхностью).

Кроме того, подразумевается, что сорбция растворенных микрокомпонентов на поверхность минеральных зерен является быстротечным процессом [1, 28, 6] в сравнении с продолжительными процессами кристаллизации и перекристаллизации минеральных фаз.

Для того чтобы продемонстрировать взаимосвязь доли сорбированного радиоактивного компонента (в формулировке коэффициента распределения) со скоростью его миграции, было предложено использовать такое понятие как «фактор задержки» (R_f):

$$R_f = 1 + \frac{\rho_b}{\varepsilon} \cdot K_d \quad (1),$$

где ρ_b - плотность породы, ε - пористость породы, K_D - коэффициент объемного распределения сорбированного компонента между раствором и твёрдой фазой (Уравнение 2).

Коэффициент объемного распределения (2) и поверхностного распределения (3) записываются в виде:

$$K_D = \left(\frac{C_{init} - C_{equil}}{C_{equil}} \right) \cdot \frac{V}{m} \quad \text{или} \quad K_D = \frac{A_n}{A_p} \cdot \frac{V}{m} \quad (2),$$

$$K_A = \left(\frac{C_{init} - C_{equil}}{C_{equil}} \right) \cdot \frac{V}{S} \quad \text{или} \quad K_A = \frac{A_n}{A_p} \cdot \frac{V}{S} \quad (3),$$

где K_A – коэффициент площадного распределения сорбированного компонента между раствором и твёрдой фазой; C_{init} и C_{equil} соответствуют начальным и равновесным концентрациям сорбируемого компонента в растворе; V – объем раствора, [см³]; S – площадь поверхности образца, [см²]; m – масса образца, [г]; A_n , A_p – содержания [Бк] радионуклида на породе и в растворе, соответственно.

В большинстве случаев, главной сложностью является то, что в лаборатории трудно добиться условий, которые соответствуют условиям конкретного подземного захоронения РАО. По этой причине экспериментально полученные значения коэффициента распределения нельзя напрямую переносить на реальные геологические условия.

Эксперименты с измельченными образцами материала-заполнителя трещинного пространства во вмещающих породах выполнялись по следующей методике: заранее измельченные и просушенные пробы трижды были подвержены обработке имитатом грунтовой воды с последующей декантацией. Далее в каждый образец добавляли имитат с конечным радионуклидом (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{79}Se , ^{99}Tc , ^{152}Eu или ^{239}Pu) и выдерживали 7 суток регулярно перемешивая.

По окончании сорбционного эксперимента измерялась активность водного раствора. Для этого бралась аликвота раствора, которая впоследствии выпаривалась до сухого остатка. Коэффициенты сорбционного распределения рассчитывались по формуле 1.

Эксперименты с монолитными фрагментами горных пород для определения поверхностной сорбции радионуклидов выполнялись по схеме приведенной далее.

В зависимости от реактивного имитата в опыте, фрагменты пород, в которых предварительно была измерена площадь контакта с раствором (Рис. 33), были залиты дистиллированной водой (для изотопов ^{137}Cs и ^{152}Eu), имитатом грунтовых вод в соотношении $V / S = 4,2$, где V – объем имитата, [мл], S – площадь контакта фрагмента породы с раствором, [cm^2] (для изотопа ^{90}Sr), с выдержкой в растворе от суток до 7 дней и последующей декантацией. После подготовки проб, породы были залиты радиоактивным имитатом, содержащим ^{90}Sr , раствор $^{137}\text{Cs} + ^{152}\text{Eu}$, ^{239}Pu . Пробы при периодическом перемешивании выдерживали 7 суток.

По окончании сорбции отбирали аликвоту надосадочного раствора в объем специальной геометрии для измерения активности изотопов.

Экспериментов по взаимодействию селена и технеция на поверхность монолитных фрагментов горных пород не проводилось исходя их предположения о том, что сорбционного взаимодействия между этими компонентами и поверхностью трещин не должно быть проявлено.

В обоих случаях исследования, сорбцию радионуклидов на пробах проводили при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ и $\text{pH}=7$.

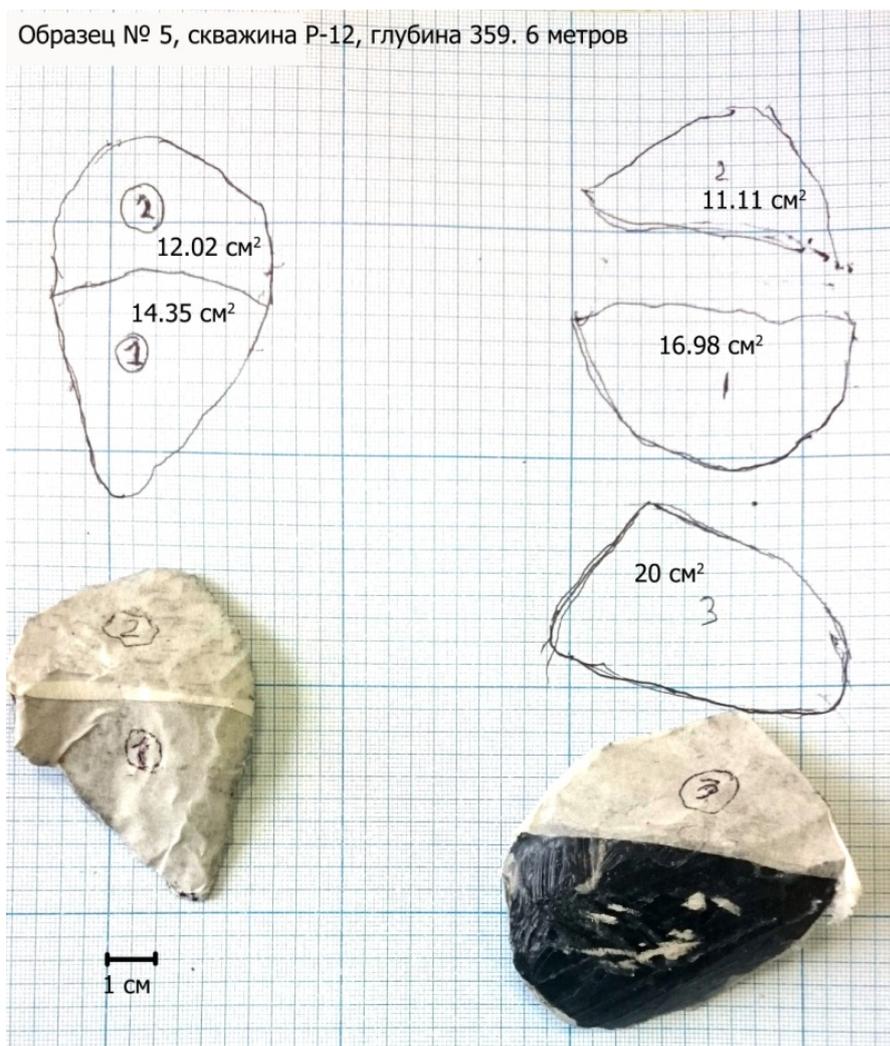


Рисунок 32. Пример оценки площади поверхности трещины образца №5

3.4.3. Исследование среды трещинного заполнителя

Минеральный состав пространства, заполняющий трещины был проанализирован путем изучения геологических колонок, составленных для скважин Р-1, Р-2, Р-3, Р-4, Р-5, Р-6, Р-7, Р-8, Р-9, Р-10, Р-11, Р-11-1, Р-12, Р-13. В ходе исследования собирались лишь те данные из геологических колонок, в которых указывался минеральный состав заполнителя трещин. В тоже время, рассматривались только те данные из геологических колонок, где указывалось, что значение модуля трещиноватости превышало 5 трещин на метр. В общей сложности было обнаружено 204 интервала зон повышенной трещиноватости. По результатам анализа было выявлено, что основными заполнителями трещин являются: «глинистый минерал», «кальцит», «калиевый полевой шпат», «каолинит», «карбонат», «кварц», «неизвестный минерал», «темноцветный минерал», «хлорит» (см. рисунок 33). Карбонат и кальцит являются ведущими материалами-заполнителями – они были выявлены в 33.1 и 31.1 % всех случаев, соответственно. Третьим ведущим минералом является хлорит - его доля среди всех минералов составляет 17.7 %. Доли кварца, каолинита и глинистого минерала составляют соответственно 5.7, 5.0

и 4.0 %. Следовые содержания (1.3, 1.3 и 0.67 %) соответствуют темноцветному минералу, калиевому полевому шпату и неизвестному минералу. Стоит отметить, что названия минералов и материалов заполнителей трещин были взяты из имеющихся геологических колонок. Таким образом, например, в рамках соответствующей классификации были сделаны различия между карбонатом и кальцитом. Кроме того, в ходе составления геологических колонок делалось различие между каолинитом и глиной (глинистым материалом).

На основе собранных данных по минералам заполнителям трещин и степени трещиноватости массива был проведен корреляционный анализ. Его результаты продемонстрировали, что в пределах всей выборки не имеется четкой зависимости между минеральным составом трещинного заполнителя и составом вмещающей породы. Кроме того, не выявлены взаимосвязи между глубиной, величиной модуля трещиноватости, минеральным составом заполнителя трещин и составом вмещающей породы. Повышенные корреляционные коэффициенты были проявлены только для пар: «карбонат» – «кальцит» -0.55 , «калиевый полевой шпат» – «кварц» $+0.40$, «биотитовый плагиогнейс» – «долерит» -0.58 . Обнаруженные корреляции могут быть объяснены тем, что: 1) минеральная ассоциация карбонат - кальцит в подавляющем числе наблюдений совместно не встречается; 2) калиевый полевой шпат и кварц образуют устойчивую минеральную ассоциацию, по всей видимости, в результате поздних наложенных процессов гранитной мигматизации (внедрение позднего гранитного расплава в трещины) и метасоматических преобразований в гнейсовых толщах; 3) плагиогнейсы биотитовые являются самыми распространёнными породами, представленные на участке и чередуются в толще с базитовыми (долеритовыми) дайками.

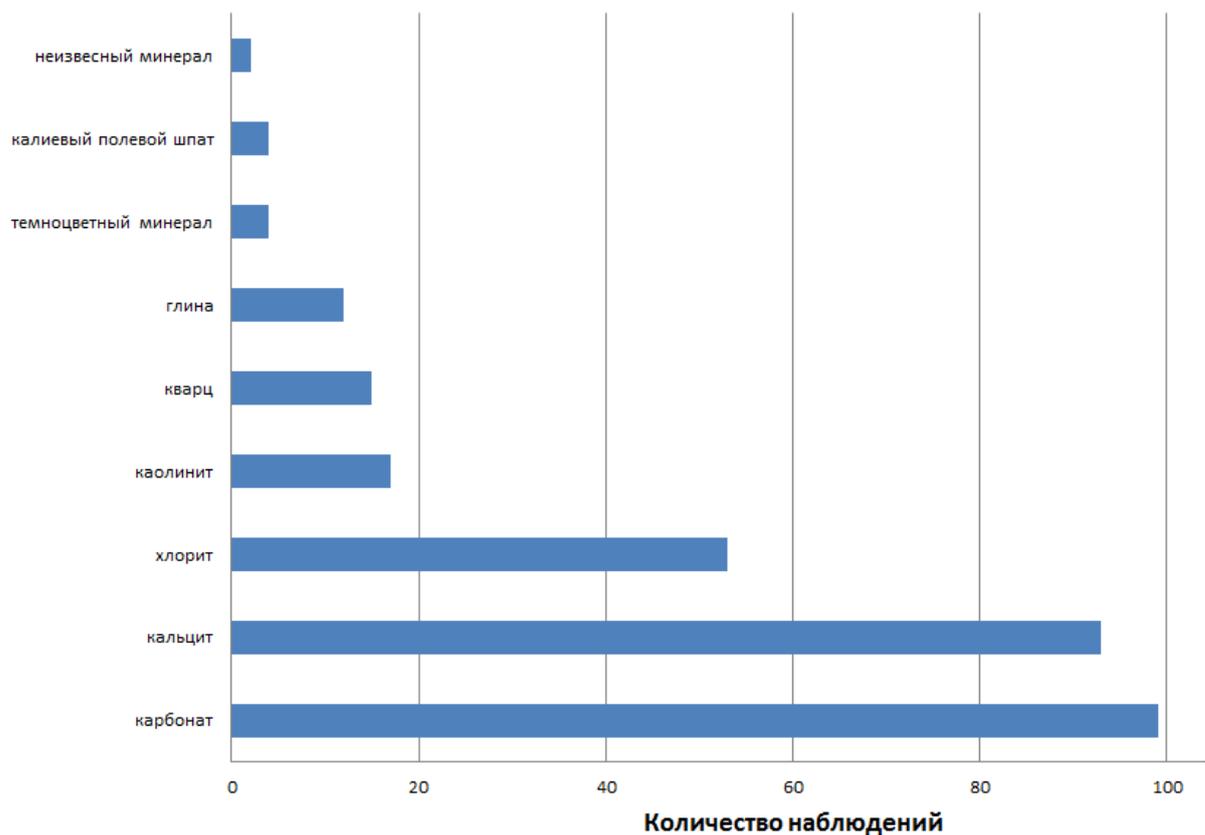


Рисунок 33. Распространенность минералов-заполнителей трещин по результатам анализа имеющихся геологических колонок

В целом, отсутствие явных взаимосвязей между составом пород и минеральными ассоциациями в трещинном пространстве может подтверждать идею о том, что внедрение даек базитов в гнейсовую толщу произошло ещё до наступления главного этапа метаморфизма. Последовавшая главная фаза метаморфизма привела к образованию серии трещин отрывов на контактах гнейсов и даек – это произошло в результате разнонаправленных тектонических подвижек, а также за счет разных прочностных характеристик этих пород. Процесс формирования трещиноватости сопровождался наложенным заполнением трещинного пространства продуктами гидротермально-метасоматических преобразований.

3.4.4 Результаты сорбционных испытаний

3.3.4.1 Результаты экспериментов по сорбционному взаимодействию растворенных радиоактивных компонентов и измельченных образцов материала-заполнителя трещинного пространства вмещающих пород участка «Енисейский»

Результатом сорбционных экспериментов по взаимодействию изотопов с измельченным материалом-заполнителем трещинного пространства является

коэффициент объемного распределения сорбированного компонента между раствором и твердой фазой (K_D) (Таблица 12).

Таблица 12. Осреднённые результаты сорбционных экспериментов с измельченным материалом-заполнителем

RN	Образец №, скважина, глубина (м)	Исходная активность ^{137}Cs в растворе, [Бк/л]	Активность ^{137}Cs в растворе после опыта, [Бк/л]	Коэффициент сорбционного распределения, K_D , [см ³ /г]	Среднее значение коэффициента сорбционного распределения, K_D , [см ³ /г]
^{137}Cs	Образец 1, Р-11, 442,2	$2,17 \cdot 10^6$	$2,85 \cdot 10^4$	3019,95	2191,91
	Образец 3, Р-11-1, 420,8	$2,17 \cdot 10^6$	$3,31 \cdot 10^4$	2570,40	
	Образец 4, Р-11-1, 454,6	$2,17 \cdot 10^6$	$5,18 \cdot 10^4$	1621,81	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$2,17 \cdot 10^6$	$3,10 \cdot 10^4$	2754,23	
	Образец 8, Р-13, 429,3	$2,17 \cdot 10^6$	$7,88 \cdot 10^4$	1047,13	
	Образец 9, Р-13, 432,6	$2,17 \cdot 10^6$	$3,95 \cdot 10^4$	2137,96	
^{90}Sr	Образец 1, Р-11, 442,2	$3,79 \cdot 10^5$	$2,34 \cdot 10^5$	19,05	35,96
	Образец 3, Р-11-1, 420,8	$3,79 \cdot 10^5$	$1,72 \cdot 10^5$	39,81	
	Образец 4, Р-11-1, 454,6	$3,79 \cdot 10^5$	$1,57 \cdot 10^5$	47,86	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$3,79 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^5$	28,84	
	Образец 8, Р-13, 429,3	$3,79 \cdot 10^5$	$2,16 \cdot 10^5$	23,99	
	Образец 9, Р-13, 432,6	$3,79 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^5$	56,23	
^{79}Se	Образец 1, Р-11, 442,2	80,7	86,6	-	2,72
	Образец 3, Р-11-1, 420,8	80,7	81,3	-	
	Образец 4, Р-11-1, 454,6	80,7	79,7	0,50	
	Образец 7, Р-12, 410,5	80,7	72,5	4,52	
	Образец 8, Р-13, 429,3	80,7	75,7	2,64	
	Образец 9, Р-13, 432,6	80,7	74,7	3,21	
^{152}Eu	Образец 1, Р-11, 442,2	$3,00 \cdot 10^4$	$3,86 \cdot 10^2$	3090,30	4394,43
	Образец 3, Р-11-1, 420,8	$3,00 \cdot 10^4$	$2,76 \cdot 10^2$	4265,80	
	Образец 4, Р-11-1, 454,6	$3,00 \cdot 10^4$	$2,47 \cdot 10^2$	4786,30	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$3,00 \cdot 10^4$	$2,52 \cdot 10^2$	4677,35	
	Образец 8, Р-13, 429,3	$3,00 \cdot 10^4$	$3,83 \cdot 10^2$	3090,30	
	Образец 9, Р-13, 432,6	$3,00 \cdot 10^4$	$1,86 \cdot 10^2$	6456,54	

^{239}Pu	Образец 1, P-11, 442,2	$1,03 \cdot 10^6$	$6,78 \cdot 10^3$	6025,60	4430,59
	Образец 3, P-11-1, 420,8	$1,03 \cdot 10^6$	$7,88 \cdot 10^3$	5248,07	
	Образец 4, P-11-1, 454,6	$1,03 \cdot 10^6$	$1,23 \cdot 10^4$	3311,31	
	Образец 7, P-12, 410,5	$1,03 \cdot 10^6$	$7,38 \cdot 10^3$	5495,41	
	Образец 8, P-13, 429,3	$1,03 \cdot 10^6$	$1,88 \cdot 10^4$	2137,96	
	Образец 9, P-13, 432,6	$1,03 \cdot 10^6$	$9,40 \cdot 10^3$	4365,16	
^{99}Tc	Образец 1, P-11, 442,2	$9,24 \cdot 10^3$	$8,90 \cdot 10^3$	1,53	1,17
	Образец 3, P-11-1, 420,8	$9,24 \cdot 10^3$	$8,98 \cdot 10^3$	1,16	
	Образец 4, P-11-1, 454,6	$9,24 \cdot 10^3$	$8,87 \cdot 10^3$	1,67	
	Образец 7, P-12, 410,5	$9,24 \cdot 10^3$	$8,97 \cdot 10^3$	1,20	
	Образец 8, P-13, 429,3	$9,24 \cdot 10^3$	$9,15 \cdot 10^3$	0,39	
	Образец 9, P-13, 432,6	$9,24 \cdot 10^3$	$9,00 \cdot 10^3$	1,07	

Анализируя результаты экспериментов по сорбции радионуклидов на измельченные образцы материала-заполнителя трещин, был сделан вывод, что наиболее эффективными сорбентами являются образцы 1 и 9: 1) породы из зоны контакта гнейсов и долеритов, глинизированные долериты (скважина P-11, глубина 442,2 метров) и 2) зона брекчированных гнейсов (скважина P-13, глубина 432,6 метров), соответственно. Наихудшим сорбентом является образец 8: долерит серый с зеленоватым оттенком и прожилками карбоната (скважина P-13, глубина 429.3 метров). Кроме того, интересным феноменом является то, что в соответствии с тенденцией сорбироваться на образцах нуклиды ^{137}Cs и ^{239}Pu , а также ^{152}Eu и ^{90}Sr могут быть объединены в 2 группы: первые два нуклида хорошо удерживаются образцами 1, 7, 3, а два последних сорбируются преимущественно на образцах 9 и 4.

Коэффициенты сорбционного распределения (K_D) нуклидов между подземным раствором и материалом-заполнителем трещинного пространства во вмещающей породе располагаются в ряду:

$$^{152}\text{Eu} (3066 - 6414) < ^{239}\text{Pu} (2157 - 6038) < ^{137}\text{Cs} (1059 - 2999) < ^{90}\text{Sr} (19.1 - 56.1)$$

3.3.4.2 Результаты экспериментов по сорбционному взаимодействию растворенных радиоактивных компонентов и поверхностей трещин на монолитных фрагментах пород участка «Енисейский»

Результатом сорбционных экспериментов по взаимодействию изотопов с измельченным материалом-заполнителем трещинного пространства является коэффициент объемного распределения сорбированного компонента между раствором и твердой фазой (K_A) (Таблица 13).

Таблица 13. Осреднённые результаты сорбционных экспериментов с монолитным материалом-заполнителем

RN	Образец №, скважина, глубина (м)	Исходная активность ^{137}Cs в растворе, [Бк/л]	Активность ^{137}Cs в растворе после опыта, [Бк/л]	Коэффициент сорбционного распределения, K_A , [см ²]	Среднее значение коэффициента сорбционного распределения, K_A , [см ²]
^{137}Cs	Образец 1, Р-11, 442,2	$5,76 \cdot 10^5$	$2,01 \cdot 10^4$	116,2	106,37
	Образец 2, Р-11, 487,8	$5,76 \cdot 10^5$	$3,96 \cdot 10^4$	56,9	
	Образец 5, Р-12, 359,6	$5,76 \cdot 10^5$	$5,95 \cdot 10^4$	36,5	
	Образец 6, Р-12, 381,0	$5,76 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^4$	169,1	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$5,94 \cdot 10^5$	$1,17 \cdot 10^4$	209,0	
	Образец 10, Р-13, 437,1	$5,76 \cdot 10^5$	$4,42 \cdot 10^4$	50,5	
^{90}Sr	Образец 1, Р-11, 442,2	$3,63 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	4,5	7,7
	Образец 2, Р-11, 487,8	$3,63 \cdot 10^5$	$2,14 \cdot 10^5$	2,9	
	Образец 5, Р-12, 359,6	$3,35 \cdot 10^5$	$2,22 \cdot 10^5$	2,1	
	Образец 6, Р-12, 381,0	$3,35 \cdot 10^5$	$6,90 \cdot 10^4$	16,2	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$3,35 \cdot 10^5$	$8,04 \cdot 10^4$	13,3	
	Образец 10, Р-13, 437,1	$3,35 \cdot 10^5$	$1,23 \cdot 10^5$	7,2	
^{152}Eu	Образец 1, Р-11, 442,2	$1,92 \cdot 10^4$	$2,02 \cdot 10^3$	35,7	86
	Образец 2, Р-11, 487,8	$1,92 \cdot 10^4$	$8,15 \cdot 10^3$	5,7	
	Образец 5, Р-12, 359,6	$1,92 \cdot 10^4$	$1,08 \cdot 10^4$	3,3	
	Образец 6, Р-12, 381,0	$3,02 \cdot 10^4$	$7,40 \cdot 10^3$	12,9	
	Образец 7, Р-12, 410,5	$3,02 \cdot 10^4$	$3,34 \cdot 10^2$	375,6	

	Образец 10, P-13, 437,1	$1,92 \cdot 10^4$	$9,27 \cdot 10^2$	82,8	
^{239}Pu	Образец 1, P-11, 442,2	$1,09 \cdot 10^4$	$6,82 \cdot 10^2$	63,1	33,77
	Образец 2, P-11, 487,8	$1,09 \cdot 10^4$	$4,80 \cdot 10^3$	5,3	
	Образец 5, P-12, 359,6	$1,09 \cdot 10^4$	$1,85 \cdot 10^3$	20,6	
	Образец 6, P-12, 381,0	$1,08 \cdot 10^4$	$1,70 \cdot 10^3$	22,6	
	Образец 7, P-12, 410,5	$1,08 \cdot 10^4$	$6,08 \cdot 10^2$	70,7	
	Образец 10, P-13, 437,1	$1,09 \cdot 10^4$	$1,87 \cdot 10^3$	20,3	

Обобщая результаты опытов можно сделать вывод, что в отличие от сорбции на измельчённые образцы материала-заполнителя трещин радионуклиды сорбируются на поверхность трещин монолитных фрагментов в целом однообразно.

В результате экспериментов по сорбции радионуклидов на поверхность трещин невозможно было выделить группы нуклидов, обладающих схожестью и характеризующихся избирательной сорбцией на какие-либо или иные образцы горных пород. Было показано, что эксперименты с поверхностью образца 7 (порода из зоны дробления в плаггиогнейсах, скважина P-12, глубина 410,5 метров) характеризуются наибольшими величинами поверхностного коэффициента распределения для изотопов ^{137}Cs , ^{152}Eu и ^{239}Pu . Наименьшие же значения K_A изотопов ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{90}Sr получены для поверхности образца 5 (долериты серые, мелкозернистые, скважина P-12, глубина 359,6 метров).

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что мобильные и долгоживущие нуклиды ^{79}Se и ^{99}Tc будут представлять наибольшую экологическую опасность, проникая в массив трещиноватых пород.

Кроме того, представляется интересным, что поведение ^{137}Cs и ^{239}Pu отличаются при их взаимодействии с измельченным материалом-заполнителем трещин в породах и при контакте этих компонентов с поверхностью трещин в монолитных образцах. Измельченный материал-заполнитель трещин в породах обладает повышенной сорбционной способностью для плутония относительно цезия, тогда как поверхностью трещин лучше сорбируется цезий, нежели плутоний.

Сводные диаграммы, обобщающие результаты всех сорбционных экспериментов отображены на рисунке 34.

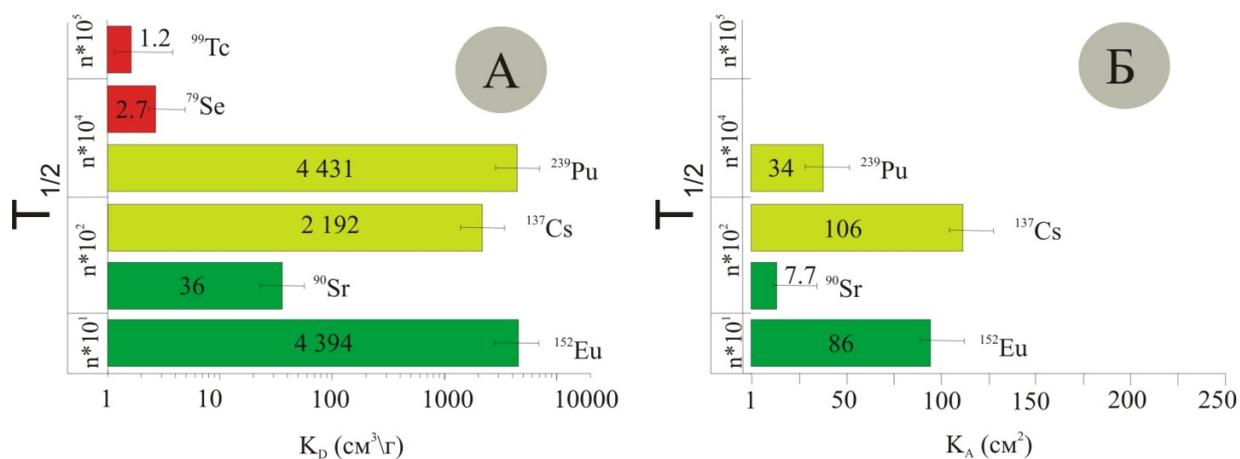


Рисунок 34. Коэффициенты распределения изотопов ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ⁷⁹Se, ⁹⁹Tc, ¹⁵²Eu, ²³⁹Pu определенные экспериментально на: А – измельченном материале-заполнителе трещин во вмещающих породах; Б – на поверхностях трещин монолитных образцов вмещающих пород.

Глава 4. МИГРАЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ

4.1 Схематизация гидрогеологических условий и расчет средней скорости фильтрации

Ранее мы рассматривали условия миграции радионуклидов в массиве и характерные значения сорбционных параметров, полученные в лабораторных условиях. В настоящей главе выполняются прогнозные оценки миграции радионуклидов.

Прежде чем перейти непосредственно к такого рода оценкам, рассмотрим особенности фильтрационного потока на участке, определяемые структурой фильтрационного потока и проницаемостью (коэффициентом фильтрации) пород. Для этого в работе использовались данные математического моделирования, выполненного ранее в ИГЭ РАН [25].

Фильтрационный процесс моделировался в безнапорной постановке, при задании на верхней границе среднегодовых значений инфильтрационного питания подземных вод, коррелирующих с рельефом.

Характер внешних гидродинамических границ во многом определялся структурой фильтрационного потока и расположением региональных зон разгрузки. Водораздел к востоку от проектируемого инженерного сооружения являлся непроницаемой границей второго рода. Северная и южная границы проведены по линиям тока, замыкающимся на береговой линии р. Енисей. Эти линии тока с гидродинамических позиций также являются непроницаемыми границами первого рода. Размеры модели составили 9000 м на 8000 м в плане и до 600 м глубиной.

Важным элементом схематизации является выделение профильных зон фильтрационной неоднородности. В соответствии с данными гидрогеологической разведки таких зон должно быть не менее трех. Нижняя граница модели соответствует абсолютной отметке залегания пород -350 м, ниже которой значения коэффициента фильтрации менее 10^{-4} м/сут.

Профиль проницаемости данной трехмерной модели аппроксимировался четырьмя слоями, фильтрационные свойства которых в плане оставались неизменным. Проницаемость (коэффициент фильтрации) каждого из слоев отвечала значению проницаемости соответствующего слоя, установленного как результат обобщения данных поинтервальных опытных опробований (Рис. 35).

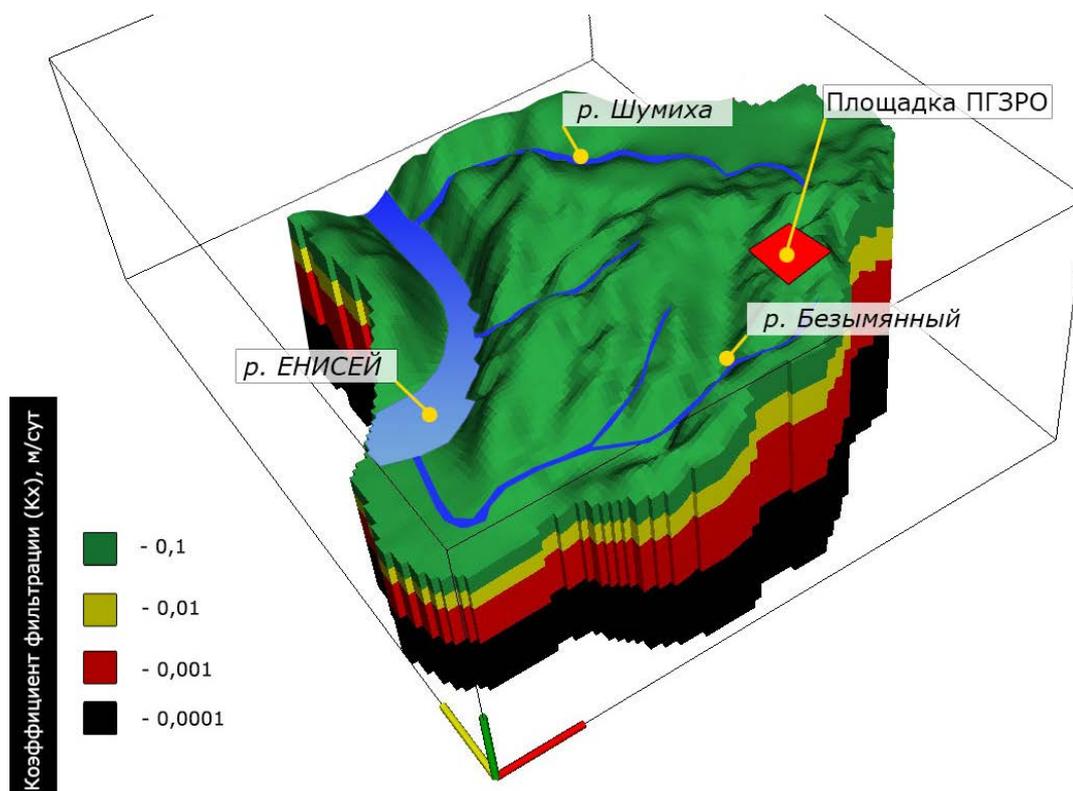


Рисунок 35. Распределение неоднородности коэффициента фильтрации, принятого в 3D модели

На модели, помимо р. Енисей, заданы водотоки второго порядка – Шумиха, Безымянный и Студеный. Модельные блоки верхнего слоя, «трассирующие» эти водотоки, реализуют гидродинамическое условие третьего рода, что позволяет имитировать реальные условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод.

В результате моделирования были сделаны выводы, что река Шумиха и ручьи (Безымянный, Студеный) оказывают дренирующее 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 отсутствует: подземные воды транзитом проходят этот участок и разгружаются в р. Енисей.

На основе другого программного модуля (FLOWPATH) были рассчитаны (построены) линии тока, характеризующие траектории и времена миграции частиц воды (инертных компонентов), от точек с заданными координатами до области разгрузки потока (рис. 36). Для этого использовалась профильная двухмерная постановка задачи. Наиболее представительным с точки зрения исследования фильтрационного процесса является профиль, совпадающий примерно с главной линией тока, проходящей по направлению от водораздела (области питания подземных вод) к зоне разгрузки

подземных вод в долине р. Енисей через площадку размещения проектируемого инженерного сооружения (рис. 36).

Как и в случае трехмерной модели, профильная модель имеет четырехслойное строения, причем мощность каждого из слоев коррелировалась с абсолютной отметкой рельефа поверхности. Значения послойного коэффициента фильтрации (сверху вниз): 1 слой – 0,1 м/сут, 2 слой – 0,01 м/сут, 3 слой – 0,001 м/сут, 4 слой – 0,0001 м/сут.

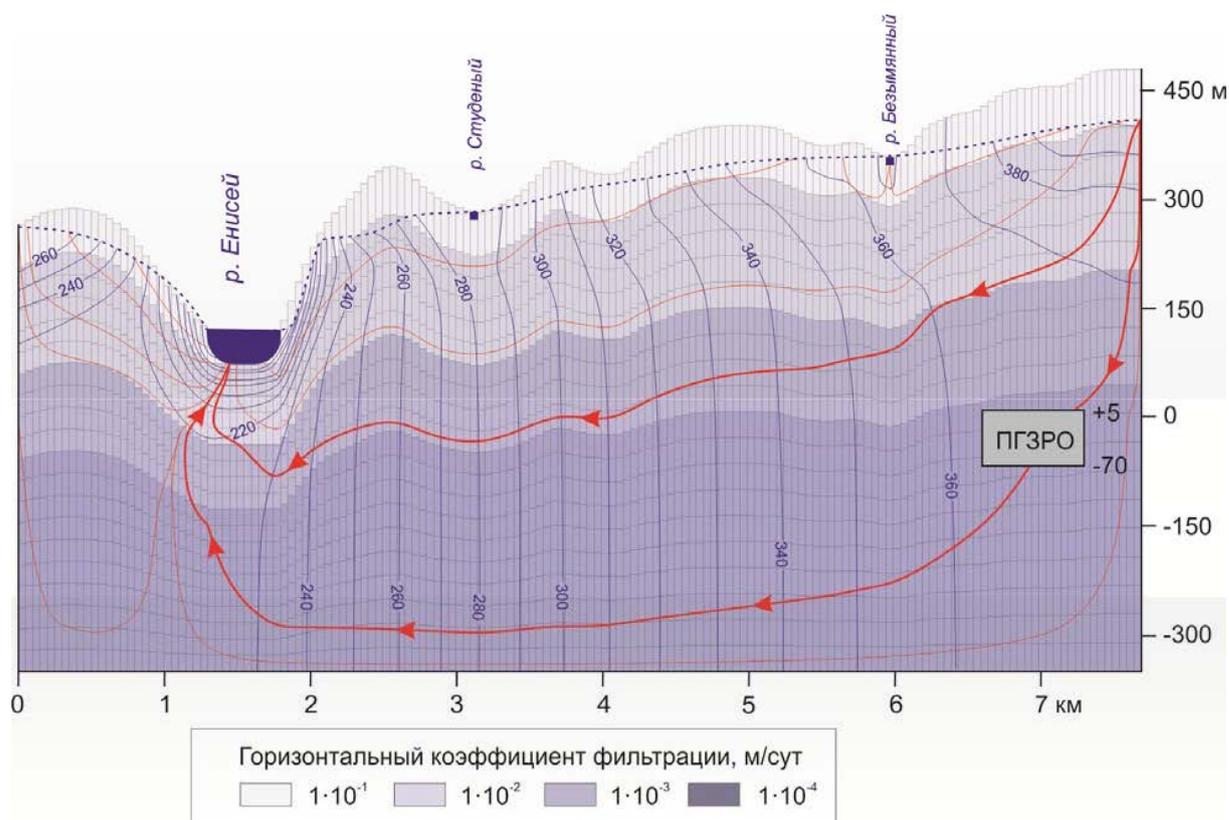


Рисунок 36. Основной расчетный профиль

Цветом показаны зоны породы, различающиеся коэффициентом фильтрации, тонкие синие линии – эквипотенциали, красные линии со стрелками – главные линии тока

Пористость матрицы (ϕ_m) при долговременных прогнозных оценках уменьшает скорость переноса, поскольку $u = q / (\phi_f + \phi_m)$; здесь и далее подстрочные индексы f (“fracture”) и m (“matrix”) отвечают трещинам и пористой матрице. Для гнейсов участка «Енисейский» в лаборатории GRS (Германия) выполнены специальных исследований по определению матричной пористости керна из скв. Р-12 (Табл. 14).

Таблица 14. Результаты исследований по определению матричной пористости керна из скв. Р-12 (глубины 176–476 м, 16 испытаний)

Характеристика	Минимум	Максимум	Среднее
Естественная влажность [%]	0,02	0,19	0,09
Влажность при полном насыщении [%]	0,05	0,48	0,15
Плотность (сух.) [г/см³]	2,66	3,49	2,89

Эффективная пористость [%]	0,16	1,27	0,48
----------------------------	------	------	------

Как видно, среднее значение эффективной пористости составляет 0,48%, однако, если учесть, что из 16 определений 14 опытов попали в более узкий интервал 0,18–0,59%, то среднее значение может быть скорректировано: $\phi_m = 0,3\%$. Анализ опубликованных данных, полученных для других регионов, показывает, что матричная пористость гнейсов не превышает 0,2–0,3% [25], т.е. является величиной одного порядка с трещиноватостью ($\phi_f = 0,2–0,5\%$), что хорошо согласуется с представленными опытными данными. Таким образом, эффективная (суммарная) пористость составляет около 0,6%.

Для главной линии тока, проходящей через ПГЗРО и замыкающейся на р. Енисей, было получено время миграции (t_0), равное 1710 лет. Зная длину каждой линии тока, $L=5200$ м, и эффективную пористость массива, $\phi_e = \phi_f + \phi_m$, можно рассчитать среднюю эффективную скорость фильтрации Дарси:

$$q = \frac{Ln}{t_0}, \quad (1)$$

Отсюда находим среднюю скорость Дарси $1.8 \cdot 10^{-2}$ м/год.

Очевидно, средняя действительная скорость массопереноса может быть определена по формуле:

$$u = \frac{q}{n} \quad (2)$$

Она в этом случае составляет около 3 м/год.

4.2. Миграция радионуклидов в трещиноватой среде, включающей выдержанные по протяженности зоны тектонической (сдвиговой) деформации

4.2.1. Триpletная модель

Рассмотрим миграцию радионуклидов в фильтрационном потоке подземных вод, имеющем место в трещиноватых породах, разрез (профильное сечение) которых представлен тремя характерными для таких пород литолого-структурными единицами – зонами (рис.37): 1) зоной «фоновой» трещиноватости (m_0, n_0), 2) зоной с повышенной степенью трещиноватости (m_1, n_1) и 3) зоной высокой степени дезинтеграции исходного трещиноватого массива – дисперсным (пористым) материалом (m_2, n_2). Здесь буквенный символ n отвечает трещиноватости (индексы 0 и 1 отвечают условным номерам зон) или пористости (зона 3), а m – мощности, причем $m_0+m_2+m_3 = M$ (рис. 37). Вторая и третья зоны могут интерпретироваться как интервал тектонического дробления, образовавшийся

в результате развития сдвиговых (тектонических) деформаций в скальном трещиноватом массиве. Ядро такой зоны деформации обычно представлено несколькими дисперсными фракциями – от глинистой до щебенисто-гравийной.

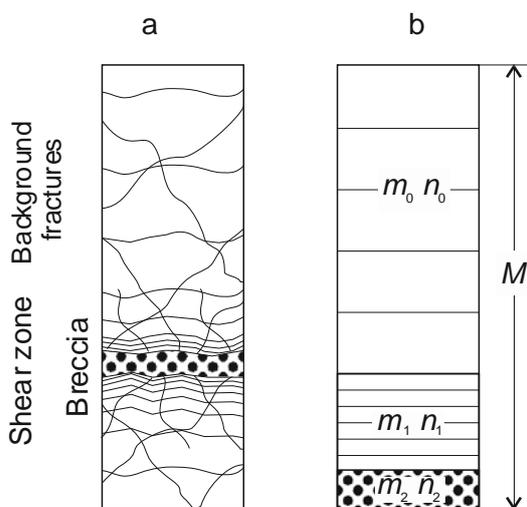


Рис. 37. (а) Схематичное представление проницаемого интервала трещиноватых пород, состоящего из «фоновых» трещин и зоны сдвиговой деформации, включающей ядро дисперсных пород, и (b) концепция трехзонной («триплет») модели для этого интервала

Оценим влияние сорбции в такой «триплетной» системе на скорость миграции радионуклидов, переносимых подземными водами, полагая, что все три зоны, имея различную проницаемость (коэффициент фильтрации, k_f), гидравлически взаимосвязаны между собой, а их сорбционная емкость определяется сорбцией на поверхности трещин (первая и вторая зоны) и на пористом материале – третья зона. При этом рассматриваются весьма продолжительные времена миграции и региональный масштаб задачи, обеспечивающие выполнение критерия *асимптотического* режима переноса в многослойной системе [15], которая ведет себя в этом случае подобно однородному пласту с эффективными параметрами. Асимптотический режим подразумевает, что за счет поперечного диффузионно-гидродисперсионного обмена веществом между профильными зонами с течением времени в достаточно протяженной системе (региональный масштаб) формируется единый концентрационный фронт, скорость перемещения которого определяется средней скоростью Дарси

$$q = -k_e \nabla H, \quad (3)$$

и эффективной трещиноватостью, n_e , учитывающей в обобщенном виде сорбционные взаимодействия, так что действительная скорость миграции (dx/dt) единого фронта в эквивалентном пласте в направлении вектора x средней скорости фильтрации будет

$$\frac{dx}{dt} = u^s = \frac{q}{n_e}. \quad (4)$$

Эффективный коэффициент фильтрации, k_e , определяется суммарной проводимостью системы:

$$k_e = \frac{T}{\sum m} = \frac{k_0 m_0 + k_1 m_1 + k_2 m_2}{m_1 + m_2 + m_3}. \quad (5)$$

Введем два парциальных коэффициента, $M_{зд}$, и ξ , которые определяются при геологическом описании разреза и характеризуют геометрию выбранного расчетного элемента («триплета»):

первый, $M_{зд}$, отвечает относительной мощности зоны деформации, включающей дисперсный материал, в общем расчетном сечении

$$M_{зд} = \frac{m_1 + m_2}{M}, \quad (6)$$

второй, ξ , – доля пористого дисперсного материала в общем объеме зоны сдвиговой деформации породы

$$\xi = \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \quad (7)$$

Тогда преобразование формулы (5) дает соотношение для эффективного коэффициента фильтрации

$$k_e = (1 - M_{зд})k_0 + (1 - \xi)M_{зд}k_1 + \xi M_{зд}k_2. \quad (8)$$

Теперь перейдем к определению эффективной (зависящей от сорбции) трещиноватости породы n_e . Будем считать, что физическими характеристиками рассматриваемой среды, наряду с трещиноватостью/пористостью (n_i), является удельная поверхность «фоновых» трещин (ω_{b0}) и трещин зоны тектонической деформации (ω_{b1}) поверхность, омываемая потоком воды в проницаемых зонах/трещинах (в западной литературе «*flow wetted surface: the specific surface area between the rock and the flowing water*»); значения ω_{b0} и ω_{b1} обычно существенно (на несколько десятичных порядков в меньшую сторону) отличаются от геометрической величины удельной поверхности, определяемой по плотности трещин и конфигурации породных блоков; K_a – коэффициент сорбции на поверхности трещин; K_d – коэффициент объемной сорбции на пористом материале, ρ_{sp} – объемный вес скелета пористого материала.

Составим уравнение баланса для единичного элемента трубки тока, ось которой совпадает с направлением x потока подземных вод. Для этого выберем произвольное сечение Mdy , через которое поступает объемный расход воды Q ($Q = qMdy$, q – средняя скорость Дарси), содержащей растворенный радионуклид в концентрации C_0 . Пусть за время dt происходит смещение фронта поршневого вытеснения радионуклида, сорбция которого описывается линейной изотермой, на величину dx . Тогда балансовое уравнение для случая нулевой начальной концентрации радионуклида в трещиноватой среде, содержащей и пористый материал, принимает вид:

$$QC_0 dt = (m_0 n_0 + m_1 n_1 + m_2 n_2) C_0 dy dx + [\omega_{b0} m_0 K_a + \omega_{b1} m_1 K_a + \gamma K_d m_2 (1 - \phi_p) \rho_{sp}] C_0 dy dx. \quad (9)$$

Здесь в левой части тождества – масса (активность) радионуклида, поступившего в расчетный элемент через сечение Mdy за время dt . Правая часть тождества – распределение этой массы в объеме среды Mdx , которое складывается:

(1) из содержания радионуклида в жидкой фазе, заполняющей трещины и поры (первый член в правой части формулы);

(2) из массы радионуклидов в твердой фазе (в адсорбированном состоянии) – на поверхности трещин (первые два члена в квадратных скобках правой части) и на пористом материале (третий член), причем, в формулу мы внесли поправочный коэффициент (γ) для сорбции на пористом материале, учитывающий неэквивалентность (по размеру фракции) лабораторных опытов с порошками и реальным заполнителем зон дробления – щебнистый материал.

Уравнение (4), с учетом соотношения (6) и (7) для характеристик $M_{зд}$ и ξ , преобразуется к виду

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{(1 - M_{зд})n_0 R_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1 R_1 + \xi M_{зд}n_2 R_2}, \quad (10)$$

определяющему перемещение сорбционного фронта вытеснения во времени, где R_0 , R_1 и R_2 – факторы сорбционной задержки, традиционно определяемые выражениями

$$R_0 = 1 + \omega_{b0} K_a / n_0, R_1 = 1 + \omega_{b1} K_a / n_1, R_2 = 1 + \gamma K_d (1 - n_2) \rho_b / n_2, \quad (11)$$

и характеризующие сорбцию на трещинах и пористом материале.

Из сравнения (4) и (10) видно, что эффективная трещиноватость, n_e , является параметром, «структурно» подобным эффективному коэффициенту фильтрации (12):

$$n_e = (1 - M_{зд})n_0 R_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1 R_1 + \xi M_{зд}n_2 R_2. \quad (12)$$

Решение (13) используется для расчета переноса сорбируемого радионуклида на расстояние $x = L$ за время t в одномерном потоке

$$T = \frac{L[(1 - M_{зд})n_0R_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1R_1 + \xi M_{зд}n_2R_2]}{q}. \quad (13)$$

Формула (10) дает известные частные представления. Так, при $\xi = 0$ и $n_0 = n_1 = n$, $R_0 = R_1 = R$ приходим к формуле, описывающей массоперенос в «чисто» трещиноватой однородной среде:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{nR}. \quad (14)$$

При $\xi = 1$ и $M_{зд} = 1$ (все система представлена пористым материалом):

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{n_2R_2}. \quad (15)$$

Наконец, случай $M_{зд} = 1$, $\xi < 1$ может ассоциироваться с миграцией в трещиноватой среде, часть трещин, ξ , в которой заполнена продуктами выветривания – пористым материалом:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{q}{(1 - \xi)n_1R_1 + \xi n_2R_2}. \quad (16)$$

Последняя формула (16) отвечает также важному случаю миграции в трещиноватых породах, поверхность трещин которых была подвержена физическому выветриванию и таким образом обладает повышенной пористостью (n_2) и сорбционными свойствами (R_2). В этом случае коэффициент ξ – относительная толщина слоя выветрелой поверхности трещин в общем ее раскрытии.

Дополнительная сорбционная емкость пород, обусловленная сорбцией в пористой матрице, насыщение которой радионуклидами происходит под влиянием молекулярной диффузии, может быть учтена подобным образом.

Наконец, если предположить, что миграция химически инертного (несорбируемого) компонента определяется средневзвешенным значением трещинной пустотности (с учетом поровой компоненты)

$$n_e^{n/s} = \frac{n_0m_0 + n_1m_1 + n_2m_2}{m_1 + m_2 + m_3},$$

$$\text{или } n_e^{n/s} = (1 - M_{зд})n_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1 + \xi M_{зд}n_2, \quad (17)$$

то эффективный фактор сорбционной задержки будет определяться выражением:

$$R_e = \frac{u^{n/s}}{u^s} = \frac{(1 - M_{зд})n_0R_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1R_1 + \xi M_{зд}n_2R_2}{(1 - M_{зд})n_0 + (1 - \xi)M_{зд}n_1 + \xi M_{зд}n_2}. \quad (18)$$

Последняя характеристика удобна при переходе к моделям эквивалентной пористой (сплошной) среды.

4.2.2. Расчет миграции радионуклидов на участке «Енисейский»

Как отмечалось ранее (разд. 3.2), исходя из геологического описания колонок скважин, анализа керн и каротажных диаграмм, в каждой из скважин с разрешением 10 м, могут быть выделены несколько потенциально проницаемых и условно непроницаемых (монолитных) интервалов, в определенной последовательности сменяющих друг друга (рис. 38). Пространственная структура и степень гидравлической взаимосвязи проницаемых интервалов вне скважинных разрезов могут рассматриваться только в свете вероятностного анализа и определяться характером интерполяционных процедур, в основе которых лежат методы геостатистики.

Каждый из выделенных десятиметровых проницаемых интервалов пород (рис. 38) представляет собой кластер, состоящий из одной или нескольких элементарных зон тектонической (сдвиговой) деформации, имеющих зональное строение, т.е. в ней выделяется ядро раздробленных пород, окруженное системой затухающих на удалении от него периферийных трещин, плотность которых существенно выше плотности трещин в окружающем массиве (рис. 37). В качестве примера приведем фотографию керн из скв. Р-10, на которой достаточно хорошо идентифицируется две элементарные зоны повышенной трещиноватости (локальных сдвиговых деформаций) с ядрами раздробленных пород в интервалах 240.8–243.8 м и 244.2–245.1 м.



Рисунок 38. Фотография керн, на которой видны две зоны (в интервалах 240.8–243.8 м и 244.2–245.1 м) сдвиговой деформации пород.

Таким образом, имеет место аналогия со структурой ранее описанной триплетной модели, характерный масштаб которой $M = 10$ м, т.е. безразмерной модельной характеристике $M_{зд}$ на графиках рис. 21 соответствует величина $M_{зд10}/10$.

Основываясь на представленной ранее теоретических предпосылках (разд. 4.2.1), рассмотрим идеализированную (концептуальную) геомиграционную модель гнейсового массива, фильтрационные и миграционные свойства которого могут быть определенным образом осреднены. Предельным вариантом такого осреднения будет чередование проницаемых интервалов, где миграция описывается в рамках асимптотической триплетной модели с эффективными параметрами, и непроницаемых интервалов (где фильтрацией воды можно пренебречь), неограниченной протяженности. Возможностью массообмена между проницаемыми и непроницаемыми интервалами, а также между трещинами и породной матрицей посредством диффузии, мы также пренебрегаем, что дает некоторый инженерный запас в расчетах.

В реальном массиве, конечно, проницаемые зоны разреза являются прерывистыми структурами, гидравлическая взаимосвязь между которыми обеспечивается перетоком воды по системе субвертикальных трещин. Прерывистость фильтрующих интервалов может быть приближенно учтена в пониженном значении коэффициента фильтрации. Так, если среднее значение коэффициента фильтрации проницаемых интервалов породы составляет $3 \cdot 10^{-3}$ м/сут, то мы в своих расчетах примем значение $1 \cdot 10^{-3}$ м/сут.

Далее, для определенности, будем рассматривать одномерный фильтрационный поток от ПГЗРО в западном направлении, в сторону долины р. Енисей, расстояние до которой 5200 м (рис. 36). Гидравлический градиент, исходя из отметок напора воды, составляет: $J = (380-120)\text{м}/5200 \text{ м} = 0.05$. Таким образом, средняя скорость фильтрации определяется величиной

$$q = kJ = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.05 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/сут} = 0.018 \text{ м/год},$$

что, примерно, отвечает данным решения фильтрационной задачи (разд. 4.1).

Трещиноватость массива за пределами развития зон сдвиговых деформаций составляет доли процента, $n_0 = 0.003$ [19]. В зонах тектонической деформации пород она возрастает до значений 0.5–1% (далее примем $n_1 = 0.006$). В зоне максимальной раздробленности пород (ядро, представленное дисперсным материалом) можно в качестве первого приближения принять $n_2 = 0.1$.

Как уже отмечалось, выбор эффективных параметров ω_{b1} и ω_{b0} (удельная поверхность трещин, доступная для фильтрационного потока), не может основываться на описании кернового материала, поскольку эти величины сильно зависят от степени

структурирования фильтрационного потока в трещинном пространстве. Под этим явлением понимается концентрирование расхода движущихся частиц воды в ограниченном количестве трещин, образующих проводящие каналы, в то время как основной объем трещинного пространства остается заполненным неподвижной (застойной) водой, а, следовательно, поверхность трещин в застойных зонах оказывается недоступной для сорбируемого вещества в составе растворов, движущихся в проводящих каналах. Концентрирование потока в обособленных системах трещин-каналах, получила название «эффекта канализации» [34].

Методике изучения параметров ω_{b1} (ω_{b0}) посвящена специальная литература [31; 32; 34]. Мы воспользуемся результатами такого рода работ, обобщенных в отчете СКВ [32]. Автор этого отчета считает, что для проницаемых интервалов в кристаллических гранитногнейсовых породах наиболее вероятные значения ω_{b1} находятся в диапазоне $0.01-1 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Для фоновой трещиноватости значение удельной поверхности, ω_{b0} , в несколько раз ниже; далее будем считать $\omega_{b0} = 0.1\omega_{b1}$. В формулу (11) для расчета фактора сорбционной задержки R_2 входит коэффициент γ , определяющий соотношение удельной поверхности дисперсных пород в зоне дробления к удельной поверхности порошкового материала, используемого в лабораторных опытах. В наших расчетах будем полагать $\gamma = 0.01$. Наконец, доля дисперсного материала ξ в зонах сдвижения, как показывает изучение кернового материала, может меняться от первых процентов до десятков процентов.

Погрешности расчетов времени миграции по формуле (13) во многом связаны с неопределенностью задания двух характеристик трещиноватого массива – коэффициентов ω_{b1} и ξ . Поэтому дальнейший анализ имеет смысл выполнить в рамках диапазонных оценок. Так, мы предлагаем задаться крайними значениями ω_{b1} , рекомендуемого в работе [32] диапазона (0.01–1), меняя долю дисперсного материала в зоне тектонической деформации, ξ , в диапазоне от 0.01 до 0.1, рассчитывая при этом характерные времена миграции различных радионуклидов от источника радиоактивного загрязнения подземных вод до зоны их разгрузки в поверхностный водоток. Другой вариант – фиксированные ξ (0.01 и 0.1) при различных ω_{b1} (0.01–1).

Результаты расчетов представлены графически на рис. 39 и рис. 40. Для инженерного запаса взяты минимальные коэффициенты сорбционного распределения (K_A , K_D) (таблица 15).

Таблица 15. Сорбционные параметры, используемые для расчетов

RN	K_D	K_A
^{137}Cs	2191,91	106,37
^{90}Sr	35,96	7,7
^{79}Se	2,72	0
^{152}Eu	4394,43	86
^{239}Pu	4430,59	33,77
^{99}Tc	1,17	0
H_3	0	0

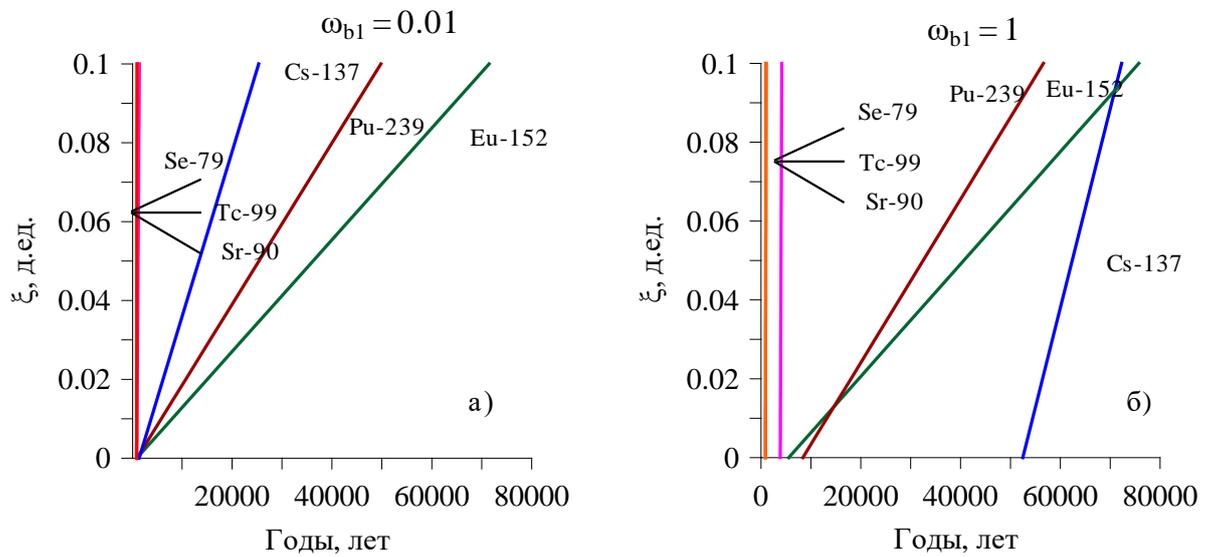


Рисунок 39. Влияние доли дисперсного материала в трещине при фиксированном значении удельной поверхности (а) $\omega_{b1} = 0.01$, б) $\omega_{b1} = 1$) на время миграции радионуклидов

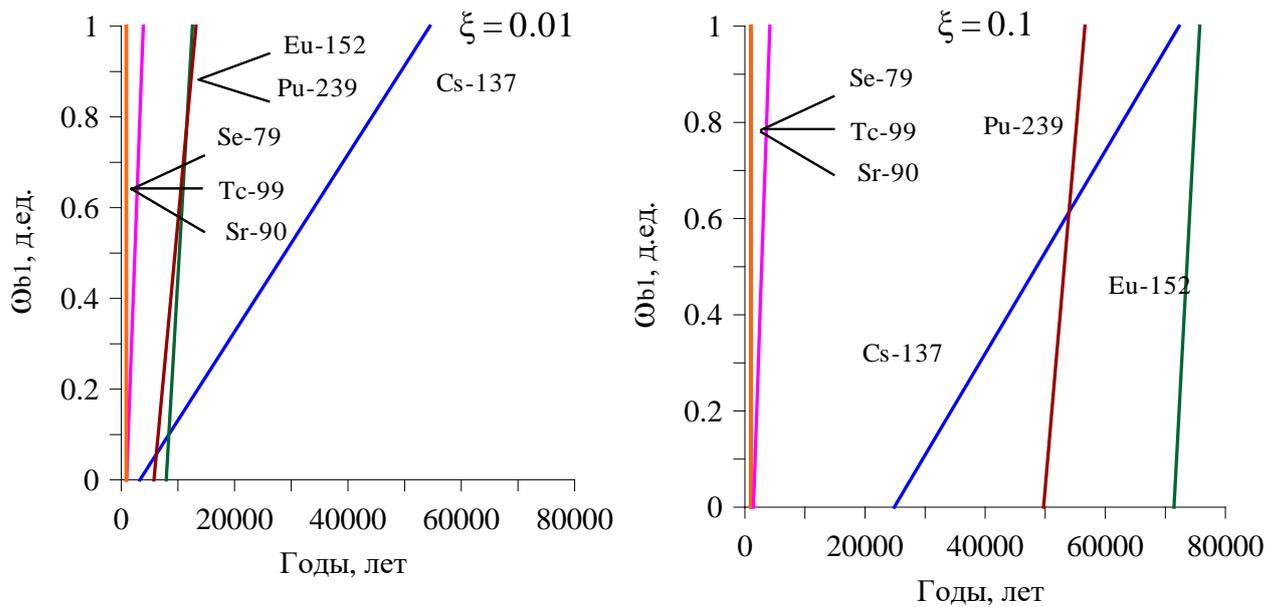


Рисунок 40. Влияние значения удельной поверхности при фиксированном значении доли дисперсного материала (а) $\xi = 0.01$, б) $\xi = 0.1$) на время миграции радионуклидов

Из представленных графиков видно, что первая группа из четырех радионуклидов (^{79}Se , ^{99}Tc , H^3 , ^{90}Sr) на графике представлена прямыми, практически параллельными оси ординат, которые слабо реагируют на изменение коэффициентов ω_{bl} и ξ , что в свою очередь связано с инертностью данных радионуклидов (не сорбируются).

Графики времени миграции Плутония и Европия ведут себя подобным образом: время миграции заметно больше, чем у радионуклидов первой группы. Если говорить о реакции на изменение удельной поверхности и доли дисперсного материала в трещинах, то здесь также можно отметить слабую реакцию сорбционного распределения – время миграции практически не изменяется. То есть эти радионуклиды равномерно распределяются на различных видах поверхности (поры, зона милонитизации, трещины) в сравнении с другими радионуклидами.

Цезий ведет себя противоречиво: как только увеличивается плотность трещин или удельная поверхность заполнителя трещин, сразу замедляется скорость миграции (время миграции резко увеличивается), это связано с тем, что радионуклид плохо сорбируется на дисперсном материале, а на поверхности трещин наоборот, поэтому здесь можно говорить о высокой чувствительности сорбционного распределения данного радионуклида к параметрам вмещающей среды.

Анализ расчетов позволяет сделать следующие выводы:

1. степень сорбции одних радионуклидов может быть различна в сравнении с другими на порах, на дисперсном материале или на трещинах;

2. учитывая наличие дисперсной фракции, значение сорбционного распределения может значительно изменяться.

Таким образом, по чувствительности сорбционного распределения можно выделить 3 группы радионуклидов:

1. Инертные. В эту группу входят четыре радионуклида: ^{79}Se , ^{99}Tc , H^3 , ^{90}Sr . Данные радионуклиды практически не реагируют на увеличение дисперсного материала и плотности трещин, поэтому скорость миграции очень высока, а время пребывания радионуклидов в породе составляет около 1300 лет.
2. Слабочувствительные. К этой группе можно отнести радионуклиды ^{239}Pu и ^{152}Eu они равностепенно распределяются на различных видах поверхности.
3. Сильночувствительные. В эту группу входит радионуклид Цезия ^{137}Cs . Он хорошо сорбируется на поверхности трещин в отличие от дисперсного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем основные выводы, полученные в ходе данного исследования.

1. В основу настоящей работы положена геологическая информация, полученная в процессе: (1) обобщения геолого-структурной и геоморфологической информации по району как результат геологической съемки территории и геодинамических наблюдений; (2) бурения 14 скважин; (3) разнообразных геофизических зондирований массива с поверхности; (4) комплексного геофизического каротажа скважин; (5) исследования (испытания) образцов керна в лабораторных условиях; (6) опытно-фильтрационных работ (ОФР).

2. Геологический разрез участка представлен двумя генетически различающимися глобальными зонами дезинтеграции массива:

(а) верхней – зоной экзогенной трещиноватости (связанной с физическим и химическим выветриванием),

(б) нижней – зоной сдвиговых (тектонических) деформаций (связанной с денудацией массива за счет развития напряжений сдвига).

Мощность зоны экзогенной трещиноватости, относительно выдержанной по простиранию, составляет 80–200 м. Представлена эта зона более-менее регулярной сеткой водопроводящих и гидравлически взаимосвязанных трещин. Зона тектонических деформаций прослеживается до глубин 600 м и более от поверхности. Она характеризуется присутствием в массиве линейных структур – локальных (дискретных) зон разуплотнения и связанными с ними следующих геологических объектов:

- зон тектонических (тектоно-метасоматической) брекчий;
- интрузивных тел в виде магматических даек нескольких генераций, трассирующих разрывные нарушения в гнейсовом массиве;
- зон тектонической постмагматической дезинтеграции массива

3. В работе основное внимание уделено линейным тектоническим структурам в глубоких частях геологического разреза, а конкретнее - выделению и количественному описанию двух структурно-генетических типов зон постмагматической дезинтеграции:

- (а) зон трещиноватости (рассланцевания);
- (б) зон дробления (со следами милонитизации). Именно эти зоны являются ответственными за формирование превалирующих путей миграции радионуклидов в массиве.

4. Целый ряд специфических параметров, характеризующих геометрию, пространственное положение и физические свойства этих структур, были переведены в цифровой формат и занесены в базу данных (БД). Таким образом, задокументировано около 7600 п.м. керн из 14 геологических и гидрогеологических скважин, пробуренных на участке «Енисейский».

5. Были обоснованы специальные методические подходы, позволяющие исключить интервалы с повышенной трещиноватостью керн, связанные с влиянием техногенного фактора – процессом бурения скважины.

6. Проведенные исследования включали также повторное обследование керн в кернохранилище (отбор характерных образцов керн для изучения микротрещиноватости в шлифах и минералогического изучения продуктов выветривания на поверхности трещин и трещинного заполнителя), лабораторное исследование образцов в шлифах и вещественного и минералогического состава заполнителя трещин, определение генезиса трещин и трещинных зон, а также роли секущих даек (основного состава позднеархейского и раннепротерозойского возрастов) в формировании структуры трещинного пространства массива вмещающих гнейсов, анализ данных ранее выполненного комплексного геофизического каротажа скважин и оценка корреляционных связей геофизических параметров с трещиноватостью массива, статистический анализ распределения зон трещиноватости различного структурного порядка.

7. Анализ полученного материала показал относительно хорошее совпадение пиковых значений электропроводности с зонами, выделенными нами (после исключения участков техногенного нарушения сплошности при бурении) как зоны с повышенными значениями показателя раздробленности пород, обычно $M_{зд10} > 0.4$ м/10 м. Вполне значимая корреляция отмечается между пиками электропроводности и зонами повышенной трещиноватости ($M_{тр} > 15-20$). Такая согласованность разнородных параметров позволяет интервалы, где наблюдается подобное совпадение, относить к зонам истинной (тектонической) дезинтеграции массива. Монолитные участки пород характеризуются слабо меняющимися по глубине значениями электрической проводимости.

8. Системы трещин и зон дробления, а также дайки, пересекающие интервал бурения скважин, были описаны с помощью методов геостатистики (позволяющих оценить частоту встречаемости, статистический закон распределения и пространственную корреляцию).

8.1. Распределения модуля трещиноватости и расстояния между индивидуальными трещинами являются логнормальными. Полученные суммарные

гистограммы указывают на резкое преобладание интервалов с частотой встречаемости трещин – через каждые 10–15 см. Эти диапазоны значений характеризуют первичную («фоновую») трещиноватости гнейса. Доля интервалов, характеризующихся более высокой плотностью трещин, которая может быть отнесена к категории зон с повышенной трещиноватостью (рассланцевания) ($M_{тр} > 15–20$, расстояние между трещинами менее 5–7 см), относительно невелика.

8.2. Логнормальным является и распределение мощностей элементарных зон дробления (ЭЗД). Низкая статистическая дисперсия свидетельствует о слабой изменчивости рассматриваемого показателя, колеблющегося в довольно узком диапазоне 0.05–0.2 м (среднее значение 0.15 м).

8.3. Средняя мощность даек второй генерации, многократно уступает мощности даек первой генерации. Дайки первой генерации образуют относительно регулярные линейные структуры. Напротив, пространственная структура даек второй генерации отличается крайней нерегулярностью: этим дайкам свойственно группироваться в отдельных областях массива, образуя подобие кластеров.

9. Для определения минерального и химического состава аншлифы образцов пород из зон дробления и милонитизации были изучены на сканирующем электронном микроскопе. Породы из такого рода зон представляют собой сильно раздробленную и перетертую массу. Размер ненарушенных обломков в этой массе – первые миллиметры. Обломки сцементированы светлым зеленовато-серым материалом. Основной минеральный состав представлен кварцем, серицитом и хлоритом с небольшой примесью кальцита и отдельными вкрапленниками рудных и аксессуарных минералов.

10. Особенности миграции ряда радиоактивных загрязнителей (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{79}Se , ^{99}Tc , ^{152}Eu , ^{239}Pu) были изучены в ходе проведения лабораторных экспериментов по взаимодействию водных растворов, содержащих указанные изотопы с материалом-заполнителем трещин из массива трещиноватых пород участка «Енисейский».

В результате сорбционных экспериментов были получены оценки коэффициентов сорбционного распределения радиоактивных компонентов между подземными растворами и указанными породами. При проведении исследований с участием материала-заполнителя трещин в горных породах было проведено две серии опытов: оценка сорбционной способности измельченного породного материала и оценка сорбции радионуклидов на поверхностях трещин монолитных фрагментов пород.

Результаты сорбционных экспериментов с участием материала-заполнителя трещин показали, что компоненты ^{137}Cs и ^{239}Pu сорбируются преимущественно на горные породы из зон дробления гнейсов и долеритов, затронутых выветриванием. При

этом изотопы ^{152}Eu и ^{90}Sr удерживаются породами, которые представлены брекчированным материалом гнейсов и долеритов.

11. Анализ расчетов времени миграции позволила сделать следующие выводы:

- а) степень сорбции одних радионуклидов может быть различна в сравнении с другими на породах, на дисперсном материале или на трещинах;
- б) учитывая наличие дисперсной фракции, значение сорбционного распределения может значительно изменяться.
- в) по чувствительности сорбционного распределения можно выделить 3 группы радионуклидов:
 1. Инертные. В эту группу входят четыре радионуклида: ^{79}Se , ^{99}Tc , H^3 , ^{90}Sr . Слабочувствительные. К этой группе можно отнести радионуклиды ^{239}Pu и Eu .
 2. Сильночувствительные. В эту группу входит радионуклид Цезия ^{137}Cs .

Более обоснованный прогноз миграции радионуклидов нуждается в проведении детальных геолого-структурных изысканий, экспериментальных исследований.

В этой связи рекомендуется провести дополнительные работы:

- бурение опытных скважин должно выполняться с полным отбором керна и его детальным описанием, прежде всего, направленным на изучение плотности, геометрии и пространственной ориентации трещин;
- организовать дополнительный отбор образцов в объеме, достаточном для полноценного исследования сорбционных свойств пород участка «Енисейский»;
- проведение опытно-фильтрационных работ в виде продолжительных кустовых откачек, поинтервальных нагнетаний и комбинированных (дуплетных) схем опробования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. Б. Андерсон, Ю. М. Рогозин, Е. А. Смирнова, Р. В. Брызгалова, Н. Р. Андреева, С. И. Малимонова, С. И. Шабалев, “Сорбционно-барьерные свойства гранитоидов и андезито-базальтовых метавулканитов относительно америция(III) и плутония(IV)”, Труды Радиевого института им. В. Г. Хлопина, 2007, с. 169–191.
2. Андерсон Е.Б. и др. Геолого-геофизическое изучение северной части Нижнеканского массива с целью поисков блоков монокристаллических гранитоидов, перспективных для захоронения отвержденных высокоактивных отходов завода РТ-2. НПО «Радиевый институт». – СПб., 1996. - Фонды КНИИГМСа.
3. Андерсон Е.Б. и др. Результаты комплексных геолого-геофизических и специализированных исследований на участке «Итатский» и прилегающей территории (Нижнеканский массив). НПО «Радиевый институт». СПб., 1999. Фонды КНИИГМСа.
4. Артемьев Ю.М. Абсолютный возраст некоторых пород южной части Таракского массива Енисейского кряжа // Геохимия, № 2, 1963 с. 174-179.
5. Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Черных А.И., Ковач В.П., Бережная Н.Г., Яковлева С.З. Новые U-Pb данные возраста формирования палеоостроводужного комплекса Предивинского террейна Енисейского кряжа // Геология и геофизика, Т. 40, № 2, 1999, с. 255-259.
6. Гупало Т.А. Разработка обобщенного плана проведения научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ по созданию объекта подземной изоляции РАО в Нижнеканском массиве / Т.А. Гупало, В.П. Бейгул, В.Л. Миловидов и др. // Проект МНТЦ №2377Р,
7. Гупало Т.А., Соколовский Л.Г., Поляков В.А. и др. Гидрогеология Нижнеканского гранитоидного массива //Разведка и охрана недр, 2004. № 5. С. 26–30.
8. Даценко В.М. Нижнеканский массив - эталон Нижнеканского гранитоидного комплекса (Енисейский Кряж). Новосибирск: СНИИГМС, 1995, 123 с.
9. Докембрийские кристаллические комплексы Енисейского кряжа (Путеводитель Енисейской экскурсии VII Всесоюзного петрографического совещания) // Новосибирск, 1986, с. 60-62.
10. О.Г. Епифанцев, Н.С. Плетенчук Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения. Новокузнецк: СибГИУ., 2008
11. Заблоцкий К.А., Ножкин А.Д., Сопрончук В.Р. Раннедокембрийские стратифицированные образования юкеевского комплекса // Проблемы стратиграфии раннего докембрия Средней Сибири. М., «Наука», 1987, с. 5- 14.

12. Г. С. Карабаева., Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 16. Ангаро-Енисейский район. Вып.1. Енисей. Л. - Гидрометеиздат, 1973, 722 с.
13. Корнев Т.Я., Качевский Л.К., Ножкин А.Д., Даценко В.М., Стороженко А.А., Заблоцкий К.А., Романов А.П. Региональная схема корреляции магматических и метаморфических комплексов Алтае-Саянской складчатой области, 1999, с. 17-46.
14. Линд Э.Н. Изучение структурно-тектонического строения «Енисейского» участка Нижнеканского гранитоидного массива. Отчет ГПКК «КНИИГиМС», Красноярск, 2002.
15. Мироненко В. А., Румынин В. Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1: Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М.: МГУ, 1998а.611 с.
16. Никулов Л.П., и др. Геологическое доизучение масштаба 1:200 000 на Атамановской площади. Листы О-46-XXXIV, О-46-XXVIII (окончательный отчет). - ФГУГП «Красноярскгеолсъемка». Красноярск, 2003, 290 с. ФГУ «ТФИ по Красноярскому краю», № 28623.
17. Ножкин А.Д., Малышев В.И. и др. Геохронологические исследования метаморфических комплексов юго-западной части Сибирской платформы// Геология и геофизика, 1989, № 1, с. 25-33.
18. Ножкин А.Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирского кратона // Региональная геология, Т. 314, № 1, 2009, с. 6-15.
19. Озерский А.Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях массива кристаллических пород для подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 52-59.
20. А.Ю. Озёрский, К.А. Заблоцкий и др. – Отчет по теме: Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»). АО «Красноярскгеология»; Красноярск, 2010.
21. А.Ю. Озёрский, «Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив)». Проектная документация. Инженерные изыскания. Раздел 4 Бурение пилотных скважин под строительство шахтных стволов на площадке Часть 1. Инженерно-геологические изыскания под шахтный ствол (Скважина Р-13). Том 4.2.1. ОАО «ГСПИ» – «КПИИ «ВНИПИЭТ», ОАО «Красноярская горно-геологическая компания», 2013.

22. А.Ю. Озёрский, Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (Участок «Енисейский»), Красноярск, «Красноярскгеология», 2011.

23. А.Ю. Озёрский, Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижнеканский массив). Проектная документация. Инженерные изыскания. Раздел 4 Бурение пилотных скважин под строительство шахтных стволов на площадке Часть 1. Инженерно-геологические изыскания под шахтный ствол (Скважина Р-13). Том 4.2.1. Красноярск, ОАО «ГСПИ» – «КПИИ «ВНИПИЭТ», ОАО «Красноярская горно-геологическая компания», 2013.

24. А.Ю. Озёрский, ОАО,. 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). Красноярск, «Красноярскгеология», 2015.

25. Петрова Н.Н. Гидрогеологическое и инженерно-геологическое изучение с геоэкологическим картированием Атамановской площади, пос. Минино, ГПП «Красноярскгидрогеология», 2001

26. Румынин В.Г., 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) и подготовки отчетных материалов для экспертизы в ГКЗ Роснедра (гидрогеологическое моделирование). СПб, СПбО ИГЭРАН. 2013 г.

27. Румынин В.Г., Подготовка проектной документации по строительству объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Проектная документация. Раздел 12. Подраздел 2. Книга. Объемное гидрогеологическое моделирование. Санкт-Петербург, СПбО ИГЭ РАН, 2014.

28. М. С. Сабодина, Закономерности поведения радионуклидов при создании техногенно-геохимического барьера на основе глин, МГУ, Москва, 2008.

29. Тарасов, Н. Н.. Сбор и анализ исходных данных о геологическом строении участка Енисейский (Исследование в рамках разработки основных положений по обоснованию долговременной безопасности ПГЗРО, создаваемого на участке Енисейский в Нижнеканском кристаллическом массиве). ОАО «Красноярская горно-геологическая компания», 2014.

30. Татаринов В.Н., Кафтан В.И., Морозов В.Н., Селеев И.Н.. Цикличность современных движений земной коры в южной части Енисейского кряжа // Тез. докл. IV «Тектонофизической конференции. Москва», изд-во ИФЗ РАН, 2016.
31. Crawford J., Bedrock transport properties Forsmark Site descriptive modeling // SDM-Site Forsmark, 2008. SKB Rapport R-08-48.
32. Elert M., Retention mechanisms and the flow wetted surface – implications for safety analysis // Technical report 97-01 (SKB report). SE9700169. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 1997, 48 p.
33. Engineering, G., Rock Mechanics on a Geological Base // Developments in Geotechnical Engineering, 1995, 77 p.
34. Larsson M., Heterogeneity-Induced Channelling, Flow-Wetted Surface, and Modelling of Transport in Fractured Rock. Acta Universitatis Upsaliensis // Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, 2012, 76 p.
35. Pusch, R. Geological Storage of Highly Radioactive Waste // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
36. <http://doi.org> – Developments in Geotechnical Engineering