

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

На правах рукописи

Казаков Константин Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ
СВОЙСТВ МАССИВА СКАЛЬНЫХ ПОРОД, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ
ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Специальность 2.8.3

Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук
Гупало Владимир Сергеевич

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. Анализ состояния проблемы, постановка задач исследования.....	9
1.1 Классификация систем трещин в массивах скальных горных пород	9
1.2 Современные методы изучения трещиноватости массивов скальных пород.....	16
1.2.1 Изучение трещиноватости на породных обнажениях, в т.ч. в горных выработках	16
1.2.2 Изучение трещиноватости при бурении скважин	18
1.2.3 Изучение трещиноватости геофизическими методами.....	19
1.3 Взаимосвязь показателей трещинной сети массива скальных пород с его водопроницаемыми свойствами.	26
1.3.1 Прямые методы оценки водопроницаемых свойств трещиноватых массивов скальных горных пород.....	27
1.3.2 Расчётные методы оценки водопроницаемых свойств трещиноватых массивов скальных горных пород.....	30
Выводы и постановка задачи исследования	32
Глава 2. Разработка каротажного программно-аппаратного комплекса для количественной характеристики параметров сети трещин	34
2.1 Компоновка скважинного каротажного комплекса.....	34
2.2 Элементы управления скважинным зондом.....	40
2.3 Программное обеспечение для обработки данных, получаемых в ходе видеообследований скважины.....	42
2.4 Испытания разработанного каротажного программно-аппаратного комплекса	50
Выводы.....	55
Глава 3. Проведение исследований параметров сети трещин на участке планируемого создания ПГЗРО.....	56
3.1 Общие сведения об участке проведения исследований	56
3.2 Геологическая характеристика участка проведения исследований.....	57
3.3 Гидрогеологические условия участка проведения работ.....	59
3.4 Проведение работ по обследованию стволов разведочных скважин	61
3.5 Определение показателей трещинного пространства массива.....	63
Выводы.....	74
Глава 4. Обоснование комплекса скважинных методов для выделения и оценки зон возможной водопроницаемости.....	75
4.1 Описание исследовательской скважины	76
4.2 Выбор потенциально водопроницаемых интервалов по данным ГИС.....	78
4.3 Выполнение опытно-фильтрационных работ с применением поинтервальных нагнетаний и наливов.....	81
4.4 Определение состава методов ГИС, направленных на выделение потенциально водопроницаемых участков.....	84

4.5	Определение диапазонов количественных значений геофизических параметров, характерных для трещиноватых водопроницаемых интервалов в скальном массиве	87
4.5.1	Проведение исследований с применением методики АК.....	88
4.5.2	Интерпретация результатов АК на водопроницаемых трещиноватых интервалах в стволе скважины Р-8.....	91
4.5.3	Лабораторные оптико-акустические исследования монолитных образцов горных пород скважины Р-8.....	94
	Выводы.....	100
	Глава 5. Оценка анизотропии водопроницаемых свойств трещиноватых участков массива...	101
5.1	Алгоритм оценки анизотропии фильтрационных свойств водопроницаемых интервалов.....	103
5.2	Оценка неоднородности водопроницаемых свойств трещиноватых участков в зависимости от возможных направлений движения подземных вод.....	109
	Выводы.....	111
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	116
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Методика определения анизотропии фильтрационных свойств водопроницаемых интервалов скальных пород скважинными методами.....	126
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б Практическое внедрение результатов диссертационного исследования .	145

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы безопасного захоронения радиоактивных отходов (РАО) являются одной из тех проблем, которая будет определять масштабы и динамику развития атомной отрасли в целом. На сегодняшний день мировым научным сообществом признано, что наиболее безопасным решением проблемы окончательной изоляции долгоживущих и высокоактивных РАО является их размещение в пунктах глубинного захоронения (ПГЗРО), сооружаемых на глубинах не менее 300-500 м [1]. Захоронение предполагается осуществлять в различных типах горных пород - глины, соляные пласты, скальные породы [2].

В Российской Федерации, начиная с 80-х годов XX века, осуществлялся поиск пригодных геологических формаций для создания ПГЗРО. По итогам выполненных работ наиболее перспективным признан массив скальных пород на участке Енисейский (Красноярский край). Целевой интервал глубин определен 400-500 метрами от земной поверхности и представлен большей своей частью архейскими гнейсами [3]. В целях регламентированного и согласованного выполнения работ по созданию ПГЗРО разработана и утверждена Генеральным директором Госкорпорации «Росатом» А.Е. Лихачевым «Стратегия создания пункта глубинного захоронения РАО» [116]. Стратегия базируется на обязательствах Российской Федерации по исполнению «Объединенной конвенции по безопасности обращения с ОЯТ и РАО» и международных подходах к созданию подобных объектов. В соответствии с Стратегией проект ПГЗРО должен быть реализован в рамках 6 (шести) фаз. Перечень направлений исследований, разработанный в соответствии с требованиями Российских нормативных документов и рекомендаций МАГАТЭ, является основой «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров» (Комплексная программа) [140]. По итогам реализации мероприятий из состава Комплексной программы должен быть сформирован исчерпывающий объем исходных данных для обоснования долговременной безопасности захоронения РАО в выбранном массиве, позволяющий принять решение о строительстве первой очереди ПГЗРО.

При этом критически важным аспектом в обосновании долговременной безопасности захоронения РАО является прогнозирование распространения радионуклидов в геологической среде. Наиболее вероятным механизмом возможного выхода радионуклидов из ПГЗРО является их перенос подземными водами по системам трещин массива скальных пород. Соответственно, гидрогеологическое моделирование является главным звеном при выполнении оценок долговременной безопасности захоронения РАО, а достоверность исходных данных формирует доверие к получаемым результатам. Неравномерность

распределения трещинных систем в таких породах в совокупности с различием их пространственных и геометрических характеристик формируют неоднородность водопроводящих свойств на различных участках массива [4]. Вышеперечисленные аргументы задают приоритет поиска решений по получению реалистичных характеристик водопроводящих свойств горных пород на участках планируемого размещения ПГЗРО [5-11].

Наиболее современные методы и оборудование для изучения неоднородностей геологических сред отработаны для отрасли добычи углеводородов. Прямое их заимствование невозможно, поскольку они предназначены для работы в иных типах горных пород и их применение в условиях слабопроницаемых скальных пород, характерных для участка Енисейский, неинформативно. Это определяет существующий на сегодняшний день дефицит исходных данных для прогнозных модельных расчётов и обосновывает необходимость развития методов и оборудования, обеспечивающих получение показателей неоднородности структуры и водопроводящих свойств (в т.ч. их неоднородности) слабопроницаемых массивов скальных пород.

Цель, идея и задачи исследования

Целью работы является выделение с использованием скважинных методов водопроводящих интервалов массива горных пород, предназначенного для сооружения ПГЗРО, и оценка анизотропии их фильтрационных свойств.

Идея работы состоит в обосновании перечня параметров сети трещин, определяющих изменчивость водопроводящих свойств массива скальных пород, и разработке оборудования для их измерения, а также в установлении необходимого комплекса скважинных методов оценки зон возможной водопроницаемости для прогноза долговременной безопасности глубинного захоронения РАО.

Указанная цель предполагает решение следующих задач:

- 1) определить перечень количественных параметров трещинной сети, оказывающих наибольшее влияние на водопроницаемые свойства массива скальных пород;
- 2) разработать оборудование, позволяющее получать количественные характеристики систем трещин, значимые для оценки водопроницаемых свойств массива скальных пород;
- 3) провести полевые исследования характеристик систем трещин в массиве скальных пород на потенциально пригодном для подземного захоронения РАО участке (участок Енисейский);

4) установить комплекс скважинных методов оценки зон возможной водопроницаемости на основе результатов исследований, выполненных прямыми и косвенными методами;

5) оценить возможность применения расчетного метода оценки анизотропии фильтрационных свойств трещиноватых горных пород с использованием данных, полученных по результатам применения комплекса скважинных методов оценки зон возможной водопроницаемости;

6) сформировать комплексный метод выделения зон возможной водопроницаемости скальных пород и оценки анизотропии их фильтрационных свойств с использованием количественных характеристик систем трещин.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод определения водопроницающих интервалов массива скальных горных пород, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов, по результатам акустического, гамма-гамма плотностного каротажа и видеокаротажных обследований.

2. Установлено, что критерием для надежного выявления потенциально водопроницающих интервалов является: средние значения снижения скоростей прохождения (V) и амплитуд (A) P-волн на 9% и 20%, S-волн на 20% и 41%; увеличения значений коэффициентов эффективного затухания (α) на 20% и 42% для P- и S- волн соответственно; снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs) в среднем, на 6%.

3. Разработан алгоритм оценки анизотропии фильтрационных свойств водопроницающих интервалов с использованием тензора трещинной проницаемости, определяемого по количественным параметрам сети трещин, устанавливаемым с помощью разработанного видеокаротажного оборудования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- использованием апробированных методик полевых и лабораторных исследований параметров трещиноватости и водопроницающих свойств скальных массивов;
- применением фактических данных о количественных параметрах трещинной сети, полученных в ходе каротажных и опытно-фильтрационных работ на участке Енисейский, для расчетов водопроницающих свойств скальных массивов;
- удовлетворительной сходимостью результатов оценок водопроницаемости трещиноватых горных пород, полученных с применением полевых и расчетных методов.

Методы исследований

Методы исследований включают: анализ и обобщение научно-технической информации; лабораторные исследования образцов горных пород с использованием

установки для лазерно-ультразвуковых исследований; натурные измерения параметров трещинной сети с использованием специально разработанного каротажного оборудования; интерпретацию и статистическую обработку полученных данных, включая их сопоставление с результатами скважинных геофизических исследований; выполнение модельных оценок параметров потенциальной водопроводимости трещиноватых участков горных и их верификацию с использованием результатов скважинных гидродинамических исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. формировании критериев отнесения трещиноватых зон в массиве скальных горных пород участка Енисейский к водопроницающим, основанных на величинах раскрытия, плотности и пространственного положения трещин, гамма-активности пород, степени ослабления интенсивности искусственного гамма-излучения и параметрах распространения упругих волн в массиве;

2. определении недостаточной эффективности подхода использования оценок трещиноватости по результатам анализа неориентированного кернового материала, отобранного при стандартной технологии колонкового бурения, в виду завышения количественных параметров плотности трещинной сети по сравнению с результатами видеокаротажных исследований;

3. обосновании необходимого перечня методов каротажных исследований, позволяющих выделять потенциально водопроницающие трещиноватые зоны в незакрепленных стволах скважин для последующего проведения опытно-фильтрационных работ с применением поинтервальной изоляции исследуемого интервала;

4. предложении использовать расчётный метод определения тензора трещинной проницаемости для оценки анизотропии фильтрационных свойств водопроницающих интервалов с использованием данных, полученных по результатам проведения комплекса скважинных исследований на потенциально пригодном для захоронения радиоактивных отходов участке.

Практическая значимость и предложения по внедрению результатов работы

– разработан каротажный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для работы в водонаполненных разведочных скважинах и позволяющий определять количественные параметры раскрытия трещин, включая их пространственное положение и координатную привязку;

– разработана «Методика определения анизотропии фильтрационных свойств водопроницающих интервалов скальных пород скважинными методами», переданная в АО «Красноярскгеология» для практического использования при реализации работ из состава «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности

захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров», утвержденной в 2018 году Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» О.В. Крюковым.

Апробация работы

Основные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийской конференции с Международным участием, посвященной 90-летию ИГЕМ РАН «Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований» (Москва, 05-09 апреля 2021), VI международной конференции «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» ТПУ (Томск, 20-24 сентября 2021 г.), международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2022, 2023).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 4 - в изданиях, включенных в перечень Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки Российской Федерации, и в статьях, индексируемых наукометрической базой Scopus.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературных источников из 154 наименований. Работа изложена на 145 страницах текста, содержит 69 рисунков и 23 таблицы.

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, д.т.н. В.С. Гупало за постановку темы исследования, научное руководство и непосредственное участие в подготовке и проведении полевых исследований. За ценные рекомендации, конструктивные замечания в процессе подготовки диссертационного исследования автором выражается глубокая признательность заведующему кафедрой ФизГео НИТУ МИСИС, д.ф.-м.н В.А. Винникову; профессору кафедры ФизГео, д.т.н. Е.Б. Черепецкой. Особая благодарность за оказанную помощь, поддержку и обеспечение исходными данными для диссертационного исследования адресуется Советнику Дирекции ИБРАЭ РАН, д.т.н. И.И. Линге; заведующему отделением долгосрочных рисков в сфере обеспечения ЯРБ, д.т.н. С.С. Уткину; директору Красноярского филиала ИБРАЭ РАН, к.т.н. Д.А. Озёрскому; а также Коллегам из ИБРАЭ РАН, ИГЕМ РАН, АО «Красноярскгеология» за уделённое для обсуждений, конструктивной критики время и безграничную дружескую помощь, значимость которых бесценна.

Глава 1. Анализ состояния проблемы, постановка задач исследования

1.1 Классификация систем трещин в массивах скальных горных пород

Вопросам изучения и параметризации трещинных систем скальных пород посвящены работы следующих исследователей: Т.Д. Голф-Рахта, О.Г. Епифанцева, С.А. Корчака, Н.С. Красиловой, Н.И. Кригера, В.Е. Ольховатенко, М.М. Протодьяконова, М.В. Раца, Ф.П. Саваренского, И.Г. Сквородникова, С.Н. Чернышёва, Banks D, Barton C.A., Burbey T.J., Riedmüller G, Seeburger D.A., Talbot C.F., Xu J.S., Webster D.S., Zoback M.D, Zimmerman R.W. Под термином «трещина» (fissure или joint – англ.) подразумевается разрыв сплошности горной породы, перемещение по которому либо отсутствует, либо имеет незначительную величину. Принципиальное отличие трещины от прочих нарушений сплошности горных пород (пор, каверн и др.) заключается в форме, для которой характерно резкое преобладание протяжённости стенок трещин во всех направлениях над расстоянием между ее стенками. В преобладающем большинстве случаев массивы горных пород, подвергшиеся воздействиям, превышающим предел прочности горной породы, имеют в своей структуре многочисленное количество трещин, формирующих определенные системы. Система трещин – совокупность трещин, совместно развитых в конкретном объёме горной породы и имеющих близкую пространственную ориентировку [12]. При группировке трещин в системы учитывается их взаимное расположение: параллельные трещины и совокупности трещин, отличающиеся своей пространственной ориентировкой друг от друга не более, чем на 45° . Группировка трещин также подразумевает наличие их системности распространения в массиве: систематические и несистематические. Систематическими трещинами являются те, что расположены с примерно одинаковыми формами и шагом. Несистематические трещины имеют различные формы и неравномерный шаг распространения в массиве. Одновременно в массиве горных пород может быть развито несколько систем трещин, но бывают массивы с одной системой или бессистемной (хаотичной трещиноватостью) [12]. Термином «трещиноватость» характеризуется совокупное количество трещин, совместно развитых в конкретном объёме массива горных пород [13]. Под трещинной сетью массива подразумевается наличие не менее двух групп трещин. Значимым и достаточно распространённым критерием трещиноватости является количество систем трещин, присутствующим в массиве. В зависимости от количества трещин и характеристик трещинной сети в целом, массивы горных пород разделяются на: условно-монолитные массивы с редкими бессистемными трещинами; трещиноватые массивы, в которых присутствует не менее одной системы трещин, но в целом характеризующиеся умеренной степенью трещиноватости; в значительной степени нарушенные сильно трещиноватые массивы [143, 144].

В литературных источниках присутствует множество генетических классификаций трещин, сформированных их авторами в соответствии с решаемыми задачами, что не позволяет сформировать удовлетворительную единую классификацию. Генетическим типом трещин называется множество трещин и или систем трещин, связанных единством их происхождения и последующего развития. Происхождение или генезис трещин определяет сходство различных параметров трещин, таких как: шероховатость и извилистость стенок, характеры окончаний трещин, заполнителя и проч. «Трещины в горных породах образуются в процессах петрогенезиса, тектогенезиса и в результате экзогенных процессов» [14]. Одним из приемлемых вариантов для данной работы является типизация трещин в зависимости от их генезиса в увязке с эмпирически наблюдаемыми признаками (рис. 1.1).

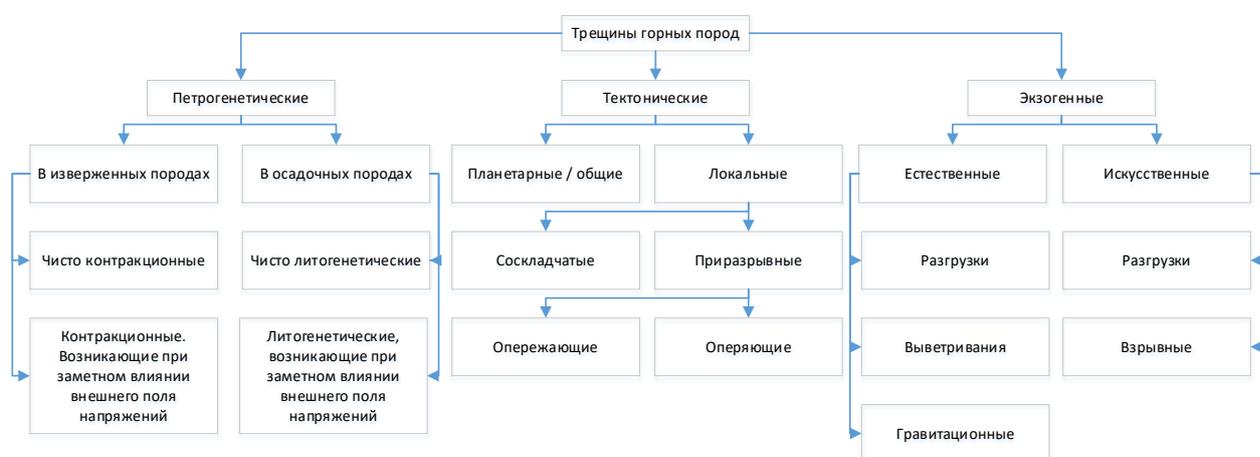


Рисунок 1.1 – Генетические типы трещин в массивах горных пород [15]

В обобщенном варианте трещины в зависимости от их генезиса могут быть разделены на две крупные категории: тектонические и нетектонические. К отличительным особенностям тектонических трещин относятся [16]:

- протяженность, выдержанность в ориентировке;
- наличие преимущественно прямолинейной конфигурации;
- пересечение нескольких слоев одновременно, при этом в различных породах геологического разреза развиваются по единому плану;
- образование систем трещин.

«В отличие от генетических параметров трещин, которые не могут быть оценены количественно, их геометрические параметры могут быть точно измерены, в данной связи уместно привести пример классификации трещин в зависимости от их размеров по абсолютной длине и величине раскрытия/мощности. По итогам анализа литературных

источников определено, что подходы к классификации трещин по данным параметрам также разнятся» [146].

Принимая во внимание представленные в таблице 1.1 и таблице 1.2 данные, можно отметить, что размеры трещин могут варьироваться в достаточно больших диапазонах. По мнению С.Н. Чернышёва [17], в процессе определения параметров водопроницаемости массива скальных пород приоритетным является изучение величины раскрытия трещин. Морфологически трещины классифицируются по следующим признакам:

- по форме в плане – прямолинейные, дугообразные, коленообразные, кольцевые;
- по углу наклона плоскости разрыва: горизонтальные (0^0-10^0), пологие (10^0-45^0), крутопадающие (45^0-80^0), вертикальные (80^0-90^0);
- по характеру поверхности стенок трещин: гладкие, зазубренные, шероховатые;
- по расположению относительно слоистости горных пород: согласные, ориентированные параллельности, секущие слоистость в поперечном и диагональном направлениях;
- по расположению относительно друг друга: эшелонированные, вееро- и кулисообразные, ветвящиеся, концентрические [16].

В зависимости от генезиса трещины различаются по своей форме, расположению в массиве, протяженности и прочим отличительным характеристикам. Тектонические трещины делятся на трещины отрыва и трещины скалывания. Трещины отрыва ориентированы перпендикулярно к действующим нормальным напряжениям в массиве и имеют шероховатую неровную поверхность стенок. Трещины скалывания ориентированы в направлении касательных напряжений и возникают в условиях сжимающих напряжений. В большинстве случаев трещины скалывания являются закрытыми и обладают ровными стенками [16].

Для нетектонических трещин выделяется большее количество типов [18]:

- диагенетические - возникшие в процессе превращения осадка в твердую породу;
- первичные трещины в эффузионных и интрузивных горных породах – образуются в процессе застывания лавы и при остывании интрузивных горных пород;
- трещины выветривания – образовавшиеся в зоне дезинтеграции горных пород;
- трещины разгрузки – образуются при снятии напряжений с горных пород (в большинстве случаев в результате эрозии вышележащих толщ);

Таблица 1.1 – Классификация трещин по их протяженности

Протяженность трещин, см.	Уровни трещин					
	Л. Мюллер [19]	М.В. Рац и С.Н. Чернышёв [15]	В.Н. Жиленков [20]	Н.С. Красилова [21]	С.Н. Чернышёв [17]	Нормативные документы [22]
10 ⁸	нарушения	крупные тектонические разрывы	разломы I и II порядка	мегатрещины-разрывные нарушения	крупные тектонические разрывы	разломы I ранга - глубинные
10 ⁷						разломы II ранга - глубинные
10 ⁶		разрывы	разломы III порядка		разрывы	разломы III ранга
10 ⁵						разломы IV ранга
10 ⁴						крупные трещины V ранга
10 ³	гигантские трещины	макротрещины или трещины	крупные трещины	макротрещины и мезотрещины	гигантские трещины	средние трещины VI ранга
10 ²	крупные трещины		трещины		крупные трещины	
10	мелкие трещины		мелкие трещины			
1	скрытые трещины	микротрещины		микротрещины	микротрещины	мелкие, тонкие, локальные трещины (VII, VIII, IX ранга)
10 ⁻¹						
10 ⁻²		дефекты кристаллической решетки		ультратрещины		
10 ⁻³						
10 ⁻⁴						

Таблица 1.2 – Классификация трещин по величине их раскрытия/мощности

Мощность трещин, см.	Уровни трещин											
	Л.И. Нейштадт [24]	Е.С. Ромм [33]	Ж. Ферран, В. Тенос [37]	В.Н. Жиленков [20]	С.Н. Чернышёв [17]	Нормативные документы [22]						
10 ⁶	очень крупные трещины	макротрещины	макротрещины	крупные трещины	зоны дробления	разломы I ранга сейсмогенные, глубинные						
10 ⁵						разломы II ранга частично сейсмогенные, глубинные						
10 ⁴						разломы III ранга						
10 ³						разломы IV ранга						
10 ²					щели (зияющие или заполненные)	крупные трещины V ранга						
10							средние трещины VI ранга					
1	крупные трещины	тонкие трещины	тонкие трещины	мелкие трещины	узкие	тонкие трещины VIII ранга						
	средние трещины					капилляры	локальные трещины IX ранга					
	мелкие трещины											
10 ⁻¹	тонкие трещины	микротрещины	тонкие трещины	мелкие трещины	узкие	тонкие трещины VIII ранга						
10 ⁻²							микротрещины	тонкие трещины	мелкие трещины	узкие	тонкие трещины VIII ранга	
10 ⁻³												тонкие трещины
10 ⁻⁴			тонкие трещины	тонкие трещины	мелкие трещины	узкие						
10 ⁻⁵							тонкие трещины	тонкие трещины	мелкие трещины	узкие	тонкие трещины VIII ранга	
10 ⁻⁶												тонкие трещины
	субкапилляры											

- оползневые трещины, трещины динамического напора льда;
- особые системы трещин – прочие виды трещин, в т.ч. образовавшиеся благодаря ротационным силам вследствие вращения земли.

По степени заполнения минеральными образованиями трещин различаются на открытые, заполненные и залеченные. Различие между заполненными и залеченными трещинами заключается в плотности минерального образования-заполнителя: рыхлого или твердого. Возможные варианты заполнителей трещин представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Классификация заполнителей трещин [17]

Осаждение заполнителя в трещине	Наименование заполнителя по происхождению материала	Состав и свойства заполнителя трещин
Химическое или физико-химическое	Магматический	Скальная горная порода, прочно залечивающая трещину
	Гидротермальный и пневмалитовый	Скальная горная порода, залечивающая трещину
	Гипергенный	Коллоидные образования, сужающие или залечивающие трещину
	Искусственный	Скальный и полускальный грунт, залечивающий трещину
Механическое	Тектонический	Милонит, тектоническая брекчия. Плотные, водопроницаемые, малопрочные, слабо сжимаемые
	Гипергенный	Обломочная или глинистая порода рыхлого сложения. Водонепроницаемые малопрочные, сжимаемые
	Искусственный	Скальный, полускальный или нескальный грунт, залечивающий трещину
Органогенное	Фитогенный	Корневая сеть растений, остатки растений. Проницаемая среда, способствует выветриванию
	Зоогенный	Остатки организмов и продукты их разложения, вмытые в трещины, ослабляют массив, способствуют выветриванию

При решении инженерных задач залеченные трещины могут представлять повышенный интерес в случае, если заполнителем трещин выступает лёд, т.к. при его таянии резко снижаются прочностные свойства массива. Для оценки водопроницаемости скальных горных пород залеченные трещины интереса практически не представляют в отличие от открытых трещин, параметры которых представляют наибольший интерес.

Закономерность распространения трещин, связанная с генезисом горных пород, позволяет с помощью детального изучения трещиноватости установить историю массива

горных пород. Для составления математических прогнозов распределения трещиноватости в массиве, в зависимости от решаемых с их помощью задач, применяются модели трещинных сетей, для которых характерно упорядоченное или стохастическое распределение трещин. Стохастическое распределение трещин является наиболее распространённым в условиях горных пород по данным натурных исследований [145]. В целом исходя из общей степени изученности массива и параметров трещинной сети на локальных участках возможно спрогнозировать с определенной степенью достоверности параметры трещиноватости в массиве горных пород или его отдельных блоках. Для решения подобных задач прорабатываются подходы, в основе которых заложены методики создания моделей эквивалентной сплошной пористой среды – Equivalent Continuous Porous Media (ECPMs) и дискретной сети трещин массива – Discrete Fracture Network (DFN) [141]. Идея наиболее современного подхода DFN состоит в генерации на основе фактических статистических данных стохастических реализаций сети трещин. Сеть трещин создается в виде пересекающихся плоских геометрических фигур, имеющих схожие с фактическими трещинами характеристики. Достоверность данных прогнозов может быть повышена использованием количественных параметров трещинной сети на дополнительных локальных участках массива [142].

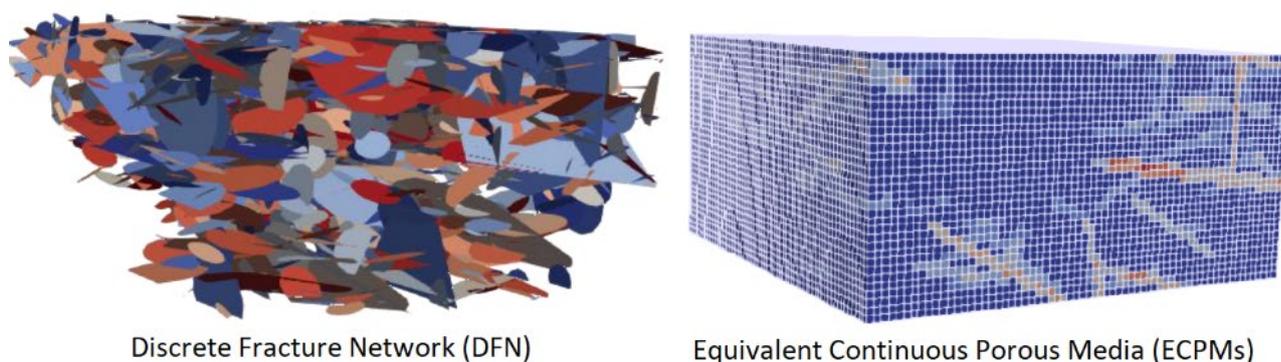


Рисунок 1.2 – Модели дискретной (DFN) и эквивалентной сплошной пористой среды (ECPMs) [141]

Существует несколько подходов к оценкам массива по степени трещиноватости, которая может быть оценена по размеру блоков отдельности, пустотности массива и совершенству расчленения его на отдельные блоки. Степень трещиноватости может быть охарактеризована количественно, для этого применяются следующие параметры:

- количество трещин на единицу длины, площади или объёма горной породы. наиболее распространено (*Удельная трещиноватость*). Наиболее распространённой оценкой является модуль трещиноватости, характеризующий количество трещин на 1 погонный метр массива (M_{mp}) [17, 123];

- расстояние между трещинами в одной системе по перпендикулярному к ним направлению (*Густота трещин*) [92, 23];
- сумма значений густоты по каждой системе трещин (*Густота трещинной сети*) [147];
- отношение площади трещин к единице объема трещиноватого горного массива (*Интенсивность трещиноватости или взвешенная плотность*) [148, 149];

Стоит отметить, что модуль трещиноватости более распространён для характеристики массива при проведении инженерно-геологических изысканий. Оценка трещиноватости по показателю $M_{тр}$, по мнению ряда исследователей [92, 23, 148, 149], рассматривается как весьма грубая и для детальных гидрогеологических расчётов подходит в меньшей степени, в то время, как параметры, характеризующие густотой распределения трещин и плотностью трещинной сети, наиболее полно характеризуют нарушенность массива как единичными трещинами, так и образуемыми ими системами.

1.2 Современные методы изучения трещиноватости массивов скальных пород

«Изучение параметров нарушенного трещинами массива осуществляется различными методами, определяемыми условиями и степенью доступности трещин для исследования. Трещиноватость влияет на прочность и устойчивость горных пород; характер и интенсивность проявления деформаций; влагоемкость и водопроницаемость; на температурный режим массива; его сейсмические характеристики и т.д. Традиционно изучение параметров трещиноватости для уточнения модели строения скального массива осуществляется на основе исследований породных обнажений выработок, керна скважин, а также применения комплекса геофизических методов (ГИС)» [5]. В ходе этапов геологического изучения участков скальных массивов в части выделения зон повышенной трещиноватости выделяются прямая оценка трещиноватости (геологическая) и косвенная (физическая). Геологическая оценка позволяет получить наиболее точные количественные показатели, включает изучение трещиноватости на обнажениях, в горных выработках и анализ данных по разведочным скважинам. Физическая оценка даёт возможность получить относительную характеристику трещиноватости пород в массиве, для чего используется анализ процесса бурения, геофизические методы и т.п.

1.2.1 Изучение трещиноватости на породных обнажениях, в т.ч. в горных выработках

Обследованиям при изучении трещиноватости на обнажениях подлежат горные выработки (горизонтальные и вертикальные), скважины (керна и стенки). Горнопроходческие

работы являются одним из наиболее информативных периодов для накопления данных о строении и свойствах массивов горных пород, происходящих в них процессах и реакции горных пород на техногенное воздействие. Исследование породных обнажений осуществляется на всей протяженности выработок и выполняется на участке временного отставания крепи от забоя [25]. С каждым горнопроходческим циклом и продвижением забоя предоставляется уникальная возможность получить информацию о характеристиках массива на разных глубинных отметках. Геологические обследования породных обнажений выполняются с каждым горнопроходческим циклом при проходке вертикальных, наклонных и горизонтальных выработок [26, 27, 28]. «В ходе исследования выполняется картографирование незакрепленных участков - подробное геологическое описание, описание состава пород, их структурно-тектонических особенностей, степени выветрелости, формы и размера отдельностей пород. Визуально выделяются основные системы трещин с описанием морфологии их поверхности, состава и строения заполнителя (при наличии). В ходе описания, раздельно по каждой из выделенных систем, осуществляются массовые замеры элементов залегания трещин (азимуты падения и простирания, углы падения и простирания, расстояние между трещинами), характеризуются их параметры такие как: видимая длина, раскрытие, форма трещин, характер поверхности трещин и наличие зеркал скольжения» [5].

Изучение трещиноватости на обнажениях и в горных выработках включает в себя следующие этапы:

- общее ознакомление с участком массива и разработка программы работ по изучению трещиноватости;
- привязка выявленных трещин к структурно-тектоническому плану района;
- фотодокументация и дешифрирование снимков или зарисовка трещиноватого участка;
- измерение элементов залегания трещин, исследование и описание их количественных и качественных характеристик;
- полевая обработка и оценка полученных результатов, детальное описание отдельных участков.

«В результате обработки информации о трещиноватости, полученной геологическими методами формируются: розы-диаграммы, лучевые круговые диаграммы, круговые диаграммы (точечные и в изолиниях) трещиноватости, карты трещиноватости. Первичной формой систематизации полевых данных являются таблицы трещиноватости, на основании которых составляется сводные ведомости замеров и трещины систематизируются по простиранию и падению. Частота расположения точек наблюдения трещин на обнажениях

определяется в зависимости от масштаба съемки и сложности геолого-тектонических условий района. Вместе с тем такой объем исследований не позволит охарактеризовать распределение трещиноватости по глубине массива. Это определяет необходимость дополнения данных измерений комплексом скважинных методов исследований, применяемых также и при определении параметров нарушенной приконтурной зоны выработок» [5].

1.2.2 Изучение трещиноватости при бурении скважин

Для изучения распределения трещиноватости пород в массиве широко применяется метод оценки по керну и/или по состоянию скважины. Для определения элементов залегания трещин керн ориентируют относительно сторон света. Если керн не ориентирован, то получается определить только угол наклона трещин. Для изучения состояния стенок скважины и фиксации трещин применяется специализированное теле- и фотооборудование, предназначенное для работы на больших глубинах в т.ч. в заполненных жидкостью скважинах [29]. Сохранность керна, его состояние и выход зависит от трещиноватости пород. Наиболее распространёнными показателями качества извлеченного кернового материала являются общий выход керна (англ. total core recovery – TCR, %) и извлечение сплошного или цельного керна (solid core recovery – SCR, %). TCR рассчитывается как отношение всей длины керна (с учётом обломков и неразрушенного керна), извлеченного за один буровой рейс, к длине рейса. SCR – это отношение общей длины неразрушенного керна (в виде цилиндров), извлеченного за один буровой рейс, к длине рейса [30]. Для получения достоверных данных о трещиноватости массива результаты оценки кернового материала сопоставляют с результатами исследования трещиноватости в горных выработках [31]. В качестве дополнительных методов характеристики трещиноватости горных пород используются показатели, получаемые в процессе бурения: поглощение промывочной жидкости, скорость бурения. Поглощение промывочной жидкости зависит от количества открытых трещин в массиве. По цвету бурового раствора и выносимого на поверхность шлама, размеру частиц возможно судить о вскрытии стволом скважины участка трещиноватых горных пород. В связи с тем, что скорость бурения напрямую зависит от пустотности пород, признаком участка повышенной трещиноватости служат прихваты, провалы бурового инструмента. В некоторых случаях фиксируются акустические сигналы, генерируемые буровым инструментом при разрушении породы – при встрече буровой коронки с трещиной нарушается стационарный режим разрушения породы на забое и возникают низкочастотные колебания в дополнение к нормальным колебаниям бурового инструмента. Более раскрытые трещины дают всплески амплитуды колебаний на фоне случайных колебаний, формируемых малой сетью трещин [31].

«Для определения параметров трещинной сети, в частности ориентировки систем трещин в пространстве, интенсивности трещиноватости и раскрытия трещин применяется метод обследования ориентированного керна разведочных скважин, а также микроскопическое исследование шлифов. Первый метод предусматривает определение ориентировки трещин и выделения их систем при последовательном осмотре кернового материала. Для применения данного метода необходим полный выход керна, а также его ориентированность относительно сторон света» [32]. «Метод шлифов может быть применен для оценки трещинной пористости и проницаемости определенного горизонта в разрезе скважины до гидродинамического исследования данного интервала, на основании его также можно выделить интервалы разреза с повышенной проницаемостью. Для получения приближенной количественной оценки трещинной проницаемости предлагается исследовать шлифы из образцов, отобранных через каждые 3-5 метров» [33]. Следует отметить, что метод шлифов достаточно трудозатратен, если ставится задача оценить массив по всей глубине разреза, а оценка пространственного положения трещин по керну, если он не был ориентирован относительно сторон света исключена.

1.2.3 Изучение трещиноватости геофизическими методами

Наземные геофизические исследования

Первичное представление о наличии в массивах скальных горных пород разрывных нарушений различных порядков (таблица 1.1) можно получить по результатам наземных геофизических исследований. «В зоне нарушений часто изменяются и магнитные свойства горных пород в связи с процессами ожелезнения, гидротермальной деятельности и др. Таким образом, существуют предпосылки применения основных геофизических методов: гравиметрии, магниторазведки, сейсморазведки, электроразведки. Данные методы позволяют оценивать трещиноватость и трещинную анизотропию массива, определять характер заполнителя трещин и производить картирование трещиноватых зон» [34].

Гравиразведка и магниторазведка. При гравиразведке положение разрывных нарушений фиксируется благодаря смещению аномалеобразующих масс, либо по воздействию зоны нарушения на поле силы тяжести. Смещение в плане осей гравитационных аномалий может свидетельствовать о наличии надвиговых и сдвиговых нарушений. Зоны дробления проявляются в виде вытянутых линейных аномалий гравитационного поля. При магнитометрических исследованиях косвенным свидетельством наличия нарушений в массиве является скачкообразное изменение глубины залегания верхней и нижней кромок магнитовозмущающих стратиграфических толщ. Сдвиговые нарушения отражаются в виде резких изменений простирания аномальных зон, смены ориентировок осей магнитных

аномалий. Над зонами дробления наблюдаются цепочки линейно вытянутых положительных и отрицательных аномалий [34].

Сейсморазведка. Метод обнаружения и трассирования зон тектонических нарушений основан на различии сейсмических свойств трещиноватых горных пород, относящихся к зонам тектонических нарушений, и горных пород, находящихся за их пределами [35]. «Применение сейсморазведочного метода эффективно для обнаружения малоамплитудных крутопадающих нарушений. Это связано с тем, что такую зону тектонических нарушений можно в первом приближении моделировать тонким крутопадающим пластом пониженной скорости и повышенного поглощения упругих волн» [36]. Для выявления и картирования крутопадающих разрывных нарушений применяется метод преломленных волн (МПВ), а также метод отраженных волн (МОГТ). Исследования с применением данных методов выполняются по параллельным профилям, направленным перпендикулярно к линии простирания разрывного нарушения [37].

Электроразведка. Основным геофизическим методом, позволяющим фиксировать положение разрывного нарушения по смещению пластов и по аномалиям физических свойств в зоне нарушения является электропрофилирование (ЭП) [38]. Также для изучения разрывных нарушений широко применяется метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). При исследованиях методом ВЭЗ измерительные установки располагают по простиранию разрывного нарушения. Интерпретации результатов ВЭЗ используют кривые, полученные в удаленные от изучаемой зоны точках, т.к. кривые ВЭЗ, получаемые в непосредственной близости от нарушений, в большинстве случаев имеют сильные искажения. [39].

По результатам применения вышеперечисленных методов формируется интегральная оценка трещиноватости по участкам массива и выделяются зоны расположения трещиноватых пород. Наземными геофизическими исследованиями крайне трудно отследить и количественно охарактеризовать мелкие системы трещин – менее 10 см (см. таблицы 1.1. - 1.2.). Также результаты наземных геофизических исследований требуют заверки комплексом буровых работ [40].

Геофизические исследования скважин (ГИС)

Данные исследования проводятся для получения наиболее полной информации о разрезе скважины в практике геологических исследований. Методы ГИС классифицируются по виду изучаемых физических полей, соответственно это: радиоизотопные методы (гамма- и нейтронный каротажи, в т.ч. плотностной гамма – каротаж), механические (кавернометрия, термометрия); электрические (каротаж сопротивлений, метод поляризации), ультразвуковые (акустический каротаж, сейсмоакустические обследования), видеокаротажные методы

(акустический каротаж телеметрический, скважинное видеообследование). «Существует более пятидесяти видов ГИС и их модификаций. При проведении исследования в большинстве случаев применяется комплексирование методов» [41].

Основным методом ГИС является гамма-каротаж, который в соответствии с Технической инструкцией по проведению ГИС [42] проводится во всех скважинах в обязательном порядке. Применение других видов каротажа обуславливается типом и физическими свойствами разведываемого массива горных пород, решаемыми геолого-геофизическими задачами, назначением скважины, а также геологическими особенностями исследуемого объекта [43]. Для расчленения литологического разреза применяются стандартный электрический каротаж, гамма-каротаж, кавернометрия. Наиболее распространённым методом для решения задачи расчленения геологического разреза скважин выступает плотностной гамма-каротаж [44]. Одна из наиболее эффективных комбинаций ГИС методов для проведения гидрогеологических и инженерно-геологических изысканий является комбинация радиоизотопных, электрических, механических и акустических методик – см. таблицу 1.4. Результаты ГИС используются для решения следующих задач:

- литологическое строение разрезов скважин;
- выделение водоносных горизонтов, определение их мощности и строения;
- оценка трещиноватости, пустотности горных пород;
- выявление трещиноватых интервалов ствола скважины, в т.ч. интервалов тектонических нарушений, вскрытых стволом скважины;
- определение физико-механических и фильтрационных свойств горных пород.

Таблица 1.4 – Аппаратура для исследований разреза методами ГИС [43]

Метод ГИС	Аппаратура (пример)	Измеряемые параметры
Гамма-каротаж	ГКМ-43/48, ГТР-43	МЭД, мкР/ч
Каротаж КС, ПС	КСП-43, КСП-ГК-43	Ом·м, ΔU, мВ
Кавернометрия (ДС)	КМ-43-1	Диаметр скважины, мм
Акустический каротаж (АК)	ПАРУС-48	Δt, мкс/м
Инклинометрия скважин	СИМ-42	Зенитный угол, град. Азимут, град.

«Поиски оптимального метода ГИС для выделения трещиноватости, а также оценки пространственной плотности трещиноватости предпринимались со второй половины XX, но однозначного решения этой проблемы не получено до сих пор. В основном это обусловлено сложностями выделения трещин. Так, например, оказалось, что задача описания системы трещин в стволе скважин весьма сложна и это нельзя сделать однозначно верно. В силу этих причин решение проблемы, как это обычно принято в геофизике, стали искать в

комплексировании методов каротажа» [45]. Далее приведен сравнительный анализ эффективности применения ГИС методов для изучения трещиноватости массива.

Плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П). Физической основой применения плотностного метода для определения трещиноватости служит очевидная связь между пористостью/пустотностью горных пород и их объемной плотностью [46, 47]. Измеряемой величиной при проведении обследования является скорость счета (интегральная или в энергетических окнах), а основными расчетными величинами являются: объемная плотность пород (г/см^3); поправка за влияние промежуточной среды между прибором и породой (г/см^3); индекс фотоэлектрического поглощения (Pe). Чем выше трещиноватость, тем ниже объемная плотность, что проявляется в увеличении скорости счёта. Основные ограничения в применении ГГК-П связаны с тем, что зонд не ориентирован и не вращается. В силу этих ограничений, может оказаться, что трещиноватость будет установлена только с одной стороны ствола скважины. К преимуществам ГГК-П можно отнести возможность количественного определения величины общей пустотности, как совокупности трещин на выделенном участке [48].

Гамма-каротаж (ГК). Метод базируется на измерении естественной радиоактивности - гамма-активности естественных радиоактивных элементов, содержащихся в горной породе. По степени радиоактивности, можно судить об относительной степени трещиноватости в сравнении с участками практического отсутствия радиоактивности или его минимальных естественных показателей. «Считается, что эффективный радиус действия установки гамма-каротажа (радиус сферы, из которой исходит 90 % излучений, воспринимаемых индикатором) соответствует приблизительно 30 см; излучение от более удаленных участков породы поглощается окружающей средой, не достигнув индикатора на каротажном зонде» [41]. Уровень естественной радиоактивности горных пород связан с количеством сорбированных на скелете горной породы радиоактивных минералов, в том числе попавших туда из-за прохождения воды по трещинам, либо осаждении на стенках трещин остатков буровых глинистых растворов [48, 49]. Глина выступает в роли сорбента естественных радиоактивных элементов и повышение естественной радиоактивности по данным каротажа может служить достоверным признаком наличия повышенной трещиноватости. При этом участие данных трещин в водообменных процессах представляется сомнительным из-за возможного кольматажа трещин.

Нейтронный метод. «Нейтронный каротаж позволяет выполнять оценку общей пустотности горных пород наряду с ГГК-П. Для него характерны те же недостатки и ограничения, что и для ГГК-П. Однако, в отличие от последнего, нейтронные методы (за счёт

фиксации повышенного содержания водорода в породе) позволяют более уверенно фиксировать открытые трещины» [45].

Кавернометрия. «Кавернометрия, как метод, основывается на том, что в силу более высокого давления бурового раствора в зонах повышенной трещиноватости происходит ускоренное формирование глинистой корки, за счёт «задавливания» бурового раствора в горную породу. В этом случае по результатам кавернометрии фиксируется уменьшение диаметра скважины. Данная методика работает только при бурении на глинистых растворах либо на растворах со специальными добавками» [45].

Термометрия. Метод основан на измерении разницы температур бурового раствора и горных пород. «При циркуляции раствора в скважине температура будет понижаться на участках проницаемой (трещиноватой) части разреза, что фиксируется чувствительными скважинными термометрами» [46, 47].

Метод самопроизвольной поляризации (ПС). Метод основан на измерении естественных потенциалов, возникающих у пластов с разной электрохимической активностью или на границе между породой и буровым раствором [34]. «Измеряемым параметром является разность потенциалов между неподвижным электродом на поверхности, и электродом-зондом в стволе скважины. Значение ПС отклоняется от уровня фона (линии глин), если в скважине встречаются проницаемые породы. Явление возникает при наличии обводненных пористых и трещиноватых пород в массиве. Определение природы аномалий – пористость или трещиноватость – возможно исходя из анализа геологических характеристик разреза» [48]. «Отрицательные аномалии ПС появляются с повышением степени фильтруемости промывочной жидкости в скважине при бурении, соответственно, для участка трещиноватыми породами будет характерен отрицательный характер аномалии. Из-за того, что отрицательные аномалии ПС могут проявляться в т.ч. за счёт окислительно-восстановительных процессов, протекающих в породах пирита и др., результаты выделения трещин могут иметь высокую погрешность, либо быть недостоверны» [49].

Каротаж сопротивлений (КС). «Метод основан на расчленении литологического разреза по кажущемуся удельному электрическому сопротивлению горных пород. Этот метод является аналогом наземного электрического профилирования (ЭП), но в при каротажных обследованиях измерительные устройства перемещаются вдоль ствола скважины» [39]. Измерения выполняются в необсаженных скважинах, заполненных водой, благодаря которой осуществляется электрический контакт электродов каротажного зонда с горной породой. По итогам анализа каротажных диаграмм КС, формируется вывод о наличии в массиве

неоднородностей, обусловленных контактами различных типов горных пород, а также разрывных нарушений [39].

Скважинный видео- и акустические обследования.

В практике ГИС широкое применение получили методы видео- и акустического каротажа. Системы акустического и оптического видеокаротажа позволяют производить запись развернутого 3D изображения стенки скважины по всей окружности и решать связанную с анализом керна проблему восстановления его ориентации. «Косвенная оценка параметров раскрытия трещин массива осуществляется акустическими методами, используя изменения скоростей распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, коэффициентов затухания, а также частотные и фазовые спектры упругих импульсов» [5]. «Прямая оценка количественных параметров трещин осуществляется с помощью видеокаротажных методов [50], а предположения о возможном участии выявленных трещин в подземных гидродинамических процессах могут быть сформированы по итогам ГИС с помощью скважинных видео исследований формируется развёртка ствола скважины, где участкам с трещинами и другим структурным нарушениям массива соответствуют участки изменения интенсивности волновой картины» [51, 52]. Метод характеризуется весьма высокой разрешающей способностью. Данный комплекс исследований позволяет в ряде случаев отказаться от непрерывного отбора керна [53]. Считается, что комбинация данных методов является единственным методом изучения трещиноватости в открытом стволе, а видеокаротажные обследования – аналог прямого определения параметров трещиноватости на породных обнажениях в горных выработках.

Российские системы скважинного видеокаротажа (ВК-2301 - скважинная камера для видеообследований, аппаратура видеокаротажа «Взгляд», прибор визуального контроля состояния скважин «КП-410ВК», скважинная камера для видеокаротажа СК-50 и др.) разрабатывались для решения задач визуального контроля технического состояния эксплуатационных колонн, фильтров и области забоя скважин. В силу специфики решаемых задач видеозондам не требовалась ни координатная привязка, ни ориентация по оси скважины. Было достаточно только визуальной оценки. Различия систем видеокаротажа заключаются только в разрешающей способности камеры, длине кабеля, компоновочных решениях – блок сбора внизу/на поверхности, кабель – одножильный, трехжильный и пр. [54]. Однако для получения количественных параметров трещинной сети и определения пространственной ориентации трещин в пространстве такого функционала недостаточно. Наиболее близкими зарубежными аналогами, имеющим функцию ориентации и координатной привязки, являются видеокаротажные системы в т.ч. ROBERTSON GEOLOGGING (British designer, manufacturer

and contract service operator of slimhole digital logging systems), OBI/ABI (MountSopris). Данные системы включены в перечень санкционного оборудования и имеют ограничения на распространение в РФ.

Акустический каротаж (АК) основан на изучении характеристик упругих волн ультразвукового и звукового диапазона в горных породах. Акустический каротаж сводится к определению скорости распространения упругих колебаний в пересеченных скважиной породах в интервале базы исследовательского зонда (АК по скорости), а также к определению поглощающих свойств горных пород (АК по затуханию). Обе модификации позволяют выделять интервалы развития трещиноватых и кавернозных пород. Амплитуды и эффективное затухание волн используют для выделения в породах различных неоднородностей, в первую очередь, трещин, каверн, границ слоев. При оценке трещиноватости методом АК используется изменение значений скоростей распространения продольных, поперечных и поверхностных волн, коэффициентов затухания, а также частотные и фазовые спектры упругих импульсов. По итогам обработки результатов исследований возможно установить количественные и качественные показатели трещиноватости. АК проводится с целью изучения пористости, проницаемости и геомеханических свойств горных пород [55], является эффективным при выделении зон повышенной трещиноватости и тектонических зон [56]. АК имеет несколько разновидностей, отличающихся применяемым частотным диапазоном f , типом упругих волн, регистрируемым параметрам:

- ультразвуковой акустический каротаж, $f = 20 \div 75$ кГц;
- волновой акустический каротаж, $f = 5 \div 20$ кГц;

К основным достоинствам акустического метода можно отнести возможность уверенного разделения пород по их акустическим свойствам и сравнительно невысокую чувствительность к неоднородностям стенок ствола скважины [57].

Проведенный обзор показывает, что есть широкий набор методов, позволяющий выявлять наличие трещин в массивах скальных горных пород (таблица 1.5). Однако практически все разработанные методы в отдельности не позволяют получить весь необходимый для расчета фильтрационных характеристик объем исходных данных, характеризующих трещинную сеть.

Таблица 1.5 – Возможности геофизических методов исследований при определении свойств горных пород в массиве

Методы исследования горных пород	Определяемые свойства горных пород в массиве					
	Объемный вес	Прочность	Пустотность/пористость	Литологические различия	Влажность	Физико-механические свойства
Механические		+				
Электрические				+	+	+
Ультразвуковые	+	+	+	+	+	+
Радиоволновые				+	+	+
Сейсмоакустические	+	+	+	+	+	+
Радиоизотопные	+			+		
Видеообследование			+	+		

1.3 Взаимосвязь показателей трещинной сети массива скальных пород с его водопроводящими свойствами.

Теоретическим основам установления взаимосвязи параметров трещин и водопроводящих свойств скальных массивов посвящены исследования многих отечественных и зарубежных ученых: Г.М. Ломизе, В.Н. Жиленкова, В.С. Жуков, М.С. Ромма, Andersson J., Bear J., Berkowitz B., Chen Z., Dershowitz B., Gale J., Hadgu T, Hantush M.S., Hsieh P.A., Irmay S., Liu R., Makedonska N., Oda M., Parsons R. W., Pan J., Robinson P.C., Snow D.T., Singhal B.B.S., Sahimi M., Yeo I.W., Zhang X.

«Трещинные сети формируют взаимосвязанную систему пустот – каналов в массиве горных пород, которая является одним из наиболее значимых факторов, формирующих проводящие свойства конкретного массива для жидких и газообразных сред» [17]. Трещиноватость и проницаемость массива горных пород – наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на безопасность захоронения РАО в массивах скальных горных пород [5]. «Проницаемость как параметр, характеризующий способность горных пород пропускать жидкости или газы под действием силы тяжести или градиента давления, зависит от размера сообщающихся между собой пор и трещин. Проницаемость горных пород характеризуется коэффициентом проницаемости» [58]. Под проницаемостью или фильтрационной способностью понимается возможность движения гравитационной (свободной) воды в массиве, без учета ее плотности и вязкости по системам сообщающихся каналов за счет перепада давления или градиента напора. Количественная характеристика проницаемости – коэффициент проницаемости – теоретически не зависит от свойств фильтрующейся жидкости и определяется размером и характером каналов пористой (в т.ч. трещиноватой) среды [60].

«Величина проницаемости описывается коэффициентом проницаемости $k_{пр}$, который выводится из уравнения Дарси (1.1), в соответствии с которым количество жидкости Q , проходящей через объём горной породы, может быть выражено» [59]:

$$Q = \frac{\Delta P S t}{\Delta L \eta} \cdot k_{пр}, \quad (1.1)$$

где S - площадь поперечного сечения образца, m^2 ; t - время фильтрации, s ; ΔP – перепад давлений на пути фильтрации Δl , Pa ; η - вязкость жидкости, $Pa \cdot s$.

В отношении скальных горных пород, таких как гнейс, гранит и базальт, их гидравлические характеристики в основном определяются присутствующими в них трещинами [61-70], и в меньшей степени самой матрицей горной породы; следовательно, скальные массивы горных пород обычно обладают значительной анизотропией фильтрационных свойств [72-75]. Параметры трещиноватости массивов скальных горных пород, для которых характерны низкие значения проницаемости изменчивы в плане и разрезе. Существует ряд прямых (in-situ) методов, позволяющих оценить водопроницающие свойства массива, а также их неравномерность. К их числу относятся опытно-фильтрационные работы (ОФР), выполняемые на породных обнажениях, либо в стволах разведочных скважин. Помимо прямых методов существуют также и расчётные методы оценки неоднородности водопроницающих свойств скальных пород, базирующиеся на применении количественных характеристик, включая пространственное положение систем и единичных трещин.

1.3.1 Прямые методы оценки водопроницающих свойств трещиноватых массивов скальных горных пород

На стадиях геологического изучения массивов скальных горных пород, предшествующих созданию в них подземных сооружений, гидравлическое опробование или ОФР возможно только с помощью скважин, пробуренных с поверхности. ОФР являются необходимым элементом исследовательских работ, а также широко распространённым методом, обеспечивающим достоверную гидрогеологическую характеризацию водопроницающих свойств исследуемого массива [76]. Формирование подходов к постановке задач фильтрации в трещинной среде должно быть подтверждено практическими результатами ОФР [77]. Данный метод обеспечивает поиск проницаемых зон в трещинных коллекторах, то есть отдельных трещин или их групп, которые характеризуются несколько повышенной водопроницаемостью по отношению к общему геофильтрационному фону массива. Поиск проницаемых зон является специфической задачей ОФР и в практически водонепроницаемых скальных массивах производится достаточно редко. К задачам

проведения ОФР в сети разведочных скважин относится определение трещиноватых интервалов с признаками проницаемости, т.е. выполнение количественного анализа пород вдоль ствола скважины. Основной сложностью таких скважинных ОФР является большая глубина скважин, а также их малый диаметр. Кроме того, трещинные коллекторы в скальных массивах горных пород имеют крайне низкую проницаемость, а при бурении скважины с использованием буровых растворов, либо с использованием воды из поверхностных водоемов и водотоков без их предварительной водоподготовки возникает риск кольтматации трещин, что приводит к некорректным результатам ОФР [78]. Для минимизации данного риска при бурении разведочных скважин на объекте Olkiluoto (Финляндия) вода для бурения подается из большого искусственного озера насосной станцией по трубопроводам, а перед заполнением отстойников на буровой площадке проходит через фильтры 500 микрон. [79].

С помощью скважинных откачек [80, 81], нагнетаний, а также наливов выполняемых, являющихся методиками ОФР, можно производить приближенную интегральную оценку открытой трещиноватости в массиве [82]. Поинтервальные скважинные нагнетания [83] позволяют выделить в интервале глубин зоны с различной степенью трещиноватости. Для характеристики трещиноватости при гидравлическом опробовании скважин применяют параметры: удельное водопоглощение (в результате наливов и нагнетаний), коэффициент фильтрации пород (откачки). В массивах, характеризующихся различной степенью водопроницаемости, широкое распространение получили поинтервальные нагнетания или откачки на участках повышенной трещиноватости, в зависимости от объема водопритока в скважину через системы трещин. Современные методики поинтервальных скважинных нагнетаний и откачек подразумевают применение пакерных систем, позволяющих изолировать интересующий скважинный интервал (рис. 1.3). В ходе данных исследований происходит замер объема откачанной или поглощенной воды, а также время восстановления уровня в наблюдаемом интервале при помощи датчиков, включая барологгеры. Близким к гидравлическому опробованию является опробование скважины сжатым воздухом, позволяющее производить исследования при любых температурах окружающей среды и выявлять наличие микротрещин в массиве.

Принимая во внимание очевидные достоинства применения гидравлических скважинных исследований, их незначительным недостатком является длительность проведения исследований из-за того, что скальные массивы горных пород, потенциально пригодных для строительства ПГЗРО, обладают достаточно низкой проницаемостью.

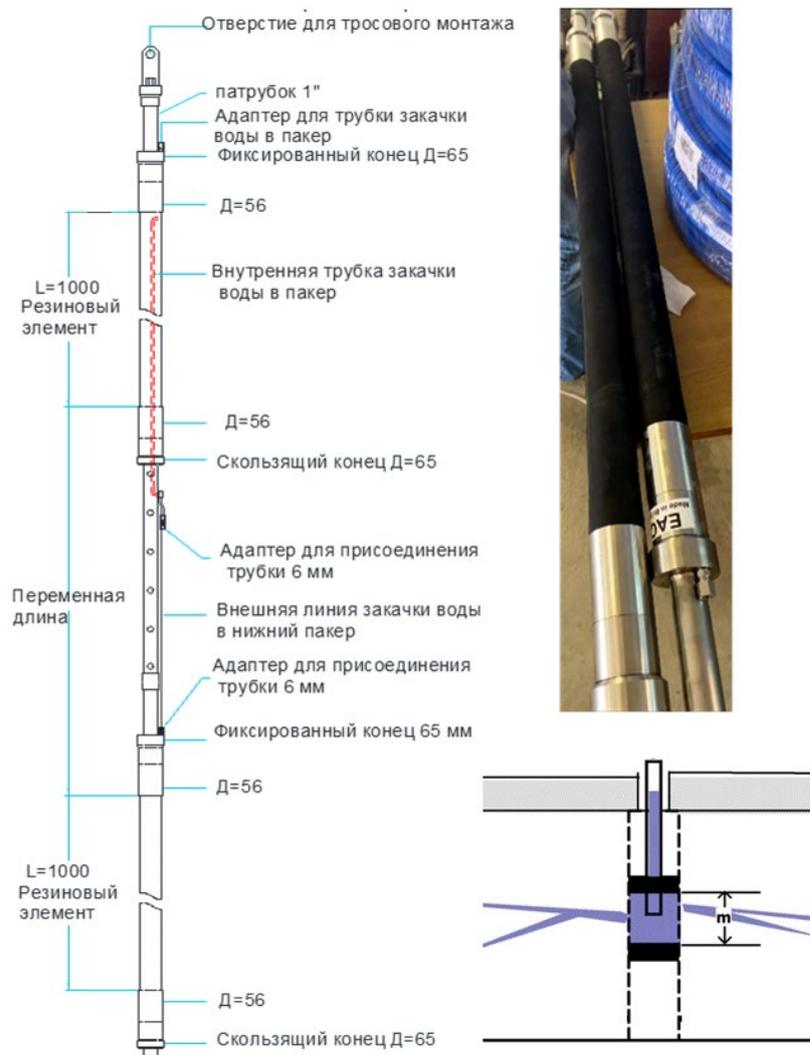


Рисунок 1.3 – Пакерная система (двойной пакерный снаряд) [84]

К существенным же недостаткам оценки водопроявляющих свойств трещиноватых горных пород можно отнести погрешности измерений, вызванных рядом факторов таких как: методика измерений и обработки их результатов, состояние скважины на момент обследования, кольматация трещин и т.п. Тем не менее, на сегодняшний день, данный способ является наиболее распространенным при проведении инженерных изысканий и определения гидродинамических условий водопроявляющих горизонтов. При этом применяемые для оценки фильтрационных характеристик массивов скальных пород полевые скважинные методики ОФР позволяют дать интегральную оценку фильтрационных характеристик в заданном интервале и не позволяют оценить неравномерность распределения водопроявляющих свойств в трещиноватом блоке в зависимости от количественных параметров присутствующих в нем трещин.

Анизотропия водопроявляющих свойств горных пород в отдельном интервале может быть охарактеризована каротажными методами, в основе которых заложен измерения направлений потока подземных вод по единичным трещинам (метод дифференциальной

расходомерии). Дифференциальный измеритель потока (Difference flow meter) [85-88], разработанный компанией PRG-Тес Оу по заказу Posiva Оу позволяет идентифицировать и охарактеризовать водопроницаемость трещин в глубоких разведочных скважинах. Измерение потока воды проводится на ограниченном участке скважины, что повышает чувствительность метода. Измеритель потока измеряет скорость потока внутрь или наружу на участке скважины через специальный проводник. Резиновые диски на обоих концах проводника изолируют поток воды на исследуемом участке скважины от потока в оставшемся [76]. Однако возможность применения данного зонда (Difference flow meter) на территории РФ отсутствует.

1.3.2 Расчётные методы оценки водопроницающих свойств трещиноватых массивов скальных горных пород

Связи проницаемости кристаллических горных пород с геометрией системы трещин и свойствами жидкости рассматривались на примере большого количества различных моделей [89, 91]. Основной темой данных исследований являлся поиск подходов к определению с удовлетворительной точностью параметров водопроницаемости горных пород косвенными методами в зависимости от количественных параметров трещинной сети. Точность выполненных расчётов может считаться удовлетворительной, если она не хуже результатов исследований, выполненных в лабораторных или природных условиях прямыми методами, например, опытно-фильтрационными работами в открытых стволах разведочных скважин [17]. Расчётные методы оценки водопроницающих свойств массивов трещиноватых горных пород предполагают выполнение оценки проницаемости множества трещин в выделенном блоке. Задача расчёта потока для системной сети трещин без учета изменчивости их длины решена Е.С. Роммом [92, 33], Snow D.T. [72]. Значительный объем работ по оценке фильтрационных свойств массива в зависимости от геометрических характеристик трещин был выполнен в работах Ломизе [94], Hadgu T [95].

Выполненная в середине XX века Г.М. Ломизе работа [94], посвящена изучению движения воды в трещиноватых горных породах. На основе серии экспериментов выявлены основные параметры и закономерности изменения водопроницающих свойств массива, в зависимости от характера течения проходящего через присутствующие в нем трещины потока воды – ламинарного или турбулентного, и количественных параметров трещин [94]. По итогам оценки влияния различных количественных показателей трещиноватости на фильтрационные характеристики массива скальных пород, было определено, что наибольшее влияние на проводящие свойства оказывают совокупная пустотность горной породы, апертура или величина раскрытия трещин. Менее значимыми факторами являются: шероховатость, извилистость и форма стенок трещин, клиновидность – их влияние на порядок меньше.

Решение данной задачи не учитывало вариативности значений градиента давления, как одного из значимых факторов, влияющего на параметры подземных гидродинамических процессов.

Вопросы связи гидравлических реакций массивов трещиноватых горных пород на изменение градиента давления находятся в центре внимания различных геолого-геофизических и инженерных дисциплин, включая инженерную геологию, горное дело и проч. [96]. В работах Е.С. Ромма [33, 92], посвященным вопросам физического и математического моделирования структуры порового пространства горных пород, представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований механизмов фильтрации на трещинно-капиллярных моделях структуры порового пространства. Были установлены связи между значениями тензора проницаемости и параметрами трещиноватости горных пород. Также были получены эмпирические зависимости, позволяющие расчётными методами оценить проницаемость в любых, совпадающем с градиентом давлений направлениях [15]. «Тензор проницаемости» впервые был предложен Дж. Феррандоном в середине XX века [97], как характеристика неоднородности фильтрационных параметров горных пород. Подходы к вычислению тензора проницаемости описаны в ряде научных публикаций, изданных в течение последних нескольких десятилетий [98-106]. Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости, выражаемого через коэффициент трещинной проницаемости (k_n), являются следующие количественные характеристики трещин: азимуты падения и простирания, угол падения, раскрытие трещин и интенсивность трещиноватости [33, 92]. Определение значений трещинной проницаемости может являться основой для определения анизотропии водопроводящих свойств трещиноватых участков скальных горных пород. Получаемая расчётными методами на основе количественных характеристик трещинной сети массива неравномерность значений k_n в водопроводящих интервалах позволяет оценить значения коэффициента фильтрации k_ϕ (1.2), а также других характеристик проницаемости трещиноватых участков скальных пород, в частности: водопроводимости T (1.3) и, при наличии дополнительных исходных данных, расхода воды Q (1.4) в водопроводящем интервале ствола скважины относительно направлений осей X, Y, Z.

$$k_\phi = k_n \frac{\gamma \cdot g}{\mu}, \quad (1.2)$$

где k_n – трещинная проницаемость (m^2), γ – плотность (kg/m^3) жидкости, g – ускорение свободного падения (m/s^2), μ – динамическая вязкость жидкости ($Pa \cdot s$).

$$T = k_\phi \cdot m, \quad (1.3)$$

где m – мощность водопроводящего трещиноватого интервала(м).

$$Q = k_{\phi} \frac{\Delta p F}{\mu l}, \quad (1.4)$$

где $\frac{\Delta p}{l}$ – градиент давления, F - площадь фильтрации.

Полученные Е.С. Роммом значения проницаемости были сопоставимы с результатами натуральных гидродинамических скважинных обследований, проведенных в продуктивных нефте- и газоносных пластах карбонатных пород, что свидетельствует о пригодности данного метода для решения задач оценки неравномерности водопрводящих свойств массивов скальных горных пород. Однако широкого применения данный подход в практике инженерных изысканий не получил.

Выводы и постановка задачи исследования

Анализ литературных источников позволил установить, что:

- характеристики трещинной сети массивов скальных пород оказывают приоритетное влияние на параметры движения жидкости, в т.ч. определяют направление движения подземных вод в отдельных блоках и массиве в целом;
- результаты ранее выполненных исследований позволили получить эмпирические зависимости водопрводящих свойств скальных массивов от количественных параметров и пространственного положения трещинных систем. Перечень количественных параметров трещинной сети, в наибольшей степени влияющих на водопрводящие свойства скального массива, включает в себя такие показатели как пространственное положение трещин - азимуты падения и простираия, угол падения, геометрические характеристики трещин – раскрытие, интенсивность трещиноватости;
- для количественной характеристики параметров систем трещин в натуральных условиях существует широкий набор прямых и косвенных методов изучения. Косвенные методы, такие как геофизические методы, предполагают получение относительных количественных характеристик массива и требуют верификации прямыми методами. Прямые методы, подразумевающие изучение трещиноватости на породных обнажениях, позволяют получать наиболее точные количественные показатели. Вместе с тем, большая часть прямых методов неприменима для исследований в скважинах, в случае если их бурение производилось без отбора ориентированного керна;
- наряду с вышеприведенными прямыми и косвенными методами, опосредованная оценка параметров трещинной сети на исследуемом участке может быть осуществлена с использованием скважинных ОФР, позволяющих получать количественную оценку параметров

проницаемости горных пород по разрезу/глубине. Однако, свойственную скальным породам анизотропию водопрводящих свойств, необходимую для выполнения расчётного обоснования безопасности глубинного захоронения РАО, в отдельном трещиноватом водопрводящем интервале, данные методики установить не позволяют;

– помимо полевых методов существуют расчётные методы оценки неоднородности водопрводящих свойств скальных пород, базирующиеся на применении количественных характеристик систем и единичных трещин и их пространственного положения. В их число входит метод определения тензора трещинной проницаемости. Количественная оценка необходимых показателей трещинной сети может быть выполнена в ходе видеокаротажных обследований, но большинство каротажных комплексов позволяют оценить только наличие трещин на определенных глубинах без их координатной привязки и формирования масштабных панорамных снимков. Без данной функции установление параметров пространственного положения трещин, их геометрических характеристик в массиве не представляется возможным.

Это определило состав задач диссертационного исследования.

Глава 2. Разработка каротажного программно-аппаратного комплекса для количественной характеристики параметров сети трещин

Исходя из определенного в Главе 1 перечня количественных параметров сетей трещин, оказывающих наибольшее влияние на водопродвижающие показатели массива скальных пород, скважинное оборудование должно обладать следующими возможностями:

- созданием имеющих пространственную координатную привязку панорамных (360⁰) цветных фотоснимков трещиноватых участков в незакрепленном стволе скважины;
- количественной характеристикой параметров трещины (длина, раскрытие) и их пространственного положения (угол падения, азимут простирания и падения), а также наличия трещинного заполнителя;
- статистической обработкой параметров трещиноватости в незакрепленном стволе скважины.

Данный функционал может быть обеспечен блоками координатной привязки и ориентации, позволяющими установить положение зон нарушений в массиве. Дополнительным отличием от существующих отечественных скважинных видеосистем должно быть наличие цветной камеры высокого разрешения, позволяющей производить фотодокументирование стенок стволов скважин. Это позволит количественно охарактеризовать (классифицировать) визуально выделяемые системы нарушений. Другим отличием зонда от его не прямых аналогов, в т.ч. зарубежных также должна стать:

- возможность работы на глубинах более 1000 метров в заполненных водой скважинах (совокупные характеристики скважин, пройденные на участке Енисейский);
- отсутствие необходимости в закупке дополнительного дорогостоящего программного обеспечения для обработки данных (Well CAD и проч.), обработка данных должна осуществляться с помощью алгоритмов, разработанных на языке Python, а также программным обеспечением, находящимся в открытом доступе;
- высокая ремонтпригодность и возможность работы с различными типами геофизических кабелей.

2.1 Компоновка скважинного каротажного комплекса

Разрабатываемый каротажный программно-аппаратный комплекс (каротажный комплекс) предназначен для проведения исследований в сети разведочных скважин участка Енисейский (Красноярский край), являющегося потенциально пригодным для создания

ПГЗРО. Основным элементом разрабатываемого каротажного комплекса является видеозонд. Конструкция и исполнение зонда обусловлены параметрами сети скважин, включая глубины, диаметры бурения, а также заполненность скважин водой. Для обеспечения необходимого функционала видеозонд (рис 2.1) решено оснастить фронтальной и боковой камерами, центрирующими устройствами, а также снабжен стандартным разъемом для присоединения геофизического каротажного оборудования и встроенным аккумулятором.

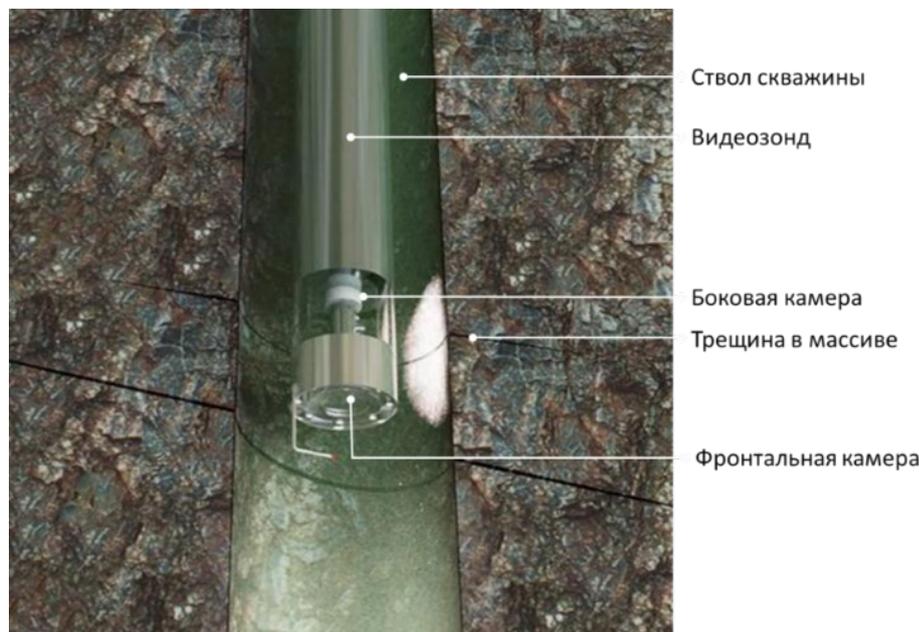


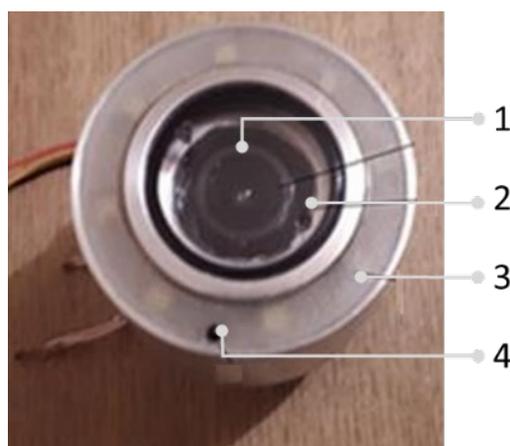
Рисунок 2.1 – Принципиальная схема обследования прискважинной зоны массива пород с помощью разработанного оборудования [107]

Исходя из результатов анализа конструкций разведочных скважин и оценки их фактического состояния, было принято решение о применении в процессе разработки видеозонда следующих технических решений:

- диаметр корпуса – 48 мм, с учетом диаметра центрирующих приспособлений – 54 мм;
- освещение от 8-и встроенных в корпус светодиодов общим напряжением питания 12 В и общей мощностью 0,5 Вт, световым потоком – 90 Лм, индекс цветопередачи – 75;
- камера фронтальная корпусная цветная цилиндрическая АНД, модель DMCF131, 1,3 мегапикселей, диаметром 18 мм, чувствительностью 0,1 люкс, углом обзора 120 гр.;
- камера бокового обзора модель 205V-WD с устройством вращения и электронным компасом GY-271 LSM303DLHC, азимут - угол между направлением на север и линией изображения боковой камеры;

- вывод изображения и запись осуществляется на экран ноутбука (ПК), с автономным собственным источником питания через TV-тюнер, расположенный в каротажном блоке;
- время непрерывной работы от аккумулятора не менее 15-и часов;
- длина линии связи – не менее 600 м;
- напряжение питания – 12 В, встроенный в корпус аккумулятор ёмкостью 9,9 А/ч;
- время заряда аккумулятора от встроенного в корпус зарядного устройства - не более 4-х часов;
- согласующее устройство передачи видеосигнала от камер настроено на использование линии связи типа витая пара, как самый распространенный вид линии связи, максимальная длина линии связи может быть до 1500 м.

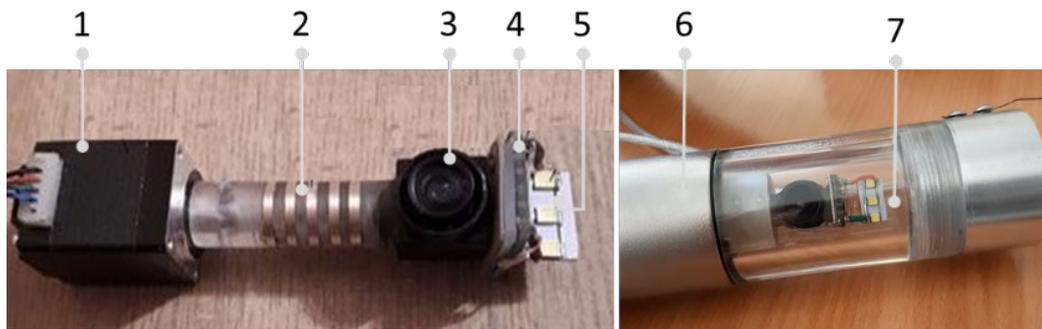
Фронтальная камера видеозонда предназначена для позиционирования зонда в скважине по отношению к элементам геологического строения и выявления интересующих участков массива.



1 – фронтальная камера; 2 – защитное стекло с уплотнителем; 3 – осветительные светодиоды под защитной пленкой; 4 – датчик температуры

Рисунок 2.2 – Блок фронтальной камеры

Боковая камера предназначена для детального изучения особенностей геологического разреза и создания цветных панорамных (360⁰) изображений стенок ствола скважины. Для этого боковая камера смонтирована на вращающейся оси, обеспечивающей получение изображения по всей окружности поверхности скважины. Поворот камеры осуществляется с помощью шагового двигателя. Для получения качественного изображения все камеры оборудованы маломощными диодами, не требующими специального радиатора охлаждения. Спектр света осветителей близок к дневному [108]. На рис. 2.3 представлен блок боковой камеры с осветителями, смонтированный в корпусе зонда.



1 – шаговый поворотный двигатель, для вращения боковой камеры; 2 – коллекторные контакты для питания и управления элементами схемы; 3 – боковая камера; 4 – магнитная электронная буссоль; 5 – осветители; 6 – корпус зонда; 7 – защитное стекло

Рисунок 2.3 – Блок фронтальной камеры

Боковая камера вклеена в торцевую часть корпуса и защищена специальным стеклом с дополнительно увеличенным углом обзора. Фокус настроен при изготовлении на наиболее оптимальный ракурс обзора стенки скважины диаметром 60-300 мм. Обе камеры обеспечивают получение изображения высокой четкости в водной среде. Камеры зонда работают от локальной сети питания с напряжением 3,3 В. Напряжение на камеры подается от встроенного в корпус аккумулятора через стабилизатор. Включение и отключение питания камер осуществляется с помощью выключателя, расположенного также внутри корпуса зонда в торце между контактами передающего кабеля, подключаемого через геофизический винтовой разъем и гнездом для зарядного устройства аккумулятора (рис. 2.4). Расположение выключателя обусловлено требованиями по герметичности зонда при нахождении на больших глубинах, исключающей наличие дополнительных отверстий в его корпусе. Кнопка выключателя доступна через отверстие диаметром 2 мм и глубиной 3 мм.

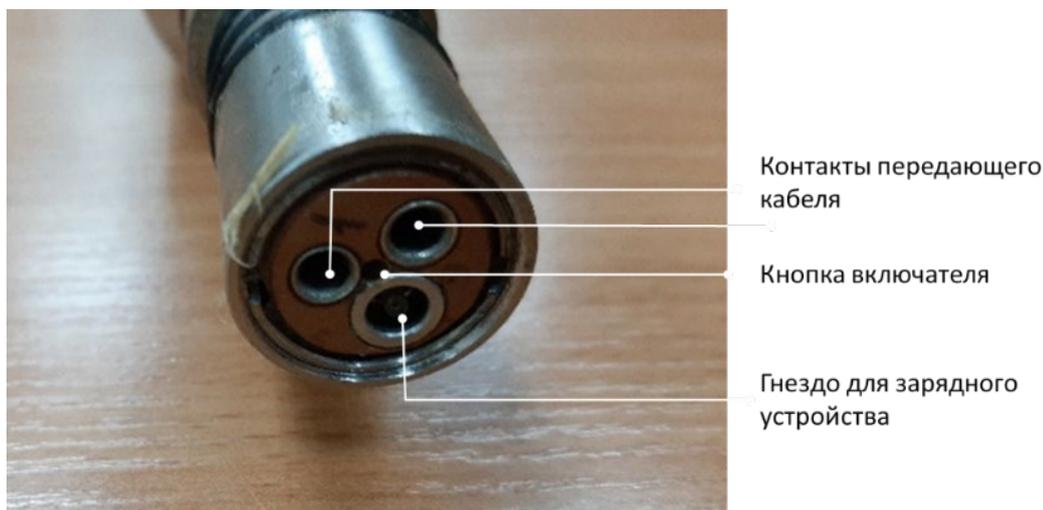


Рисунок 2.4 – Расположение отверстия и доступ к выключателю электропитания элементов в корпусе зонда

Для определения пространственного положения трещин при выполнении исследований в стволе скважины в стволе скважины использован электронный компас Буссоль (фр. boussole - «компас»). Шкала буссоли обеспечивает прямое, без вычислений, взятие магнитных азимутов, совпадающих с осью изображения боковой камеры. Буссоль (рис. 2.5) представлена в виде электронной платы, соединённой с платой управления и передачи данных от компаса. Обе платы интегрированы в аппаратную схему зонда.

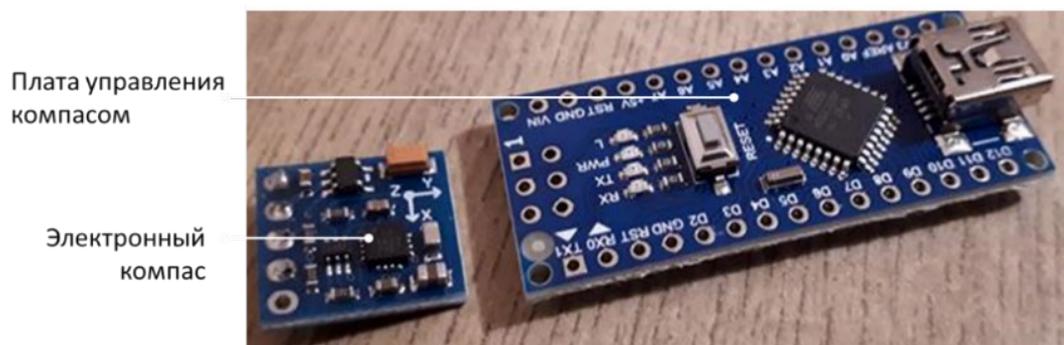
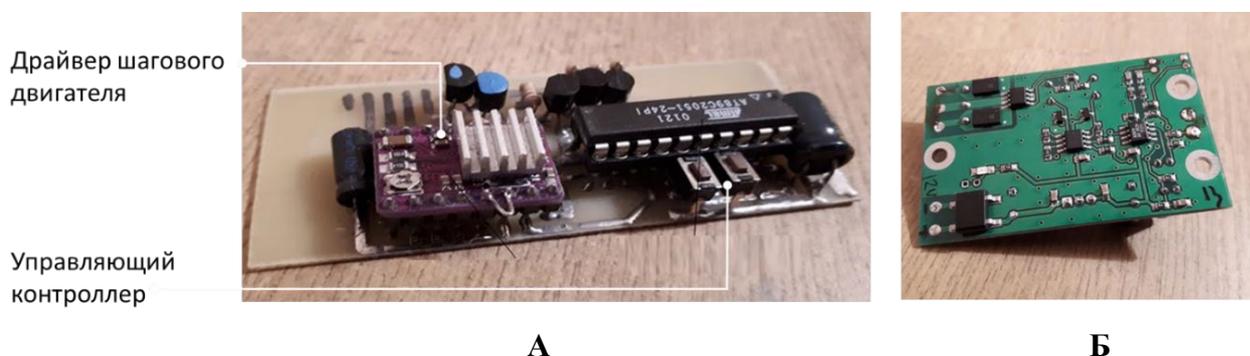


Рисунок 2.5 – Буссоль

На рис. 2.6 представлены компоненты управления боковой видеокамерой, также находящиеся внутри корпуса зонда. Контроллер управления шаговым двигателем боковой камеры с коммутационными и входными элементами (рис. 2.6, А). Назначение контроллера – передача сигнала через драйвер на шаговый двигатель, вращающий боковую камеру вокруг своей оси, позволяющие получать панорамное видеоизображение стенок скважины, а также останавливать вращение для получения дополнительных фотоизображений интересующих участков массива. Плата согласующего усилителя (рис. 2.6, Б) предназначена для передачи сигнала видеоизображения по линии связи на декодер, установленный в каротажном блоке с последующим воспроизведением и записью видеоизображения на ПК.



А – контроллер управления и драйвер шагового двигателя;
 Б – плата согласующего усилителя

Рисунок 2.6 – Элементы, позволяющие получать панорамное изображение с боковой камеры зонда

Значения азимута оси изображения с боковой камеры отображается на экране ПК (рис. 2.7). Для фронтальной камеры верх экрана совпадает со значением азимута, при направлении оси боковой камеры на шлейф из проводов. Соответственно, если азимут показывает 90 градусов и боковая камера направлена при этом на проводной шлейф, это означает, что верх экрана с фронтальным изображением повернут на 90 градусов от направления на север. Обе камеры имеют достаточную глубину изображения для получения высокой четкости на расстоянии от 5 мм до 300 мм. Измерения производятся в автоматическом режиме, значение азимута совпадает с осью изображения боковой камеры.



Рисунок 2.7 – Пример отображения показаний электронного компаса на изображении, передающемся с камер зонда (боковая камера)

Ретрансляции видеосигнала и измеряемых показателей (положение зонда относительно сторон света, глубина погружения зонда, температура среды) на ПК осуществляются с помощью каротажного блока. В виду того, что стволы разведочных скважин участка Енисейский являются водонаполненными корпус зонда изготовлен из нержавеющей стали и выполнен в герметичном исполнении. Разбирается корпус раскручиванием по резьбовому соединению со стороны верхней части бокового стекла, нижняя часть корпуса является условно неразъемной, т.к. она не содержит многоразовых уплотнителей; герметичность достигается применением между соединяющимися элементами гидрофобного состава на основе силикона. Для герметизации разъемных частей конструкции зонда предусмотрены уплотнительные многоразовые резиновые кольца.

Перемещение зонда по скважине осуществляется с помощью геофизического кабеля, через который предаются данные обследования на каротажный блок и управляющие сигналы на аппаратную часть зонда. Данные о глубине нахождения зонда считываются каротажным блоком с датчика, установленного в блоке-балансе, вращаемого геофизическим кабелем. Блок-

баланс монтируется на устье скважины и предохраняет кабель от изламывания и истирания о края обсадной трубы. Для поддержки равного удаления камер от стенок скважины и сохранения стабильного фокусного расстояния конструкция корпуса зонда предусматривает монтаж пружинных центрирующих устройств из эластичной резины (рис. 2.8). Центрирующие устройства крепятся на корпусе водостойкой клейкой лентой, такое решение было принято из-за того, что крепление центраторов с помощью металлических или пластиковых хомутов создает дополнительный риск зацепов зонда о неровности стенок скважины при спускоподъемных операциях. Диаметр зонда с разведенными центраторами должен соответствовать диаметру обследуемой скважины, позволяя свободно перемещаться оборудованию в скважине, избегая касаний её стенок корпусом зонда.

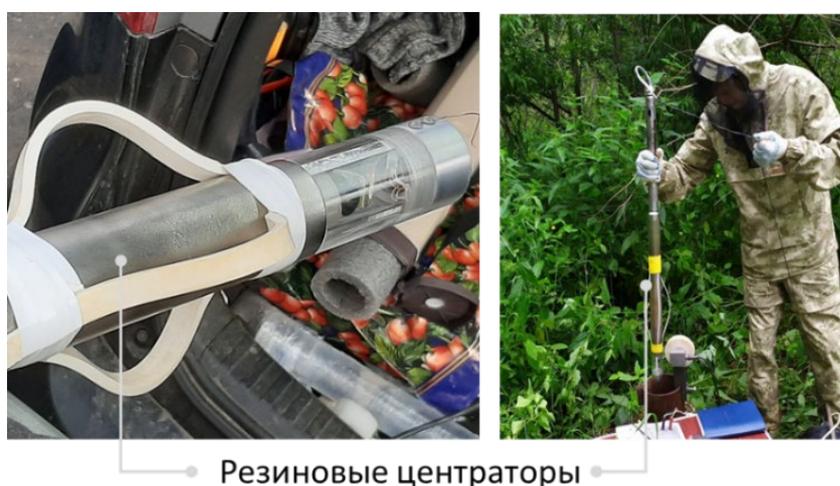


Рисунок 2.8 – Каротажный зонд с смонтированными на его корпусе центрирующими устройствами [107]

2.2 Элементы управления скважинным зондом

Управление зондом осуществляется при помощи каротажного блока (рис. 2.9). Блок предназначен для ретрансляции видеосигнала и показаний с модулей, входящих в состав зонда (температура, показания электронного компаса) на экран ПК, управлениями режима передачи изображения от видеокамер (фронтальная или боковая), счета глубины погружения зонда в скважину и отображения соответствующих параметров на экране монитора. Все элементы управления зондом расположены на корпусе каротажного блока рис. 2.10. В корпусе каротажного блока смонтировано устройство оцифровки сигнала – ТВ тюнер, позволяющее через соответствующий кабель, подключенный к ПК через стандартный USB-разъем, передавать изображение, показания компаса, глубину погружения и температуры воды в единый видеосигнал для записи и последующей обработки. Показатели счётчика глубины погружения зонда продублированы на дисплее каротажного блока. Каротажный блок запитывается от сети 220 В. При выполнении работ в полевых условиях возможно

подключение каротажного блока к источнику питания 12 В через преобразователь напряжения. Геофизический кабель, передающий видеосигнал от зонда к каротажному блоку подсоединяется через штекерные разъемы, выведенные на лицевую панель. Сигнал, передающий значения глубины погружения зонда от датчика на блок-балансе (рис. 2.11) передается через отдельный кабель, подсоединенный к каротажному блоку через винтовой разъем.



Рисунок 2.9 – Общий вид каротажного блока

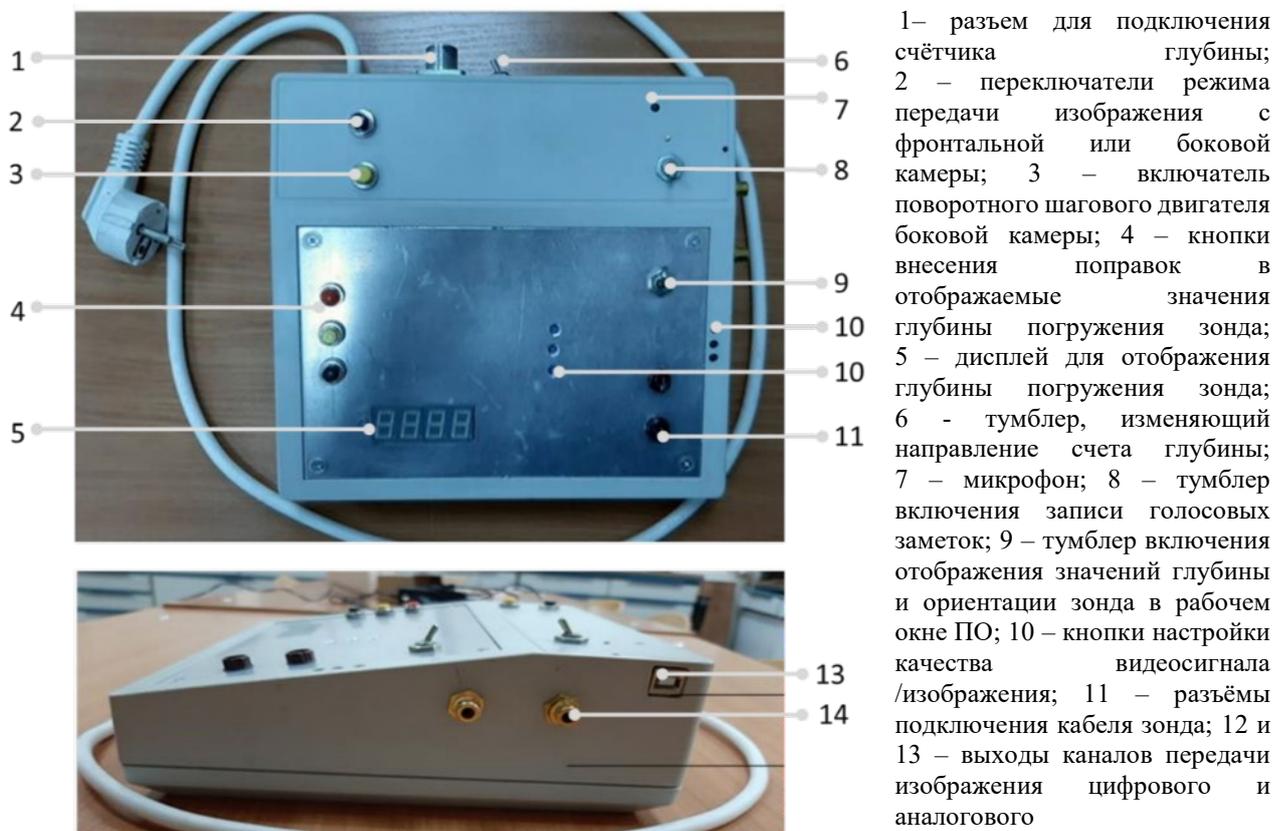


Рисунок 2.10 – Назначение элементов каротажного блока

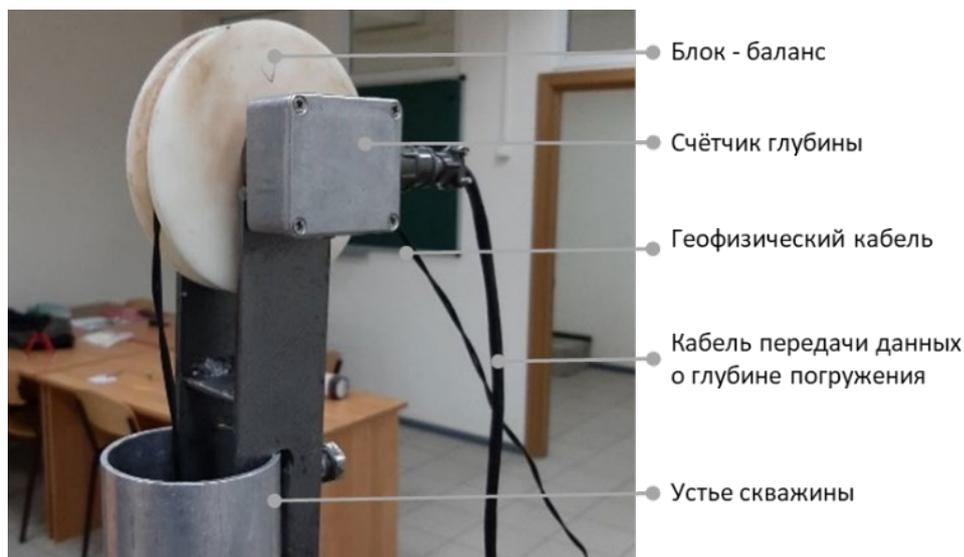


Рисунок 2.11 – Устаовленный на макете скважины блок-баланс с датчиком счета глубины погружения зонда

2.3 Программное обеспечение для обработки данных, получаемых в ходе видеообследований скважины

Для сбора, первичной и камеральной обработки получаемой информации исходя из функционала и применённых технических решений при разработке каротажного комплекса был определен комплект необходимого программного обеспечения: модуль для проведения полевых исследований, модуль подготовки полевой информации к камеральной обработке и модуль камеральной обработки, систематизации и визуализации полевых исследований. В комплект включено специально разработанное программное обеспечение и серийное, находящееся в свободном доступе.

В частности, техническими решениями, применёнными при разработке зонда, обеспечивается формирование панорамной съемки стенок скважины в формате видеофайлов. Программное обеспечение, предназначенное для камеральной обработки результатов видеообследований, в качестве исходных данных использует фотоснимки. В данной связи возникла необходимость в разработке программного кода, конвертирующего видеофайлы в панорамные 360⁰ фотоснимки с присвоением им меток координатной привязки и наложения масштабной сетки, делающей возможным геометрическую характеристику выявленных систем трещин.

Модуль для проведения полевых исследований

Предназначен для сбора полевых данных в формате видеоизображений. Данный модуль является серийным программным обеспечением, позволяющим формировать видеофайлы в формате *.mp4. Модуль имеет ограниченный функционал видеозаписи

обследований на жесткий диск ПК/ноутбука. На видеозаписи фиксируются изображения, получаемые с камер, показания глубины погружения, температуры, магнитного компаса.

Модуль подготовки полевой информации к камеральной обработке

Представляет собой совокупность разработанных программных кодов. Для преобразования видеофайлов в панорамные снимки с наложением на них масштабной сетки и назначением каждому снимку координатной привязки Алгоритм подготовки полевых данных полевых исследований представлен в виде следующей последовательности действий:

- выбор на видеозаписи отрезков, снятых боковой камерой, на котором запечатлён участок массива с системой трещин;
- определение тайм-кода-времени начала поворота боковой камеры (после установки зонда на заданной глубине) (рис. 2.12);
- занесение тайм-кода соответствующего интервала обследований в единую таблицу (рис. 2.13). Тайм-код вносится в столбец «идентификационный номер панорамного изображения»;
- загрузка конвертированной видеозаписи в программную среду (диск Google);
- формирование панорамных снимков ствола на выделенном интервале с помощью модуля подготовки.

Для работы с видеозаписями, создаваемыми модулем первичной обработки, используется библиотека OpenCV (код написан на языке Python в формате IPython Notebook). Модуль подготовки задействует «облачный» ресурс/платформу Google «Colaboratory» позволяющий оперативно задействовать и, при необходимости, адаптировать программу в удаленном режиме. Исходный код программы сохраняется на ПК. Для запуска кода также используется облачная платформа «Collaboratory». Модуль подготовки формирует снимок путем совмещения большого числа изображений, созданных из кадров видеозаписи панорамы ствола скважины. Данное решение позволило существенно повысить качество изображений, включая устранение сферических искажений. Для формирования панорамного изображения интервала из соответствующего видео файла в используемом коде должны быть в обязательном порядке указаны следующие данные:

- название видеофайла /gdrive/My Drive/Probe/url/P1/P-1-004.mp4;
- папку для сохранения панорамного снимка /gdrive/My Drive/Probe/pano/P1;
- диаметр ствола скважины в м. (0.112);
- тайм-код прохождения камеры через шлейф (01:23:39:10).



Рисунок 2.12 – Определение тайм-кода для формирования панорамного изображения из видеозаписи

	B	C	D	E	F	G
1	Скважина	P-1				
2	Дата обследования	09.09.2020				
3	Уровень воды, м	13,45				
4	Глубинная отметка, м.	Диаметр бурения, мм.	Время	Идентификационный номер панорамного изображения	Файл	Комментарий
230	224,80	112,00	38,04		P-01-005	Трещины коры выветривания
231	225,05	112,00	38,49		P-01-005	Трещины коры выветривания
232	226,40	112,00	40,10	0:40:22:60	P-01-005	Мощная открытая трещина
233	226,85	112,00	41,12	0:41:15:30	P-01-005	Мощная открытая трещина
234	226,80	112,00	42,00		P-01-005	Трещины коры выветривания
235	227,50	112,00	42,57	0:43:08:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
236	227,75	112,00	43,50	0:44:02:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
237	228,80	112,00	44,50	0:45:03:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
238	229,05	112,00	45,43		P-01-005	Трещины коры выветривания
239	229,90	112,00	47,00		P-01-005	Трещины коры выветривания
240	230,15	112,00	47,55	0:48:08:20	P-01-005	Трещины коры выветривания
241	230,20	112,00	48,55	0:49:07:05	P-01-005	Трещины коры выветривания
242	230,15	112,00	49,35		P-01-005	Трещины коры выветривания
243	230,60	112,00	50,25		P-01-005	Трещины коры выветривания

Рисунок 2.13 – Таблица интервалов обследований (желтым цветом выделены первоочередные) и соответствующих тайм-кодов/идентификационных номеров панорамных снимков

Алгоритм подготовки панорамных снимков трещиноватых интервалов представлен в виде следующей последовательности действий:

1) выбор пользователем параметров: времени начала вращения боковой камеры; кол-во кадров для создания панорамного снимка; скорости смещения кадров; диаметр скважины – для автоматического назначения кодом масштабной сетки, которая будет нанесена на панорамный снимок;

2) автоматическое формирование панорамного снимка: удаление кадров-дубликатов; соединение кадров по середине; нанесение масштабной сетки на изображение и сохранение файла.

Значения глубины, температуры воды в стволе скважины и показания электронного компаса при сборке модулем единичных снимков воспринимаются программой, как

искажения и фиксируются на конечном панорамном изображении (рис. 2.14). Исключение составляют показания компаса на момент прохождения боковой камерой шлейфа и при приближении камеры к отправной точке (после ее неполного оборота 350 град.). Данное исключение является вынужденной временной мерой, т.к. сигнал, поступающий с электрической платы компаса, подается 6 (шесть) раз за один оборот камеры и для более достоверной пространственной привязки изображения стенки ствола скважины (в т.ч. зафиксированных на нем систем трещин) необходимо иметь не менее двух показаний, полученных с компаса.

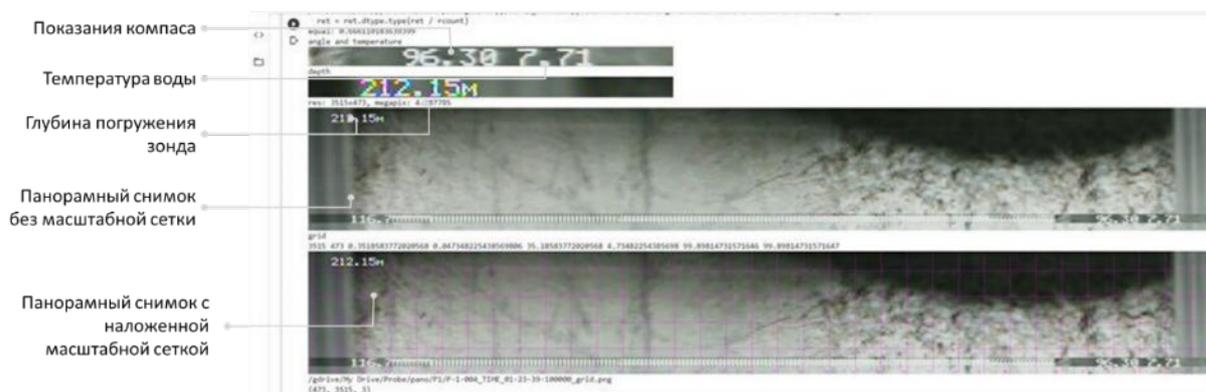


Рисунок 2.14 – Распознаваемые программой данные и их отображение на конечном панорамном изображении

Представленный на рис. 2.14 панорамное изображение формируется программой в папке на Google Drive в двух вариантах – с масштабной сеткой и без нее, имеющих автоматически присвоенные файловые имена – идентификаторы, например: P-1-004_TIME_01-36-11-200000_pano.png; P-1-004_TIME_01-36-11-200000_grid.png. Файлы имеют различные наименования, но общий идентификатор, отраженный в их названии, где «P-1-004» - название исходного файла видеозаписи, TIME_01-36-11-200000 – тайм-код видеозаписи, pano/grid – наличие или отсутствие на изображении масштабной сетки. При разрешении 3467 x 473 пикселей размер панорамного снимка составляет, в среднем, 2-3 Мб.

Модуль камеральной обработки, систематизации и визуализации полевых исследований

Выделение трещин из панорамных изображений (рис. 2.14) осуществляется с помощью методики проведения линеаментного анализа. На рис. 2.15 приведено описание основных этапов линеаментного анализа. Привязка панорамного изображения в локальной прямоугольной системе координат производится с использованием географической информационной системы (ГИС) QGIS [109]. Для того чтобы задать прямоугольную проекцию изображению, выполняется его сохранение из ГИС с использованием проекции Google Maps Global Mercator, имеющей EPSG – 90091 [108].



Рисунок 2.15 – Алгоритм обработки панорамных изображений [108]

Направленная фильтрация применяется для улучшения характеристик изображения, имеющего определенные градиенты направления [110]. Направленная фильтрация изображения традиционно производится по четырем основным направлениям: N-S к 0° , NE-SW к 45° , E-W к 90° (рис. 2.17), с целью подчеркнуть все возможные направления структур изображения [111]. Направленный фильтр применяется к изображению с использованием процесса свертки, посредством построения фильтрационного окна Собеля, как правило, с ядром (3×3) пикселя [112]. Опытным путем был установлен размер ядра свертки (13×13) пикселей, т.к. обрабатываемые изображения с при меньшем размере ядра фильтра проявляются артефакты несвязанные со структурными особенностями стенок скважин. В качестве примера приведен результат применения направленного фильтра на панорамном изображении с глубиной отметки 117.35 метров в скважине Р-3 (рис. 2.16).



Рисунок 2.16 – Оригинальное изображение панорамы с глубиной отметкой 117.35 метров скважины Р-3

Исходное изображение состоит из трех спектральных каналов: R, G, B. На вход фильтра был подан R канал, так как данные, полученные в красном и инфракрасном спектральных диапазонах более чувствительны к геолого-структурным особенностям [113]. На рисунке 2.17 представлен результат направленного фильтра по направлению E-W (90°). Фильтрация в горизонтальном направлении дает наилучшие результаты, подчеркивая все основные трещины. На рисунке 2.18 представлено RGB композитное изображение. Красный канал

представлен результатом фильтрации в направлении E-W, зеленый канал направлением NE-SW и синий канал направлением NW-SE.

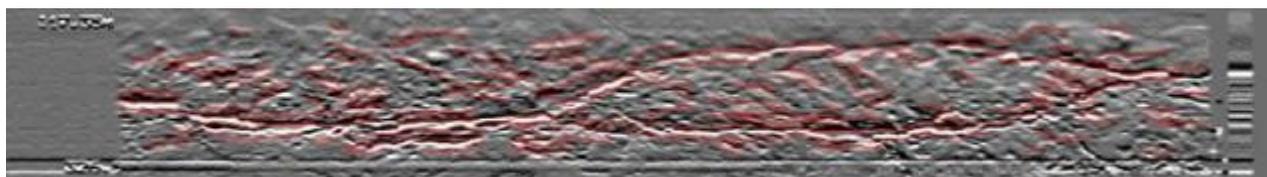


Рисунок 2.17 – Результат направленного фильтра в направлении E-W с ядром свертки 13x13 пикселей

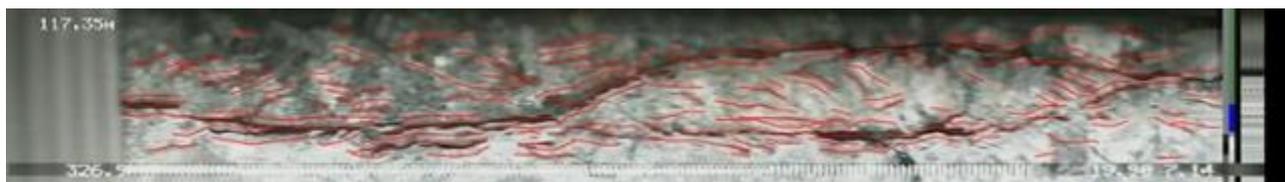


Рисунок 2.18 – RGB композитное изображение

Для автоматического извлечения линементных структур используются только результаты фильтрации по направлению E-W. Автоматическое извлечение трещин (линементов), согласно методике [114] производится в два этапа:

1. обнаружение границ для получения информации об областях резких изменений значений в соседних пикселях, затем производится обнаружение кривых с использованием модуля LINE программного обеспечения PCI Geomatica, наиболее широко используемого модуля для автоматического извлечения линементов;

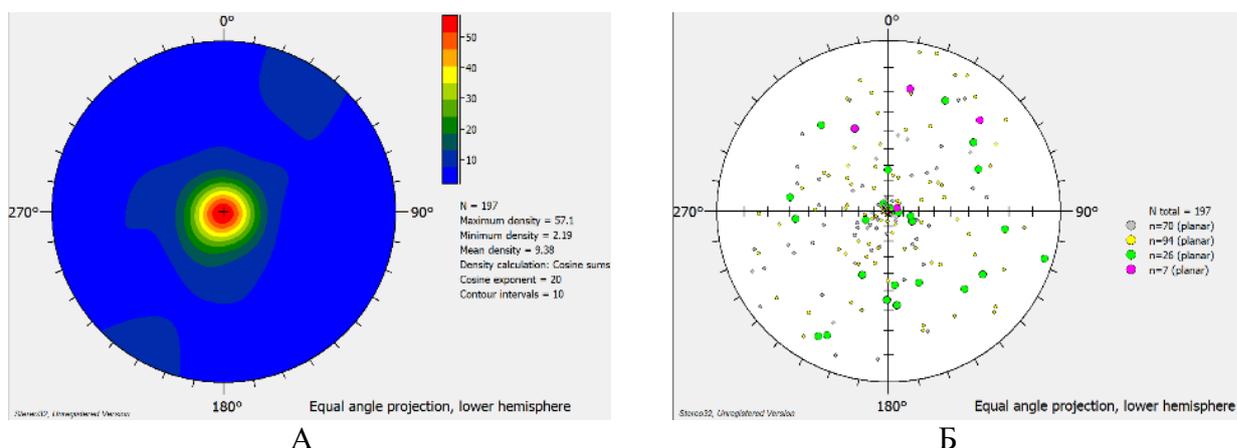
2. извлечение кривых и их преобразование в векторную форму путем связывания отрезков линии. После этого создавались полилинии, соединявшиеся попарно в линеамент.

На основе встроенного в QGIS функционала и при помощи расширений, был создан полуавтоматический алгоритм вычисления углов падения, азимутов падения и простираня линеаментов, а также их длин и величины раскрытия. Полученные количественные значения являются основой для расчётного определения неоднородности водопроявляющих свойств горных пород с применением метода вычисления тензора трещинной проницаемости [33, 92].

Для визуализации данных о распределении трещиноватости в пространстве на основе результатов исследований данных выбраны следующие графические представления:

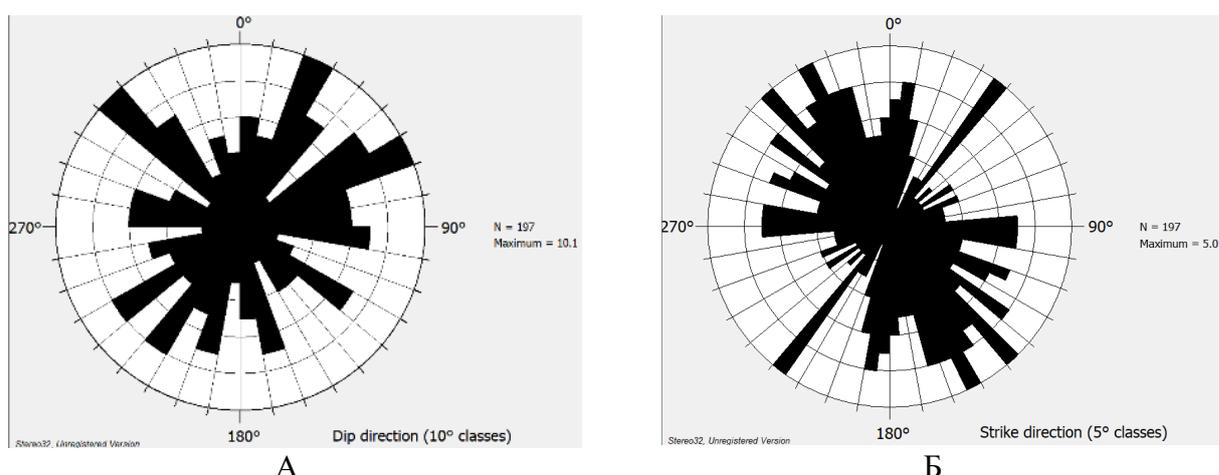
- диаграмма плотности трещинной сети (по падению), круговая точечная диаграмма трещиноватости (по падению) – рис. 2.19;
- розы-диаграммы трещиноватости по падению и простиранию – рис. 2.20.

Построение диаграмм производится с помощью программы Stereo32beta, также находящейся в открытом доступе.



N и N total – общее количество трещин, n – количество трещин каждого класса, согласно величине раскрытия; Maximum density - максимальной плотности, Minimum density - минимальная плотность, Mean density - средняя плотность, Density calculation (метод вычисления плотности) = Cosine sums (суммы косинусов).

Рисунок 2.19 – Пример графического представления данных о распределении трещиноватости в форматах диаграммы плотности трещиноватости по падению трещин (А), круговой точечной диаграммы по падению трещин (Б)



N – общее количество трещин, Maximum – максимальное количество трещин в одной группе.

Рисунок 2.20 – Пример графического представления данных о распределении трещиноватости в форматах роз-диаграмм по падению (А) и простиранию (Б)

Круговые точечные диаграммы (рис. 2.19 А) и диаграммы плотности трещинной сети (рис. 2.19 Б) отражают проекции полюсов трещин на нижнюю полусферу. Круг произвольного радиуса разбивается радиусами и концентрическими окружностями, проводимыми через равные градусные интервалы 10°. Радиусы являются проекциями меридианов, а концентрические окружности аналогичны параллелям с той разницей, что в данном случае они проводятся произвольно через равные отрезки (при радиусе сетки 9 см и градусном расстоянии между делениями 10° - через 1 см). Внешняя окружность сетки градуирована от 0°

до 360° . По этой шкале отложены азимуты падения плоскостей. Углы падения отсчитываются по концентрическим окружностям от центра к периферии (от 0° до 90°). Получаемые точки представляют собой полюса плоскостей в проекции нижней полусферы (Lower hemisphere). Таким образом, горизонтальная плоскость проектируется в виде точки, совпадающей с центром диаграммы, вертикальная – в виде точки, лежащей на окружности (каждой вертикальной плоскости соответствует единственная точка, которую можно сопоставить с любой из двух диаметрально противоположных точек внешней окружности) [115]. На горизонтальной поверхности отображаются проекции точек пересечения со сферой перпендикуляров, восстановленных от плоскости трещины до пересечения со сферой. На представленных круговых точечных диаграммах в данном диссертационном исследовании точки промаркированы цветом согласно величинам раскрытия трещин. Диаграмма плотности трещинной сети (рис. 2.19 А) – стереограмма, показывающая результат статистической обработки кучности структурных полюсов с помощью изолиний одинаковой плотности полюсов на единицу площади палетки (окна осреднения). Для круговых точечных диаграмм приняты равноугольные проекции (Equal angle projection), позволяющие передавать углы без искажений и сохранять в каждой точке постоянный масштаб. С целью сохранения единого масштаба площадей приняты равновеликие проекции полюсов (Equal area projection). Исходя из принципов построений диаграмм данного типа, в случае проецирования на верхнюю полусферу, алгоритм пространственного чтения диаграмм трещиноватости сводится к ориентированию по окружности (круговая шкала от 0° до 0° (360°)) на изображениях – таким образом читается азимут, отсчёт от центра окружности стереограммы к периферии – для выявления значения угла падения. При этом центральная отметка окружности равна 0° , а отметка на периферии диаграмм соответствует 90° . На диаграммах плотности трещинной сети по каждому интервалу цветом отмечена плотность трещин от минимума (синий цвет) до максимума (красный цвет), также присутствует информация о количестве трещин (N), максимальной плотности (Maximum density), минимальной плотности (Minimum density), средней площади (Mean density), метод вычисления плотности (Density calculation). Последний в нашем случае всегда «суммы косинусов» (Cosine sums).

Розы-диаграммы (рис. 2.20 А и Б) представляют собой один из наиболее популярных методов графической визуализации результатов замеров залегания трещин. В процессе подготовки розы-диаграммы результаты полевых замеров трещин, выполненных на породных обнажениях, должны быть сгруппированы по интервалам. На рис. 2.20 (А и Б) сгруппированы трещины, азимуты падения (dip) или простирания (strike) которых находятся в пределах одного обследованного интервала. Для каждой группы определяется среднее значение азимута падения или простирания, а полученные значения отображаются на сетке розы-

диаграммы в виде лучей. Направление лучей соответствует среднему значению азимута, при том, что длина луча пропорциональна числу выполненных замеров трещин в выделенной группе. Существенным недостатком роз-диаграмм является невозможность изображения на одной диаграмме результатов нескольких замеров, а также невозможно отобразить одновременно азимут и угол падения.

2.4 Испытания разработанного каротажного программно-аппаратного комплекса

Испытания разработанного каротажного комплекса производились в лаборатории кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля Горного института НИТУ МИСИС, а также в скважине геофизического полигона МГУ им. М.В. Ломоносова.

Для лабораторных испытаний был изготовлен макет водонаполненной скважины с имитацией трещиноватых зон в скальном массиве. Макет скважины представляет собой вертикально установленную на квадратной металлической опоре алюминиевую трубу (диаметр 100 мм, высота 2000 мм). Нижняя часть трубы соединена с опорой, болтовым соединением и герметизирована резиновой прокладкой. Для проведения исследований макет скважины был заполнен водопроводной водой в объеме 3,5 литра. В воду был добавлен краситель для имитации примесей/взвесей, ухудшающих качество изображения с видеокамер. Выбор конструкции макета (рис. 2.21) был сделан исходя из следующих потребностей:

- имитация участка ствола вертикальной разведочной скважины, заполненный водой;
- возможность полного погружения зонда в водную среду и оценки его герметичности;
- имитация водопроводящих трещин различного пространственного положения и текстур горных пород;
- определение настроек изображения камер зонда, в целях получения наиболее качественного изображения стенки скважины с трещинами и текстурами горных пород в водной среде с наличием взвеси;
- отработка технического решения по определению глубины погружения зонда с использованием датчика, вращаемого геофизическим кабелем;
- отладка программных модулей и элементов управления зондом;

Общий вид макета разведочной скважины и комплекта скважинного оборудования в ходе проведения исследований представлен на рис. 2.22.

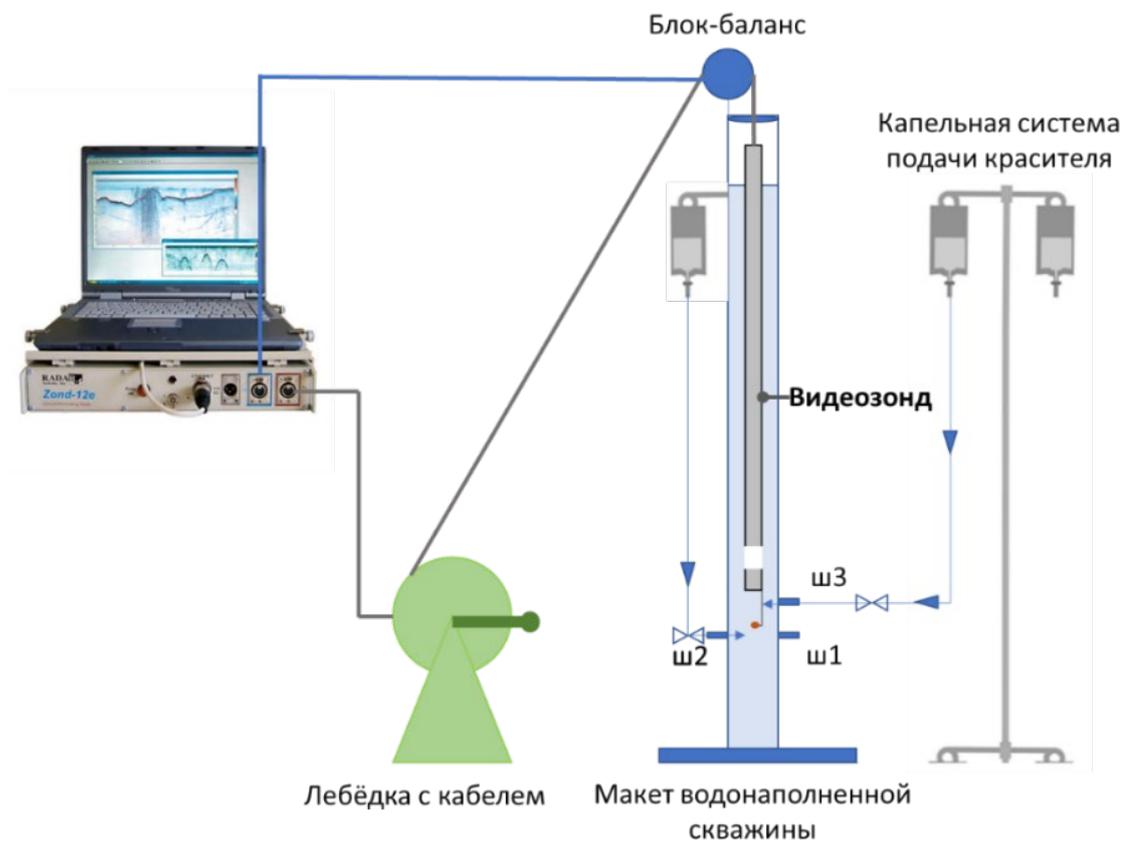


Рисунок 2.21 – Макет разведочной скважины



Рисунок 2.22 – Общий вид макета разведочной скважины с комплектом исследовательского оборудования

На рис. 2.23 видно, что разрешения камер и уровень яркости подсветки являются достаточными для фиксации и выявления на стенках скважины трещин – отчётливо видны засечки, нанесенные на стенки макета скважины, имитирующие структурные особенности горных пород в необсаженном участке скважины.

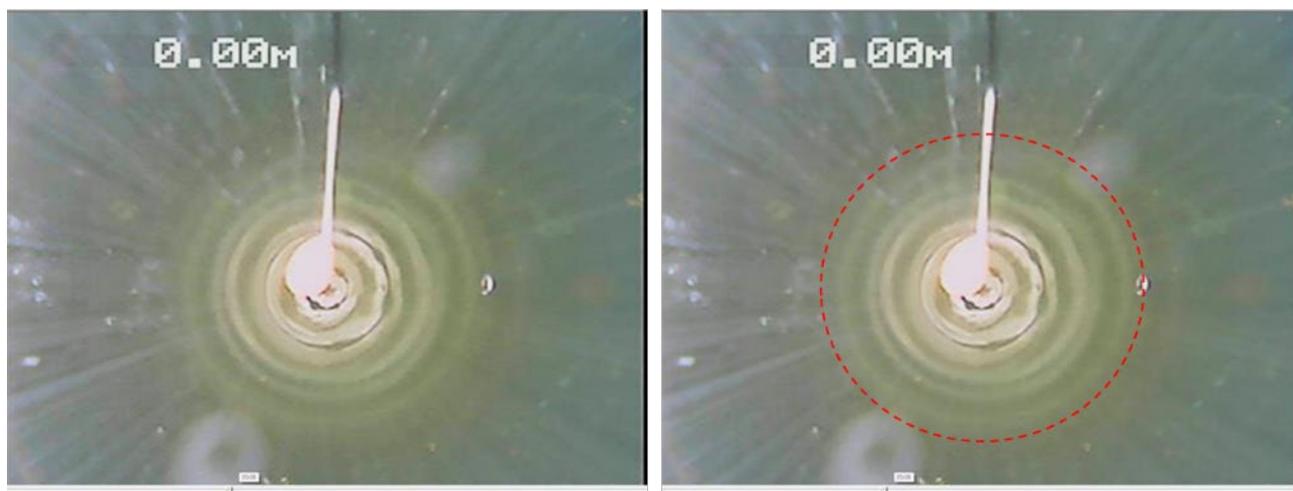


Рисунок 2.23 – Качество изображения фронтальной камеры на границе перехода из прозрачной в замутнённую водную среду

В ходе лабораторных испытаний была проверена работоспособность каротажного комплекса. В полевых условиях были отработаны базовые принципы работы с данным оборудованием, в т.ч. сбор и первичная обработка информации, поступающей от основных рабочих элементов зонда – фронтальной и боковых камер. Необходимость натурных (полевых) испытаний обусловлена тем, что в лабораторных условиях зачастую невозможно смоделировать реальные условия такие как: давление жидкости на различных глубинах, вариативность возможных неоднородностей в массиве, а также факторы, препятствующие проведению исследований. Соответственно, ряд принципиальных аспектов может быть упущен, а получаемые в реальных условиях данные могут быть недостоверны.

В ходе полевых испытаний был отработан алгоритм действий, выполняемых при обследовании скважин с помощью разработанного оборудования (табл. 2.1). По итогам проведения полевых испытаний был сформирован перечень необходимых условий для проведения видеокаротажных исследований, включающий в себя требования по подготовке скважин. В состав работ по подготовке скважины для видеообследований должны быть включены следующие мероприятия:

а. Замер уровня воды в скважине /восстановление пропускной способности на интересующих глубинных интервалах:

- скважина должна быть прошаблонирована до забоя;

- до проведения исследований скважина должна быть промыта чистой водой в объеме не менее 2-3 объема ствола скважины;
- промывка скважины выполняется не менее чем за неделю до проведения исследований
 - в целях осаждения нерастворимых взвесей в воде, препятствующих получению качественных изображений стенок скважины;
- сечение ствола скважины должно быть не менее 60 мм в самой узкой его части.

б. Подготовка оголовка скважины – он должен быть очищен от травы, грязи, высота оголовка должна быть не менее 300 мм от уровня земли.

в. Для получения достоверной информации об исследуемых интервалах должна быть подготовлена первичная информация по скважинам, в частности: геолого-геофизические разрезы по скважинам, включая данные ГИС.

г. При проведении исследований в скважинах должно быть в наличии следующее оборудование:

- аккумулятор 12В / генератор 220В;
- набор инструментов: гаечные ключи, набор отверток, разводной ключ, изоляционная лента/термоизоляция.



Рисунок 2.24 – Испытания каротажного комплекса в полевых условиях на полигоне Геофизического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Таблица 2.1 – Алгоритм выполнения исследований в скважине с применением разработанного каротажного комплекса

№	Операция	Элемент зонда	Необходимые действия оператора	Комментарий
1	Спуск зонда без красителя	Фронтальная камера, счетчик глубины	Контроль погружения зонда на заданную глубинную отметку	Данные о расположении интересующего глубинного интервала
2	Фиксация трещины	Фронтальная камера, счетчик глубины, датчик температуры	Начало видеозаписи. Выявление трещины, запись панорамного видеоизображения с данными компаса и значением глубины	При достижении глубинной отметки интересующего интервала требуется замедление скорости спуска зонда.
3	Фиксация формы трещины, а также угла падения	Боковая камера, компас, счетчик глубины	Запись панорамного обзора в отдельном видеофайле. Фиксация верхней точки пересечения скважиной трещины	Определение направления падения трещины, предварительная оценка угла падения / сверка с первичными геологическими данными по скважине
4	Фиксация простирания трещины	Фронтальная камера, счетчик глубины, компас	Контроль погружения на следующий уровень интервала (+0,1 м)	Повторение операции с заданным шагом до нижней отметки вскрытой скважиной трещины
5	Фиксация формы трещины, а также ее простирания	Боковая камера, компас, счетчик глубины	Запись панорамного обзора в отдельном видеофайле	Определение простирания трещины по азимуту простирания / сверка с первичными геологическими данными по скважине
6	Подъем	Счетчик глубины	Контроль подъема зонда	Перед подъемом зонда должна быть приостановлена запись видеофайла и его сохранение. Перед подъемом зонда необходимо убедиться в сохранности файла и приемлемости материала для преследующей обработки

Выводы

С учётом определённого по итогам обзора литературных источников перечня количественных параметров трещинной сети, влияющих на водопрводящие свойства скального массива (пространственное положение трещин - азимуты падения и простираия, угол падения, геометрические характеристики трещин – раскрытие, интенсивность трещиноватости), а также в виду отсутствия доступного каротажного оборудования, позволяющего получать необходимые параметры, в рамках диссертационного исследования был разработан каротажный программно-аппаратный комплекс.

По итогам серии лабораторных и полевых испытаний подтверждено, что аппаратные возможности каротажного комплекса позволяют производить фиксацию трещин на стенках скважин в виде панорамных 360⁰ изображений с пространственной координатной привязкой. Программные модули позволяют производить количественную характеристику геометрических параметров трещин, а также определять их пространственное положение относительно сторон света. Функционал каротажного программно-аппаратного комплекса обеспечивает получение необходимых количественных параметров трещинной сети для выполнения расчётных оценок неоднородности водопрводящих характеристик трещиноватых участков горных пород в скважинах.

В полевых условиях была доказана работоспособность оборудования в глубоких водонаполненных скважинах, отработаны базовые принципы выполнения исследований в скважинах с применением разработанного оборудования, включая подготовку к работам, сбор и первичную обработку информации. Разработан алгоритм выполнения исследований в скважине, а также сформирован перечень необходимых условий для проведения видеокаротажных исследований, включающий в себя требования по подготовке скважин.

Разработанный каротажный программно-аппаратный комплекс, а также подготовленные в ходе серии лабораторных и полевых испытаний методические подходы позволили выполнить полевые исследования параметров трещин в незакрепленных частях сети скважин участка потенциального размещения ПГЗРО - Енисейский.

Глава 3. Проведение исследований параметров сети трещин на участке планируемого создания ПГЗРО

3.1 Общие сведения об участке проведения исследований

Участок Енисейский расположен в Сибирском федеральном округе Российской Федерации, в Красноярском крае, на правом берегу Енисея, в пределах Закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) г. Железногорска. Участок недр имеет размеры 20,26 км² (2026 га), расположен в 76 км от краевого центра и находится в пределах номенклатурного листа О-46-XXXIV [137]. Обзорная схема района работ приведена на рис. 3.1.



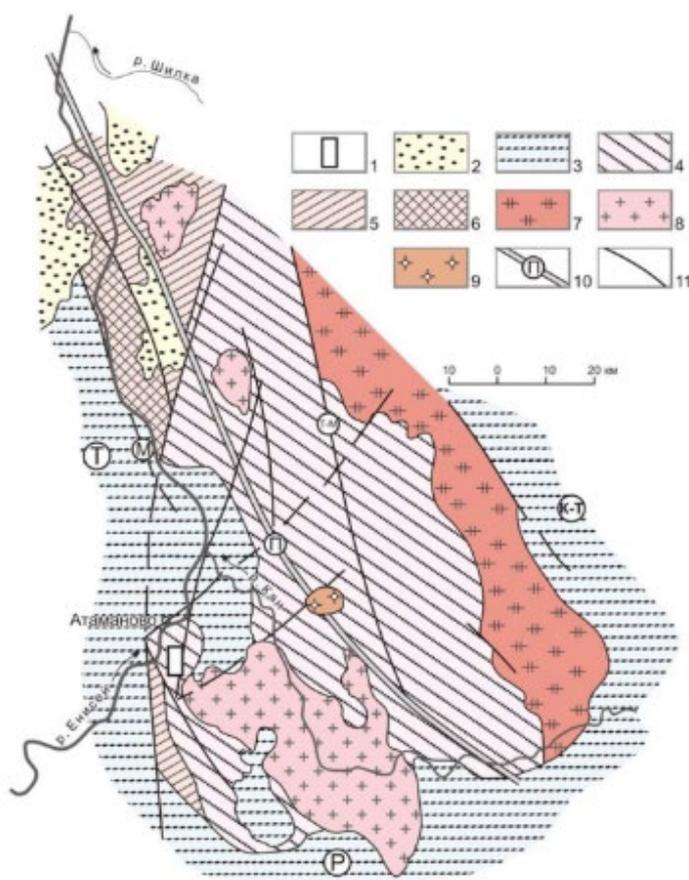
Рисунок 3.1 – Обзорная карта района проведения исследований

В период 2009-2016 на участке Енисейский были проведены работы в рамках поисковой и оценочной стадии геологоразведочных работ. В соответствии с решением Комиссии ГКЗ Роснедра (протокол заседания №4523-пс от 03.02.2016) было подтверждено, что по своим геологическим, гидрогеологическим, тектоническим и сейсмическим условиям участок Енисейский является потенциально пригодным для глубинного захоронения РАО в архейских гнейсах на целевом интервале глубин 450-525 м, абсолютные отметки +5 – -70 м по Балтийской системе высот (БСВ). В соответствии с утверждённой Стратегией [116] в ближайшее время на участке Енисейский планируется создание подземной исследовательской

лаборатории (ПИЛ), как неотъемлемого этапа проекта создания пункта глубинного захоронения РАО [117]. ПИЛ предназначена для проведения долговременных исследований и экспериментов, направленных на изучение природных и техногенных факторов, значимых для долговременной безопасности захоронения РАО в массиве горных пород на участке Енисейский. По итогам данных исследований, выполняемых в процессе строительства и эксплуатации ПИЛ, в число которых входит оценка изоляционных свойств массива скальных горных пород, будут приниматься решения о создании первой очереди ПГЗРО [1, 3, 78, 140].

3.2 Геологическая характеристика участка проведения исследований

Район расположения участка Енисейский приурочен к области сочленения крупных региональных тектонических структур – складчатого сооружения Енисейского кряжа и эпигерцинской Западно-Сибирской плиты. В северо-восточном направлении Енисейский кряж сочленяется с древней Сибирской платформой. На юго-западе структуры кряжа и Западно-Сибирской плиты контактируют с Восточно-Саянской частью Салаирско-Каледонской Алтае-Саянской складчатой области (АССО). На структуры Енисейского кряжа, Сибирской платформы и АССО наложены палеозойские, мезозойские и кайнозойские прогибы (рис. 3.2) [137].



1 – контур участка Енисейский; 2 – кайнозойские осадочные отложения кирнаевской и бельской свит; 3 – осадочные образования структур обрамления Енисейского кряжа: Тегульдетской впадины Западно-Сибирской плиты (Т), Канско-Тасеевской впадины Сибирской платформы (К-Т) и Рыбинской впадины (Р); 4-6 – метаморфические образования докембрийского фундамента: 4 – гнейсы и кристаллосланцы канского метаморфического комплекса архея; 5 – гнейсы, сланцы, амфиболиты, с прослоями мраморов Енисейского метаморфического комплекса раннего протерозоя, 6 – раннепротерозойские метавулканы юкеевской серии; 7 – раннепротерозойские граниты Таракского комплекса; 8 – рифейские граниты Посольненского и Нижнеканского комплексов; 9 – палеозойские щелочные сиениты порожнинского комплекса; 10-11 – разрывные нарушения: 10 – шовная часть Приенисейского глубинного разлома (П), 11 – прочие разломы: Муратовский надвиг (М) и Телькун-Мурминский разлом (Т-М)

Рисунок 3.2 – Геолого-структурное положение Енисейского участка

Сооружение Енисейского кряжа состоит из двух главных элементов – Ангаро-Канского выступа нижнего докембрия на юге и байкальского складчатого сооружения – мегантиклинория Енисейского кряжа на севере. Их разделяет субширотная зона Нижнеангарского глубинного разлома. Площадка строительства ПИЛ располагается в южной части Енисейского кряжа, сложенной образованиями разновозрастных метаморфических комплексов Ангаро-Канского выступа, метаморфизованных в условиях гранулитовой и амфиболитовой фаций регионального метаморфизма, – раннеархейского канского, позднеархейского енисейского, раннепротерозойского юкеевского. Метакомплексы прорваны интрузивными телами архейского, раннепротерозойского, позднерифейского и вендского возрастов. Наиболее крупные тела образуют именованные массивы интрузивных пород: Таракский, Белогорский, Нижнеканский (см. рис. 3.2). В геологическом строении района принимают участие архейские метаморфические образования, стратифицированные юрские обломочные и углистые отложения, образования кор выветривания, рыхлые четвертичные отложения, интрузивные и ультраметаморфические образования, разрывные нарушения и связанные с ними продукты дислокационного метаморфизма [118, 119]. Участок строительства ПИЛ сложен первично осадочными, вулканогенно-осадочными архейскими образованиями, метаморфизованными в условиях гранулитовой [120] или высоких ступеней амфиболитовой [121, 122] фаций регионального метаморфизма. Они представлены плагиогнейсами, гнейсами, содержащими прослой и пачки кордиеритсодержащих кристаллических сланцев. В пределах участка развиты интрузивные образования, прорывающие толщу метаморфических пород, представленные раннепротерозойскими ортоамфиболитами ярлычихинского и гранито-гнейсами таракского комплексов, позднерифейскими дайками метадолеритов и трахидолеритов. Все породы пронизаны гидротермальными кварцевыми, карбонат-кварцевыми и карбонатными прожилками [137].

Дизъюнктивные структуры представлены зонами дробления, милонитизации, тектоническими брекчиями и разрывами без смещения – трещинами, зонами повышенной трещиноватости, выщелачивания и проницаемости. Данные структуры являются широко распространенными элементами геологического строения участка строительства ПИЛ, выделяясь по данным геологической документации керна и ГИС [137]. Трещины развиты во всех скальных породах. Среди трещин развиты открытые трещинные структуры, которые преобладают среди трещин полого залегания. Морфология всех выделенных по итогам анализа кернового материала систем трещин свидетельствует об их тектоническом происхождении и принадлежности к кинематическому типу трещин скалывания. Все они характеризуются прямолинейной или слабо извилистой формой, развитием зеркал, штрихов и борозд скольжения, глинки трения, пересекают гнейсы и прорывающие их дайковые тела [137].

3.3 Гидрогеологические условия участка проведения работ

В части обводнённости, распространения и движения подземных вод для района проведения исследований характерны следующие гидрогеологические подразделения [123 – 125]:

- водонасыщенная зона рыхлых четвертичных элювиально-делювиальных отложений;
- зона экзогенной трещиноватости с трещинно-грунтовыми водами;
- слабопроницаемая толща скальных горных пород с трещинно-жилльными водами.

Трещинно-грунтовые воды зоны экзогенной трещиноватости архейских пород напорно-безнапорные. В зависимости от рельефа поверхности отметка уровней грунтовых вод колеблется в диапазоне 10 – 150 м. Питание зоны экзогенной трещиноватости осуществляется за счет атмосферных осадков и последующего перетока вод из зоны четвертичных отложений. Разгрузка подземных вод осуществляется в долины рек и ручьев, расположенных в районе участка, а также во временные водотоки. Подземные воды слабопроницаемой толщи скальных горных пород образуют вытянутые водоносные участки, которые за пределами участка строительства ПИЛ могут проследиваться на значительные глубины и расстояния. Питание слабопроницаемой толщи скальных горных пород происходит за счет перетоков подземных вод из зоны экзогенной трещиноватости. Гидроизогипсы, представленные на гидрогеологической карте (рис. 3.3) получены на основе результатов обработки данных гидрогеологических наблюдений, выполняющихся в районе участка строительства ПИЛ на протяжении нескольких лет. Представленные гидроизогипсы соответствуют уровням подземных вод, замеренным в сети разведочных, выполняющих в т.ч. роль наблюдательных, скважин в период низкой водности рек и ручьёв. В силу природно-климатических

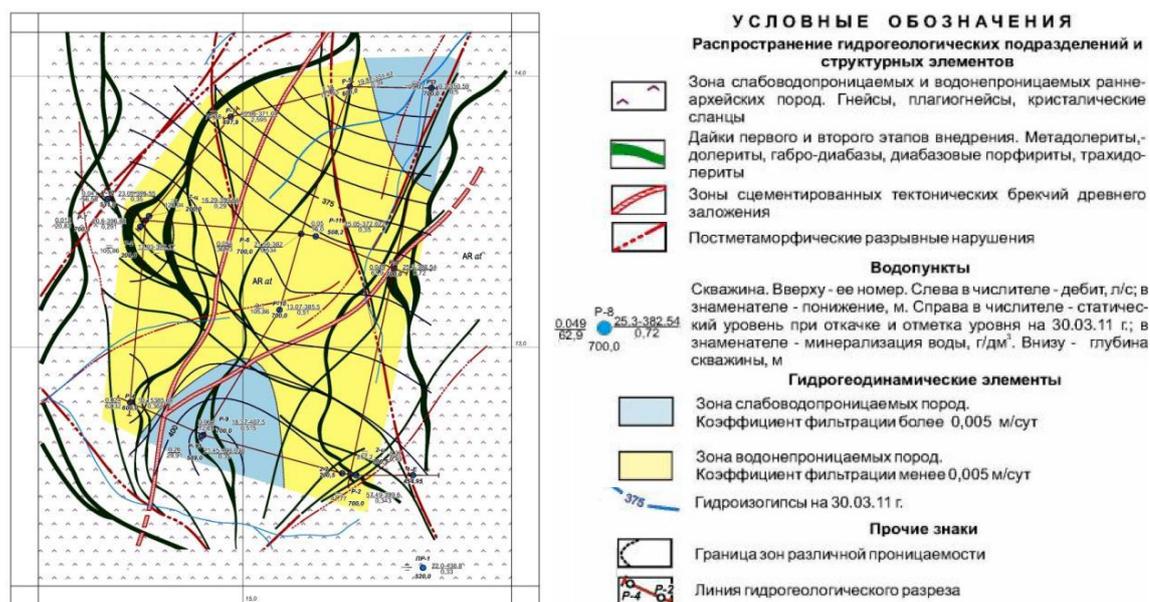


Рисунок 3.3 – Схематическая гидрогеологическая карта участка «Енисейский». Масштаб 1:5 000 [123]

условий участка данный период характерен для летне-осеннего и зимнего сезонов. Гидроизогипсы согласуются с имеющимися на данный момент представлениями о структурном строении участка в части положения дизъюнктивных нарушений, включая дайковые тела и предполагаемые зоны разрывных нарушений.

По результатам ОФР на этапе проходки скважин установлено, что для массива скальных горных пород на глубинах расположения комплекса подземных сооружений, а также в смежных с ними глубинах разреза, характерны сверхмалые значения проницаемости. Установленные для толщи скальных горных пород значения проницаемости крайне слабо коррелируют с значениями Mmp , определёнными по керновому материалу [137]. Возможной причиной может быть то, что проницаемость была определена для достаточно протяжённых (50 м) интервалов, в которые были включены участки без учёта различий степени их трещиноватости и оценки потенциала задействования трещин в водообменных процессах [137]. Отсутствие корреляции между параметрами трещиноватости и проницаемостью горных пород участка, сложность геологического разреза (рис. 3.4) формируют ряд неопределённостей в части выделения интервалов для гидрогеологического мониторинга в скважинах, оценок неравномерности водопродвижающих характеристик горных пород и возможных направлений движения подземных вод. Исходя из потребности в минимизации данных неопределённостей и приоритета поиска решений по получению реалистичных характеристик водопродвижающих свойств горных пород участка Енисейский, в т. ч. на глубинах расположения комплекса подземных сооружений, определена целесообразность задействования имеющейся на участке сети скважин [4].

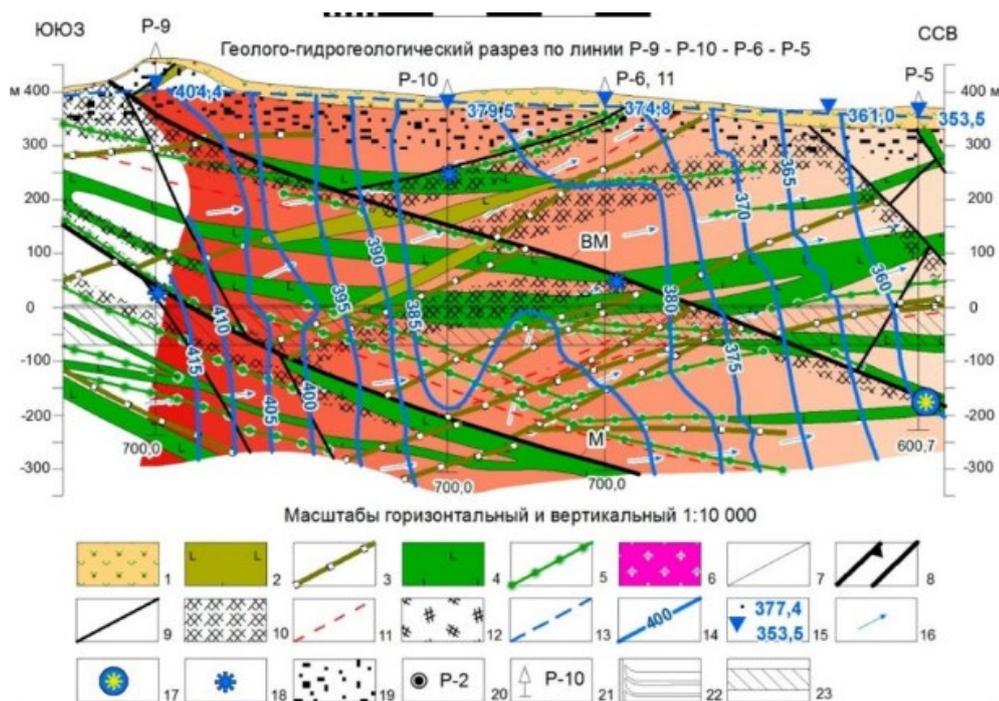


Рисунок 3.4 – Особенности гидрогеологических условий участка «Енисейский» [137]

3.4 Проведение работ по обследованию стволов разведочных скважин

Видеокоротажные исследования выполнялись с применением разработанного коротажного комплекса, в состав которого были включены: скважинный зонд, зарядное устройство, блок управления, блок-баланс, кабель, электрическая лебедка. Для подбора оптимальных настроек зонда при подготовке к обследованиям, а также определения пригодных для проведения исследований интервалов глубин (открытые участки стволов, без обсадных труб) учитывались актуальные конструктивные исполнения скважин. При подготовке к исследованиям в сети скважин был составлен перечень глубинных интервалов, на которых по итогам анализа кернового материала были зафиксированы участки повышенной трещиноватости, в т.ч. приуроченные к зонам контактов различных пород, дизъюнктивных нарушений. Пример геологической колонки в масштабе 1:500 представлен на рис. 3.5. В качестве исходных данных были задействованы материалы отчётов по итогам геологоразведочных работ поисковой (2003—2010 гг.) и оценочной (2010—2014 гг.) стадий [123 – 125].

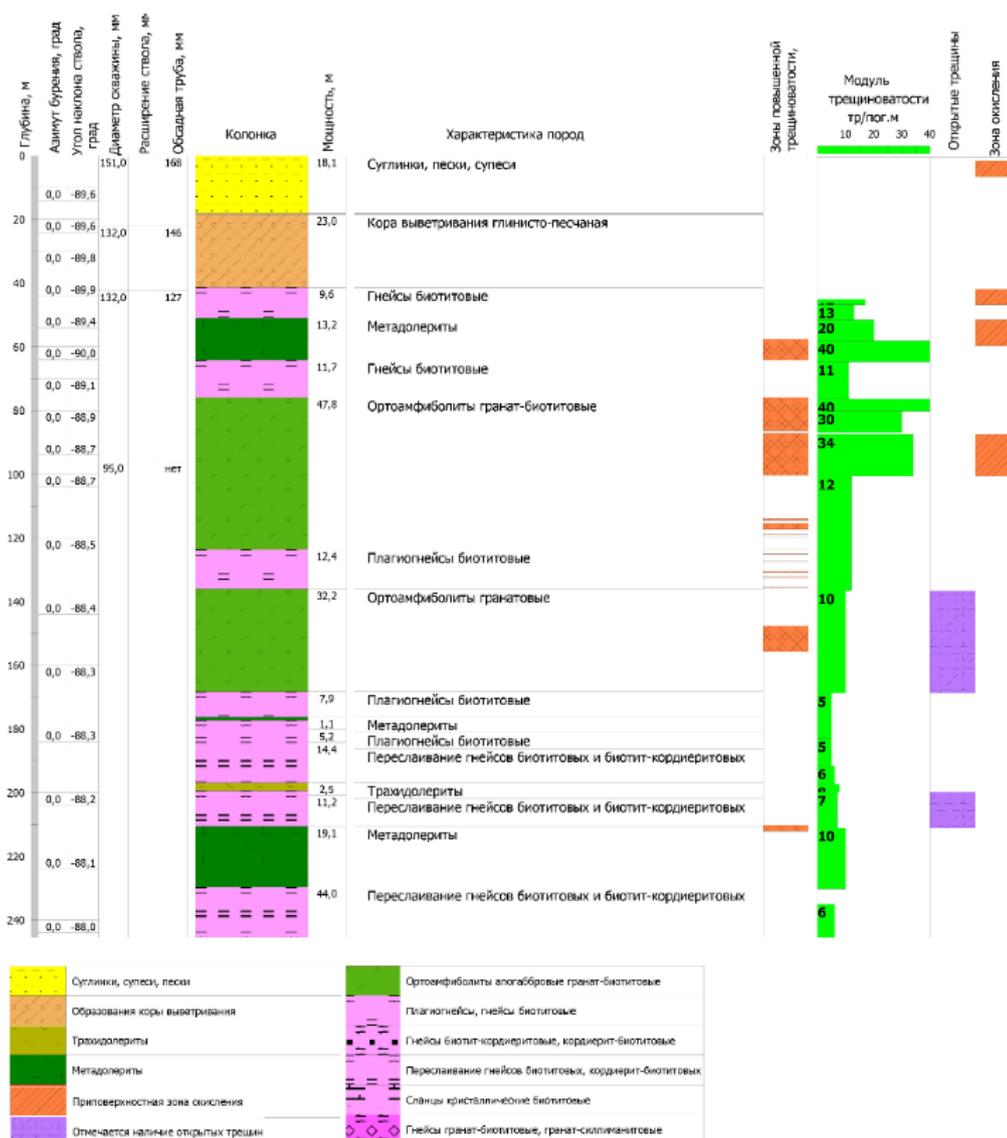


Рисунок 3.5 – Фрагмент геологической колонки скважины Р-1 (участок Енисейский)

Так как бурение скважин на участке Енисейский производилось без ориентирования керна в пространстве, остаются нерешёнными вопросы о действительном пространственном положении тектонических нарушений и систем трещиноватости [108]. В ходе полевых исследований перечень интервалов дополнялся в оперативном режиме при просмотре информации, получаемой с камер исследовательского зонда. Особый интерес вызывали участки с залеченными и открытыми трещинами, не отраженными в геологической документации. Данные участки также вносились в перечень итоговых материалов скважинных исследований.

Общий вид участка работ на площадках возле скважин и процесс выполнения обследования представлен на рис. 3.6. В процессе обследования стенок скважины объектив фронтальной камеры зонда направлялся вдоль оси скважины. При таком положении на экране отображались все стенки скважины на глубину зоны резкости оптической системы видеокамеры. Изображение выводилось на экран ПК, производилась видеозапись при погружении зонда со скоростью, не превышающей 0,5 м/сек. Боковая камера активировалась на локальных участках массива, выделяемых как в ходе подготовительных работ, так и по результатам оперативного анализа информации с фронтальной камеры. Формирование изображения стенок скважины при таком обследовании осуществлялось путем перемещения зонда вдоль оси скважины, при этом сканирование производилось боковой камерой в радиальном направлении.

Применение методических подходов, наработанных в ходе испытаний разработанного каротажного комплекса, позволило с точностью до нескольких сантиметров установить положение границ трещинных зон различного генезиса, получить информацию о пространственном положении трещин и их геометрических характеристиках [108].



Рисунок 3.6 – Полевые исследования на участке Енисейский

Существенное влияние на формирование первичных данных видеообследования оказали факторы, снижающие обзорность в водной среде (стволы скважин были заполнены

водой) – наличие взвесей и остатков бурового раствора в стволе скважины. Особую опасность при проведении видеообследования представляли участки с повышенным коэффициентом трещиноватости, склонные к вывалообразованию (рис. 3.7) а также участки с шероховатыми стенками ствола (рис. 3.8).



Рисунок 3.7 – Участок ствола скважины, склонный к вывалообразованию [108]



Рисунок 3.8 – Участок ствола скважины, проходящий через зону повышенной трещиноватости массива [108]

3.5 Определение показателей трещинного пространства массива

Всего в ходе полевых исследований с использованием каротажного программно-аппаратного комплекса, выполненных в период полевого сезона 2020 г на участке Енисейский было обследовано 6 скважин (1-Е, Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, Р-8). Схема расположения скважин, обследованных в указанный период, относительно границ площадки строительства ПИЛ приведена на рис. 3.9.

Скважина 1Е. Четвертичные отложения представлены маломощным слоем суглинков (60 см) и дресвой, а также щебнем гнейсов с суглинистым заполнителем (5,4 м). Далее, до глубинной отметки 60 м, залегает толща кордиерит-биотитовых гнейсов. До отметки 140 м от

земной поверхности идёт чередование мощных толщ (20-30 м мощностью) биотитовых плагиогнейсов и кордиерит-биотитовых гнейсов.

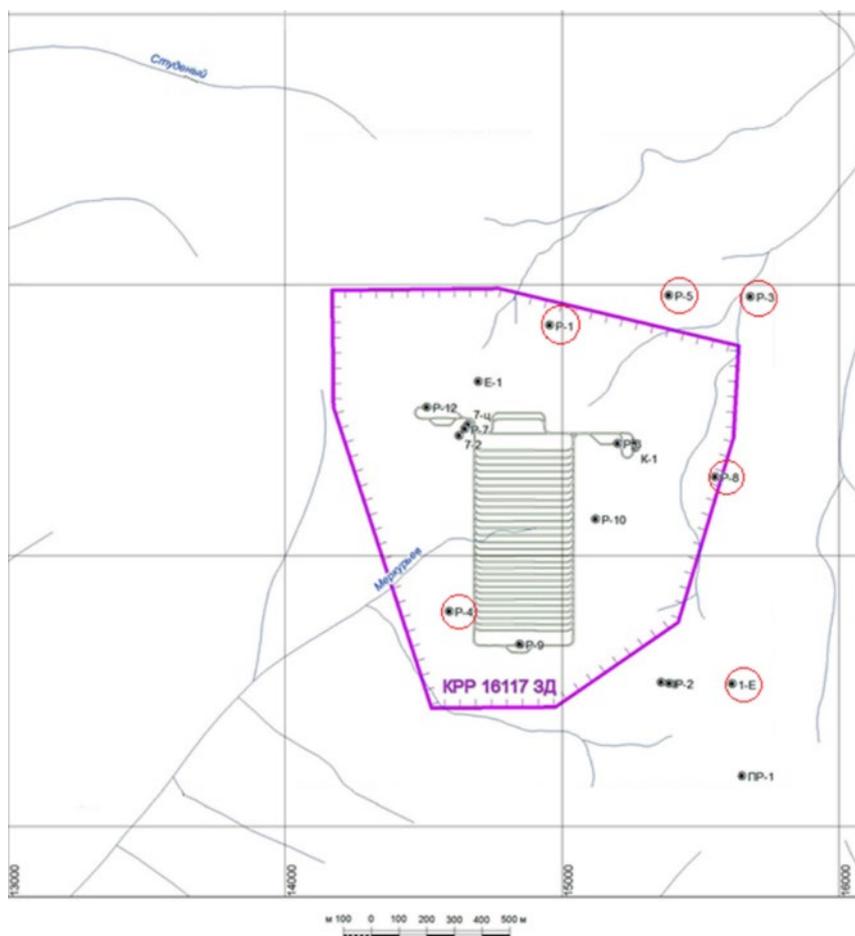


Рисунок 3.9 – Расположение обследованных скважин относительно границ участка строительства ПИЛ [108]

На протяжении всей протяженности ствола скважины Р-1 до данной глубинной отметки выделяются зоны повышенной трещиноватости. От 140 до 190 м происходит чередование маломощных (2-6 м) даек долеритов, толщ биотитовых плагиогнейсов и кордиерит-биотитовых гнейсов. На интервале от 190 до 310 м толщу пород прорывает мощная дайка метадолеритов. При этом, закономерно, что на контакте биотитовых плагиогнейсов и метадолеритов (183-190 м) отмечается зона дробления и интенсивной метасоматической переработки. От 310 до 560 м залегает массив биотитовых гнейсов, прорываемый дайками метадолеритов. Ниже, до забоя скважины задокументирована гнейсо-гранитная интрузия, прорываемая маломощными (3-6 м) дайками метадолеритов. С отметки 384 м, где на контакте биотитовых гнейсов и дайки метадолеритов была обнаружена зона интенсивной трещиноватости и прожилкования, в стенках скважины обнаружены каверны. Нарушенность массива пород наблюдается в местах контакта сред с различными физико-механическими свойствами. Однако в случае скважины 1-Е такую закономерность установить невозможно, поскольку на интервале наблюдения явный контакт двух

сред с различными свойствами наблюдается только в самом начале интервала наблюдения, а далее интервал наблюдения включает в себя толщу биотитовых плагиогнейсов.

Скважина Р-1. Четвертичные отложения представлены довольно мощным слоем (18,1 м) суглинков песков и супесей. Далее залегает слой коры выветривания, имеющий мощность 23 м. Далее, до отметки 75 м залегает массив биотитовых гнейсов, на глубинной отметке 50 м прорываемый дайкой метадолеритов мощностью 13,2 м. Ниже локализована толща гранат-биотитовых ортоамфиболитов мощностью 47,8 м. Согласно имеющимся данным уровень вод в скважине – 85 м от земной поверхности. Ниже толщи гранат-биотитовых ортоамфиболитов располагается маломощный (12,4 м) слой биотитовых плагиогнейсов, ниже которого снова фиксируется толща гранатовых ортоамфиболитов мощностью 32,2 м. Ниже отметки 167 м и до забоя располагается массив биотитовых плагиогнейсов, гнейсов биотитовых и биотит-кордиеритовых, прорываемый дайками метадолеритов и трахидолеритов, мощность которых не превышает 25 м. Наиболее значимые нарушения встречаются на интервале 122-130 м, что соответствует контактной зоне массива гранат-биотитовых ортоамфиболитов и биотитовых плагиогнейсов. Следующий, наиболее интенсивно нарушенный интервал располагается в пределах глубинных отметок 223-229 м, что отвечает дайке метадолеритов и её контакту с толщей переслаивания гнейсов биотитовых и кордиерит-биотитовых. Также встречаются и единичные открытые трещины с большой апертурой раскрытия - например, на отметках 248,7; 248,85; 283,15 м.

Скважина Р-3. Мощность четвертичных отложений в данной скважине сравнительно небольшая относительно других скважин участка, наряду со скважиной 1-Е. Четвертичные отложения, представленные слоем суглинков и глинистых песков мощностью 6,9 м. Далее пролегает маломощный (1,1 м) прослой песчано-дресвяной массы с обломками гнейсов. Ниже залегает толща биотитовых плагиогнейсов мощностью 73 м. На глубинной отметке 83 м биотитовые плагиогнейсы контактируют с ортоамфиболитами, мощность слоя которых достигает 34 м. Ниже, и до глубинной отметки 427 м, залегает толща плагиогнейсов и гнейсов биотитовых, прорываемая дайками метадолеритов и трахидолеритов, обладающими мощностью до 26,4 м. Начиная с глубинной отметки 427 м отмечается присутствие граната в биотитовых гнейсах. Толщу гранатосодержащих биотитовых гнейсов, мощностью 60,7 м на глубинной отметке 488 м сменяют биотитовые гнейсы, которые ниже прорывает дайка метадолеритов мощностью 9 м. Ниже, до глубинной отметки 534 м локализована толща кристаллических сланцев мощностью 34,3 м, которую прорывает дайка метадолеритов мощностью 34,6 м. На глубинной отметке 567 м отмечается контакт дайки метадолеритов и толщи биотитовых плагиогнейсов. Биотитовые плагиогнейсы залегают до самого забоя скважины, лишь на отметке 651 м переслаиваясь с

маломощным (2,5 м) слоем кристаллических кварцитовидных сланцев. По итогам исследований не было обнаружено длительных интервалов с сильно нарушенными породами. Наиболее значительные нарушения сплошности массива зафиксированы на интервале 117,35 м, что соответствует контакту ортоамфиболитов и биотитовых плагиогнейсов. Кроме того, отмечается крупная раскрытая трещина на глубинной отметке 163,15 м, что соответствует контактной зоне биотитовых плагиогнейсов и маломощной дайки метадолеритов. Также значительные открытые трещины наблюдаются на интервалах 189,45-189,5; 219,75; 226,65 м.

Скважина P-4. Мощность четвертичных отложений здесь невелика, и представлена слоем супесей и суглинков мощностью 2,4 м. Ниже располагается прослой песчано-дресвяной коры выветривания мощностью также 2,4 м. Ниже и до глубинной отметки 447 м залегает толща биотитовых плагиогнейсов, прорываемая дайками метадолеритов различной мощности. Наиболее мощная из даек занимает интервал 266,2 – 322 м. При видеообследовании скважины была установлен уровень вод в скважине – 16,35 м от земной поверхности. На отметке 447 м начинается переслаивание плагиогнейсов биотитовых и кордиеритсодержащих. Ближе к забою скважины учащаются мощные (до 20,9 м) дайки метадолеритов и трахидолеритов. В целом при обследовании скважины не было обнаружено значительных нарушений сплошности пород. Большинство трещин слабооткрыты или полностью минерализованы.

Скважина P-5. В данной скважине наблюдается наибольшая мощность четвертичных отложений среди всех изучаемых скважин. Супеси, суглинки, пески и глины слагают слой мощностью 31,3 м. Ниже залегает дресвяно-песчаная кора выветривания мощностью 10 м. При видеообследовании скважины была установлен уровень вод в скважине – 19,6 м от земной поверхности. Ниже коры выветривания фиксируется дайка метадолеритов мощностью 8,4 м. Ниже залегает прослой гранат-силиманитовых плагиогнейсов мощностью 5,9 м. Начиная с глубинной отметки 55 м и до 580 м наблюдается толща биотитовых плагиогнейсов, прорываемая дайками метадолеритов различной мощности, наиболее мощная из которых занимает интервал 236,1 – 280 м. Также на глубинной отметке 100 м зафиксирован прослой кристаллических сланцев мощностью 3,1 м. С отметки 580 м и до забоя скважины залегают силлиманит-кордиерит-биотитовые сланцы. В целом при обследовании скважины не было обнаружено значительных нарушений сплошности пород. Большинство трещин слабооткрыты или полностью минерализованы.

Скважина P-8. Четвертичные отложения представлены суглинками, песками и глыбами. Мощность четвертичных отложений составляет 18,8 м. Ниже фиксируется дайка метадолеритов мощностью 16,9 м. Ниже дайки метадолеритов, до глубинной отметки 164 м залегает толща биотитовых гнейсов, прорываемая двумя дайками метадолеритов, мощностью 15 м и 1,3 м на

глубинных отметках 55 м и 65 м, соответственно. На глубинной отметке 157 м фиксируются брекчии мощностью 2,1 м. Ниже толщи биотитовых гнейсов начинается переслаивание плагиогнейсов биотитовых и кордиерит-биотитовых до отметки 405 м. Причём данный массив прорывается пегматитовой жилой мощностью 1,4 м в районе глубинной отметки 328 м. На интервале 405 м – 538 м залегают биотитовые плагиогнейсы, прорываемые пегматитовой жилой мощностью 1 м в районе глубинной отметки 443 м. На интервале 538 м - 583 м толщу прорывает дайка метадолеритов и трахидолеритов. Ниже, до глубинной отметки 694,7 м залегают толщи биотитовых гнейсов, прорываемая жилой трахидолеритов мощностью 0,3 м на глубине 648 м. Замыкает геологическую колонку дайка метадолеритов. В ходе исследований в стволе скважины были обнаружены значительные нарушения сплошности во всех типах пород, слагающих геологический разрез по скважине.

Таблица 3.1 – Итоговый объём видеокаротажных обследований столов скважин 1-Е, Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, Р-8 [108]

№	Наименование	Значение	Ед.изм.
1	Общий метраж обследований (с учетом обсадных колонн)	3 254,60	пог.м
2	Общий метраж обследованных участков открытых стволов	2 173,45	пог.м
3	Выделено интервалов для первоочередного детального изучения	275,00	шт
4	Всего выделено интервалов для изучения	1 272,00	шт
5	Всего обследовано скважин	6	шт

В целом, исходя из данных видеообследования на доступных участках горных пород и в целевых интервалах глубин 400-500 м., массив можно охарактеризовать в большей своей части, как условно-монолитный (см. рис. 3.10 – 3.11). Тем не менее, исходя из данных обследования, в массиве на целевых интервалах глубин, в вышележащих породах и на глубинах более 500 распространены различные нарушения сплошности геологической среды, что подтверждает данные, представленные в геологических отчётах предшествующих периодов. В основном, это – системы трещин, включая единичные проявления, открытые и минерализованные [108]. Пример трещины, зафиксированной в ходе исследований представлен на рис. 3.13 . По итогам анализа данных обследований по всем скважинам определено, что большинство систем трещин имеют субгоризонтальную ориентировку по падению, а по простиранию выделяются СЗ, ССЗ и ССВ системы. Можно отметить практически полное отсутствие субмеридиональных систем. В целом при обследовании скважин не было обнаружено значительных нарушений сплошности пород. Большинство трещин имеют малое раскрытие или полностью минерализованы. Для графического представления данных о распределении трещиноватости по различным направлениям были

использованы следующие формы: диаграмма плотности трещинной сети (по падению), круговая точечная диаграмма трещиноватости (по падению), и розы-диаграммы трещиноватости по падению и простиранию. На рис. 3.14 – 3.19 представлены результаты определения показателей трещиноватости по каждой из скважин.



Рисунок 3.10 – Тонкие трещины в массиве. Скважина Р-1, глубина 479,85 м

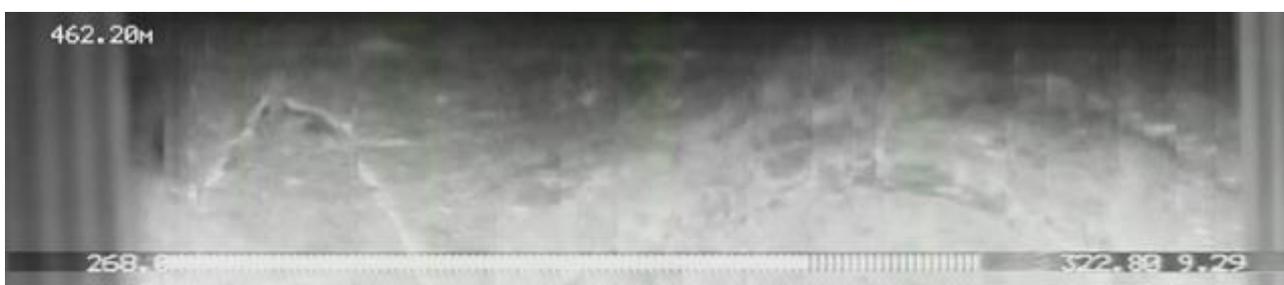


Рисунок 3.11 – Тонкие трещины в массиве. Скважина Р-4, глубина 462,20 м

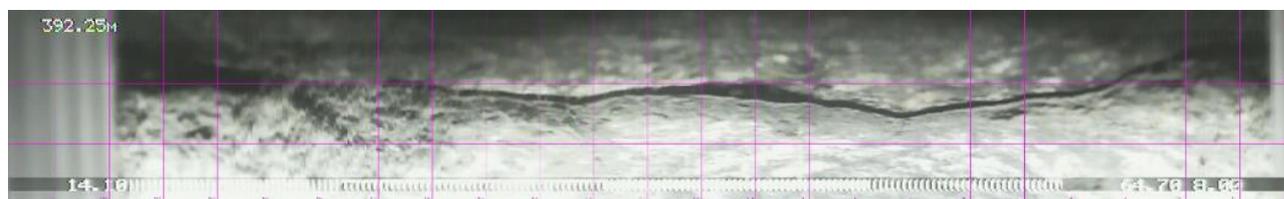
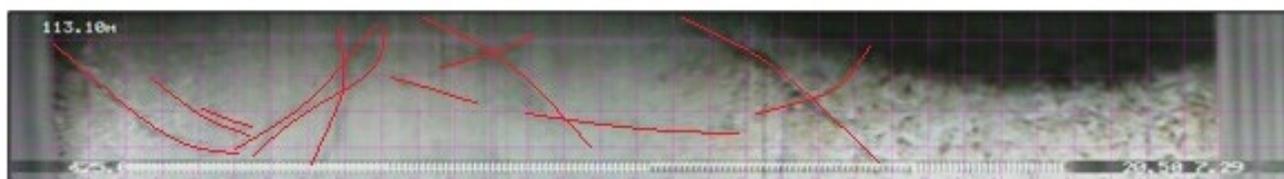
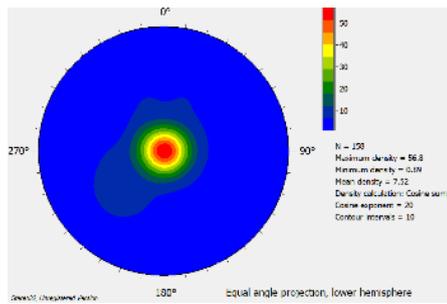


Рисунок 3.12 – Субгоризонтальная открытая трещина. Скважина Р-8, глубина 392,25 м

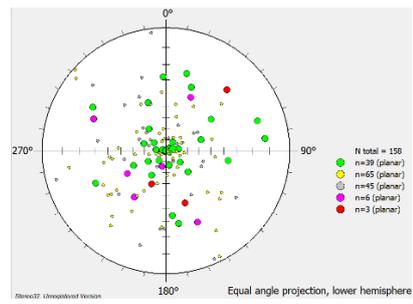


— Трещины на стенках ствола скважины □ Размерная сетка, шаг - 1 см

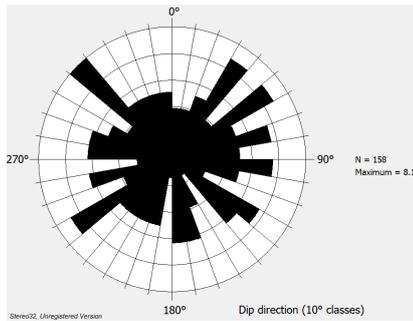
Рисунок 3.13 – Система трещин массива на глубине 113,10 м (скважина 1-Е) [108]



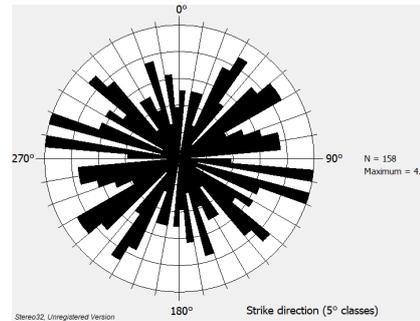
А



Б



В

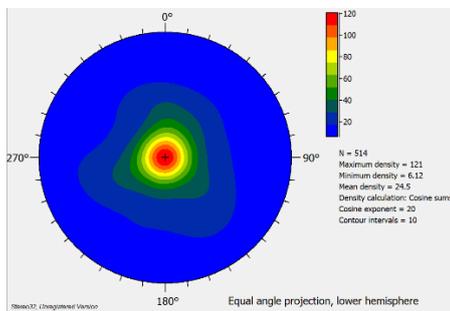


Г

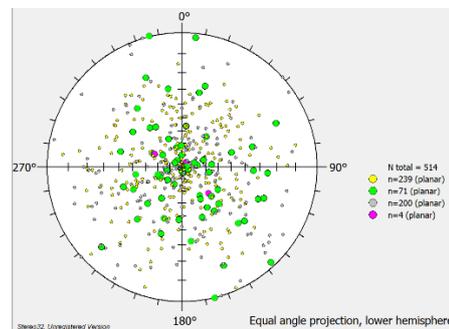
Раскрытие трещин:

- - 1 мм;
- - 2 мм;
- - 3 мм;
- - 4 мм;
- - 5 мм;

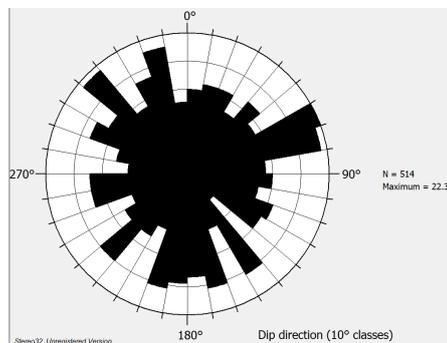
Рисунок 3.14 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины 1Е, интервал: 185,6-435,5 м по стволу скважины



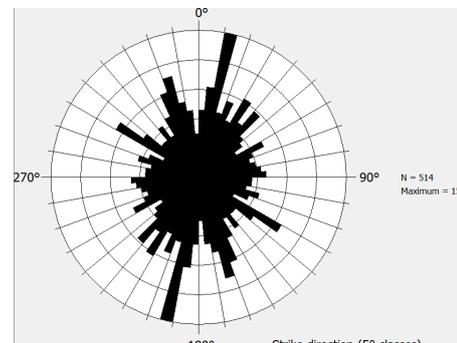
А



Б



В

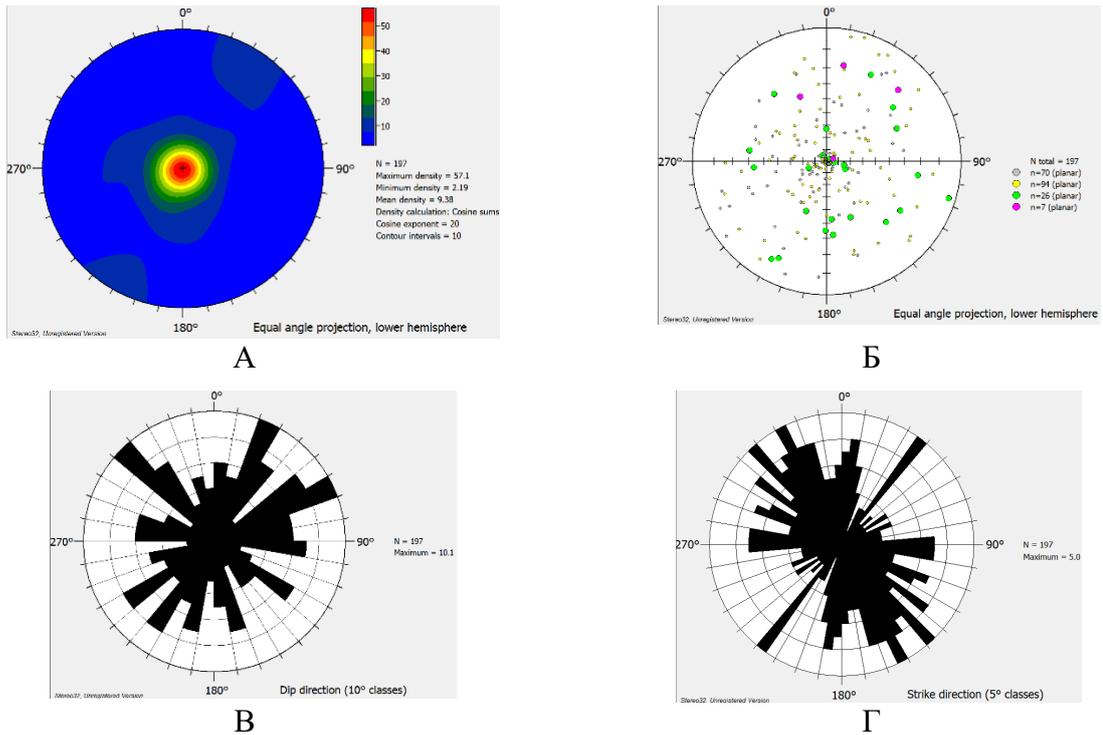


Г

Раскрытие трещин:

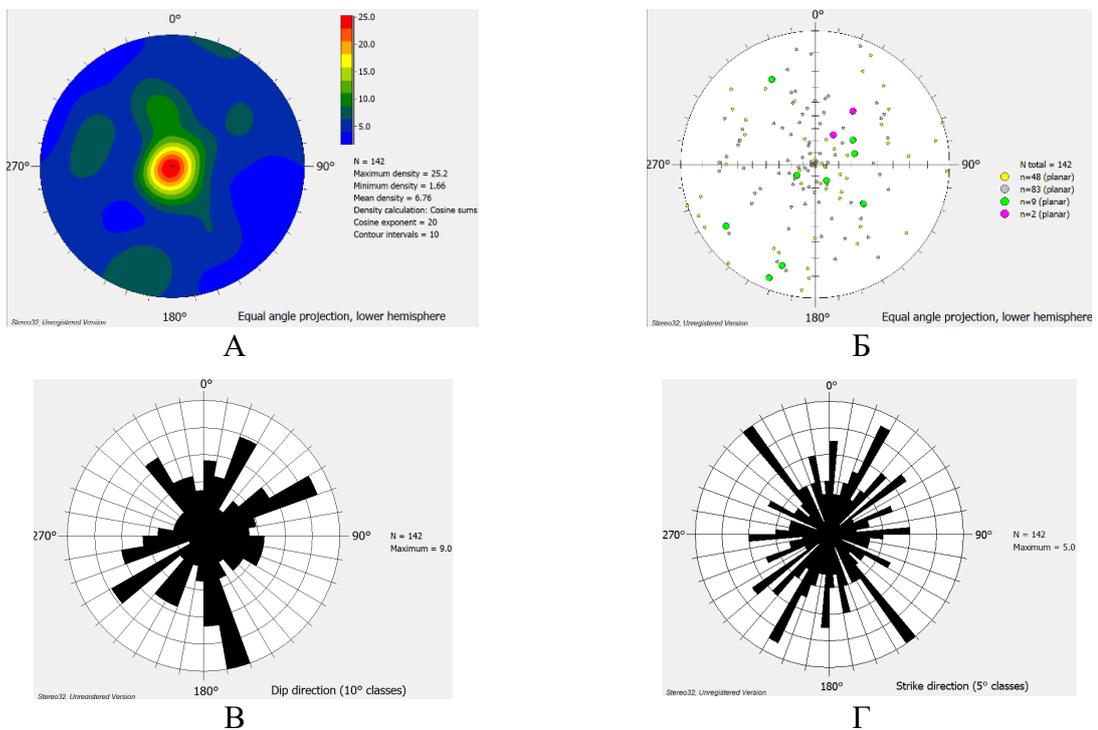
- - 1 мм;
- - 2 мм;
- - 3 мм;
- - 4 мм;
- - 5 мм;

Рисунок 3.15 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины Р1, интервал: 113,1-604,0 м по стволу скважины



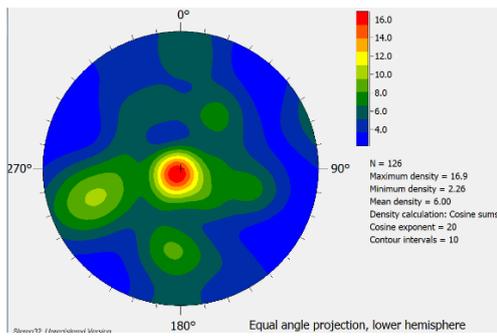
Раскрытие трещин:
 ● - 1 мм; ● - 2 мм; ● - 3 мм; ● - 4 мм; ● - 5 мм;

Рисунок 3.16 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины Р3, интервал: 94,0-382,0 м по стволу скважины

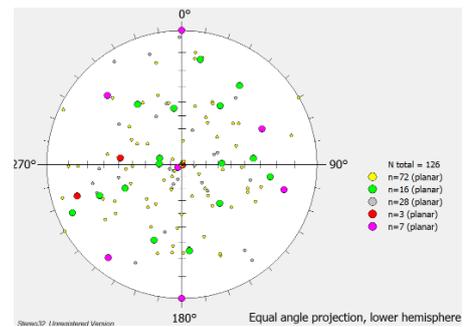


Раскрытие трещин:
 ● - 1 мм; ● - 2 мм; ● - 3 мм; ● - 4 мм; ● - 5 мм;

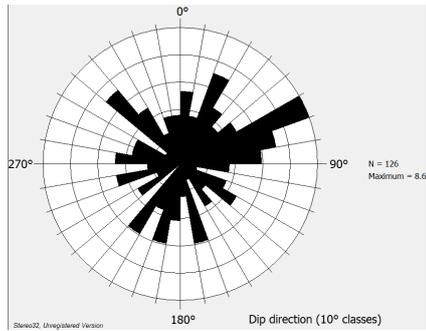
Рисунок 3.17 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины Р4, интервал: 171,7-557,0 м по стволу скважины



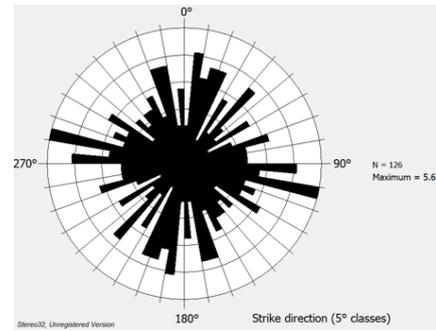
А



Б



В

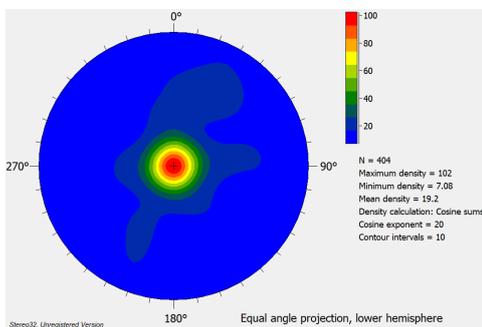


Г

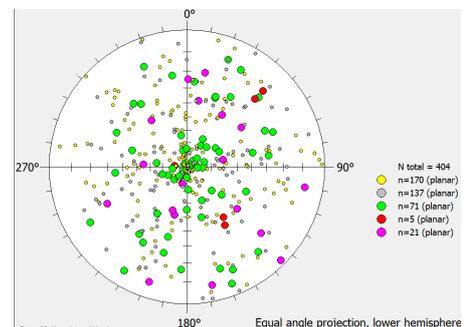
Раскрытие трещин:

- - 1 мм;
- - 2 мм;
- - 3 мм;
- - 4 мм;
- - 5 мм;

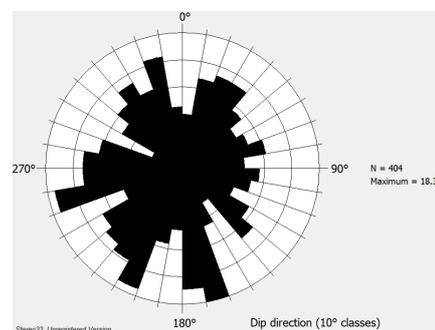
Рисунок 3.18 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины Р5, интервал: 230,75-518,15 м по стволу скважины



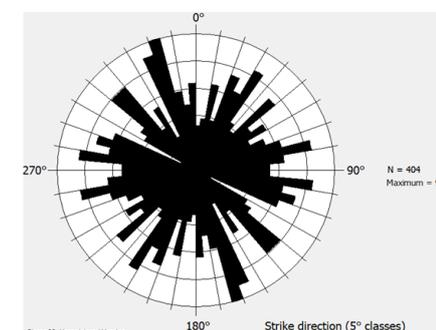
А



Б



В



Г

Раскрытие трещин:

- - 1 мм;
- - 2 мм;
- - 3 мм;
- - 4 мм;
- - 5 мм;

Рисунок 3.19 – А - Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б - круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по падению (В) и простиранию (Г) для скважины Р8, интервал: 128,4 – 679,4 м по стволу скважины

По итогам анализа статистического распределения трещин в обследованных скважинах было установлено, что в зависимости от положения трещин относительно оси скважины выделены три основных типа систем трещин: крутопадающие трещины (угол к оси скважины 0° - 30°), трещины среднего падения (угол к оси скважины 30° - 60°) и преобладающий тип - пологозалегающие (угол к оси скважины 60° - 90°).

В целом по скважинам наблюдаются различные направления систем трещин по простиранию, при этом в скважинах Р-3, Р-8, преобладающим направлением является преимущественно северо-западное, в то время как в скважинах Р-1, Р-4, Р-5 преобладающим направлением по простиранию является северо-восточное направление. В скважине 1-Е не выделяется преобладающих направлений простирания. По падению в скважинах 1-Е, Р-3, Р-4 и Р-5 преобладающим направлением является северо-восточное, В Р-8 отчётливо выделяется юго-западное направление падения. В скважине Р-1 не выделяется преобладающих направлений по падению. В части раскрытия преобладающим значением являются 1-2 мм, максимальное раскрытие трещин (порядка 5 мм) зафиксировано в скважинах 1-Е, Р-5 и Р-8, при этом среднее значение раскрытия трещин во всех скважинах составляет 3 мм. Максимальное количество трещин зафиксировано в скважине Р-1 и составляет 514, минимальное зафиксировано 126 шт (Р-5).

Модуль трещиноватости (*Mmp*) является достаточно распространённой количественной характеристикой трещиноватости горных пород, которая представляет собой оценку количества трещин, приходящихся на 1 погонный метр какого-либо направления [126]. Таким направлением может быть керн скважины, так и ее ствол. Соответственно, модуль трещиноватости формирует объёмное представление о количестве присутствующих в данном интервале трещин. Полученные в ходе видеообследования данные о количестве присутствующих трещин в отдельных глубинных интервалах скважин были сопоставлены с данными изучения кернового материала. Определено, что выполненная ранее оценка трещиноватости по керну, представляющая собой подсчёт количества трещин на погонный метр керна, является завышенной в сравнении с результатами видеокаротажных обследований. Разница в значениях *Mmp* может достигать порядка 10-60% в одних и тех же интервалах (таблица 3.2). Такое различие показателей трещиноватости пород, определяемых по керну и результатам видеообследования объясняется фактором дополнительного образования трещин в керновом материале, связанным с технологическими причинами, возникающими при прохождении скважин через границы сред с разными физико-механическими свойствами. Буровая коронка при переходе в другую среду может изменить направление, возникают боковые напряжения, сопровождающиеся вибрацией снаряда,

«приклином» коронки, что способствует не только образованию дополнительных трещин, но и разрушению керна до щебнистого состояния.

Таблица 3.2 – Пример сравнения значений модуля трещиноватости (M_{mp}), определенных по результатам анализа кернового материала и результатам видеокаротажных обследований в открытом стволе скважины Р-1

№	Интервал		Тип пород	Керн	Видеокаротажные обследования	
	Глубина, м	Длина, м		M_{mp} , шт/пог.м	M_{mp}' шт/пог.м	Кол-во Трещин, шт.
1	122,8-136,75	13,95	Гнейсы биотитовые	12	10	135
2	206,35-209,55	3,20	Гнейсы биотитовые и биотит-кордиеритовые	7	6	19
3	212,15-230,15	18,00	Метадолериты	10	5	83
4	239,45-265,2	25,75	Гнейсы биотитовые и биотит-кордиеритовые	6	1	23
5	283,15-287,2	4,05	Гнейсы биотитовые и биотит-кордиеритовые	4	4	17
6	529,95-539,7	9,75	Метадолериты и трахидолериты	11	1	7
7	568,0-569,5	1,50	Плагиогнейсы биотитовые	13	11	16

Предположительно, при геологическом описании керна, оценка трещиноватости была несколько завышена, в силу приведенных выше причин, связанных с технологией бурения и отбора кернового материала. Также к причинам завышения показателей трещиноватости могут быть отнесены:

- разгрузка керна при его выбурировании из массива на больших глубинах,
- наличие неплотных контактов между различными типами горных пород,
- разрушение по минерализованным трещинам / прожилкам,
- размалывание/дробление керна при прохождении бурового снаряда через трещиноватые участки.

Для целей поиска потенциально водопрводящих зон и наиболее точного построения гидрогеологических разрезов, помимо достоверной оценки интенсивности трещиноватости в потенциально водопрводящей зоне массиве необходимо также охарактеризовать ее протяженность по глубине. Это позволит выбрать оптимальную длину интервала для последующей заверки фильтрационных характеристик прямыми методами. С учётом выявленных расхождений значений M_{mp} установлено, что определение положения потенциально водопрводящих трещиноватых зон в массиве, а также их границ с

задействованием результатов видеокаротажных обследований скважин является предпочтительным вариантом.

Выводы

По завершению процесса обработки данных, полученных в результате исследований сети разведочных скважин участка Енисейский с применением разработанного в рамках диссертационного исследования каротажного программно-аппаратного комплекса:

– получен набор количественных параметров трещинной сети, в наибольшей степени влияющих на водопроницающие свойства скального массива, включает в себя такие показатели как пространственное положение трещин - азимуты падения и простирания, угол падения, геометрические характеристики трещин – раскрытие, интенсивность трещиноватости. Данные параметры также являются исходными данными для вычисления значений тензора трещинной проницаемости;

– уточнено положение нарушенных участков, трещинных зон различного генезиса в скважинах.

– определено, что трещины и их системы, представленные в сети разведочных скважин участка Енисейский, можно отнести в силу их раскрытия к категории микротрещин (мелких трещин), согласно характеристике, представленной в таблице 1.2. (Глава 1). На исследованных участках преобладают открытые трещины с раскрытием 1-2 мм, при этом среднее значение степени раскрытия составляет 3 мм; диапазон значений по степени раскрытия трещин составляет 1-5 мм. Преобладающие направления систем трещин по азимутам падения и простирания наблюдаются лишь в части скважин. В части систематизации трещин по падению выявлены три основных типа систем трещин: крутопадающие трещины, трещины среднего падения и преобладающий тип - пологозалегающие.

– установлено, что выполненные по керновому материалу поинтервальные оценки модуля трещиноватости (M_{tr}) на 10-60% больше значений M_{tr} , установленных по данным видеокаротажных исследований. С учётом выявленных расхождений в значениях M_{tr} определение положения потенциально водопроницающих трещиноватых зон в скважине, их границ, а также выбор оптимальной длины интервала для последующей заверки фильтрационных характеристик прямыми методами необходимо выполнять с задействованием результатов видеокаротажных обследований скважин.

Полученные результаты сформировали основу первого и третьего научных положений.

Глава 4. Обоснование комплекса скважинных методов для выделения и оценки зон возможной водопроницаемости

Результаты видеообследования с помощью разработанного каротажного комплекса не могут являться единственным основанием для вывода о задействовании выявленных трещин в водообменных процессах. За пределами границ видимой зоны трещины могут быть закольматированы буровым раствором или иметь минеральный наполнитель, а также, с учетом имеющихся представлений о слоистой структуре вмещающих пород, взаимные пересечения между трещинами могут отсутствовать. Это определяет необходимость применения вспомогательных методов исследований, верифицирующих полученные результаты видеокаротажных обследований и формирующих дополнительные аргументы для отнесения трещиноватых участков к водопроницаемым зонам.

Отбор наиболее информативных косвенных методик выбора потенциально водопроницаемых интервалов в стволах разведочных скважины выполнялся в несколько этапов. На первой стадии результаты видеокаротажных исследований были сопоставлены с геологическими колонками и результатами ГИС, выполненных на стадии проходки скважин. Далее по итогам комплексного анализа имеющейся геологической документации на трещиноватых участках, в которых наблюдались аномалии геофизических полей были выделены потенциально водопроницаемые участки. Глубины залегания данных участков стали основой для планирования поинтервальных опытно-фильтрационных работ. По результатам ОФР были определены глубины и протяженность каждого водопроницаемого интервала. На основе совокупного анализа параметров аномалий геофизических полей на соответствующих им трещиноватым участкам в подтвержденных ОФР интервалах был обоснован набор каротажных методик для включения в состав разрабатываемой в рамках диссертационного исследования методики. Количественная характеристика параметров геофизических аномалий на трещиноватых интервалах была выполнена на основе лабораторных исследований монолитных образцов различных типов горных пород, характерных для участка Енисейский.

При планировании полевых скважинных поинтервальных опытно-фильтрационных исследований по выделению нарушенных водопроницаемых участков приоритет был отдан скважине Р-8. Скважина пройдена в 2010 г, имеет глубину 700 м, бурение осуществлялось колонковым способом со сплошным отбором керна для целей геологического изучения массива. Для предохранения керна от размыва и истирания бурение велось двойными колонковыми трубами со съёмным керноприёмником. В качестве промывочной жидкости использовалась вода из поверхностных водотоков с добавками реагентов, повышающих

несущую способность бурового раствора и снижающих вибрацию снаряда. Схема расположения скважины показана на рис. 3.9. Для данной скважины были отмечены повышенные значения показателей трещиноватости; более 15% протяженности ее ствола пересекают нарушенные зоны. Также по данной скважине доступна большее, по сравнению с остальными скважинами, количество первичных (полевых) материалов, в т.ч. по итогам выполнения ГИС.

4.1 Описание исследовательской скважины

Геологический разрез скважины Р-8 представлен преимущественно биотитовыми гнейсами и плагиогнейсами, которые в его верхней и нижней частях прорваны дайками метадолеритов мощностью 1,3-42,3 м. Редко отмечаются маломощные (0,1-0,3 м) тела более молодых долеритов и трахидолеритов, отдельные жилы пегматитов. По результатам изучения кернового материала и видеокаротажных обследований ствола скважины определено, что целевых интервалах глубин размещения выработок ПИЛ и ПГЗРО, в вышележащих породах и на глубинах более 500 распространены различные нарушения однородности структуры геологической среды, включая участки повышенной концентрации трещин. Скважиной вскрывается зона предполагаемого крупного разрывного нарушения, а также зоны повышенной трещиноватости. В основном, это – системы трещин, включая единичные проявления, открытые и минерализованные (рис. 4.1).

Таблица 4.1 – Интервалы нарушенности горных пород, вскрытых скважиной Р-8 (ниже обсадной колонны), выделенные по итогам анализа кернового материала

№	Интервал	Длина, м	Характеристика
1.	264,5 - 265,1	0,6	Зона милонитизации (со штрихами скольжения) вкрест полосчатости
2.	267,4 - 267,6	0,2	Зона милонитизации (со штрихами скольжения) вкрест полосчатости
3.	333,2 - 333,4	0,2	Зона милонитизации вкрест полосчатости
4.	360,7 - 360,8	0,1	Зона милонитизации с зеркалами скольжения
5.	362,6 - 362,7	0,1	Зона милонитизации с глиной трения
6.	402,2 - 402,3	0,1	Зона дробления на глинистом цементе. В обломках - гнейсы, кварц, КППШ
7.	408,9 - 409,1	0,2	Зона милонитизации с окварцеванием и калишпатизацией
8.	416,3 - 416,4	0,1	Зона милонитизации с глиной трения
9.	417,0 - 417,2	0,2	Зона милонитизации с окварцеванием
10.	422,3 - 422,4	0,1	Трещиноватые породы ломаются руками и распадаются при надавливании на керн по каолиновым трещинам
11.	425,0 - 425,2	0,2	Трещиноватые породы ломаются руками и распадаются при надавливании на керн по каолиновым трещинам
12.	427,7 - 429,7	2,0	Породы разваливаются по каолиновым трещинам
13.	434,7 - 434,8	0,1	"Выветрелая" порода
14.	435,4 - 435,6	0,2	Порода распадается при надавливании вдоль вертикальных трещин, сопровождающихся множеством оперяющих с каолиновым заполнителем

№	Интервал	Длина, м	Характеристика
15.	436,9 - 437,2	0,3	Порода распадается при надавливании вдоль вертикальных трещин, сопровождающихся множеством оперяющихся с каолиновым заполнителем
16.	487,2 - 487,3	0,1	Зона милонитизации (вкрест полосчатости) с глиной трения
17.	546,7 - 546,8	0,1	Зона милонитизации с окварцеванием и калишпатизацией
18.	560,6 - 564,0	3,4	Зона милонитизации с окварцеванием и калишпатизацией
19.	568,5 - 570,2	1,7	Зона милонитизации с окварцеванием и калишпатизацией
20.	581,2 - 581,3	0,1	Породы затронуты "выветриванием"
21.	588,1 - 588,2	0,1	Породы затронуты "выветриванием"
22.	657,6 - 659,0	1,4	Смятие с фрагментами брекчирования
23.	665,9 - 666,1	0,2	Смятие с фрагментами брекчирования
24.	686,3 - 688,5	2,2	В обломках - гнейсы гранат-плагиооклазовые (гл. 687,1 м), кварц, кальцит. Цемент розово-красный карбонатный

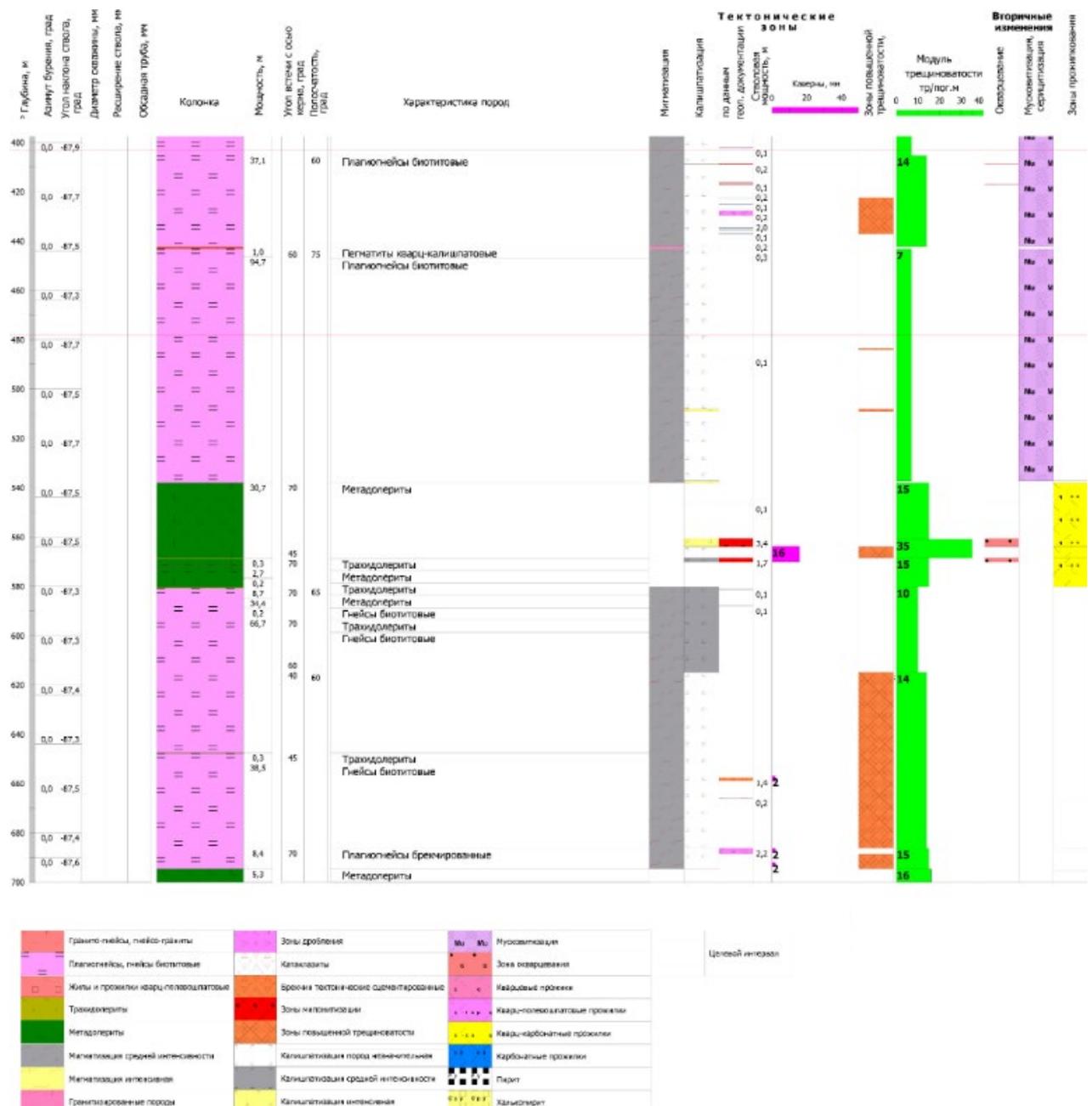


Рисунок 4.1 – Фрагмент геологического разреза по скважине Р-8

4.2 Выбор потенциально водопрводящих интервалов по данным ГИС

Набор методов ГИС, выполненных в скважине Р-8, был определен исходя из потребностей в расчленении разреза на основные литологические разности, определения пространственного положения стволов скважин. В состав ГИС, выполненных в скважине Р-8, были включены: гамма-каротаж (ГК), гамма-гамма каротаж плотностной (ГГК-П), каротаж сопротивлений (КС), акустический каротаж (АК), кавернометрия и инклинометрия. Масштаб глубин при регистрации кривых ГИС – 1:500, запись кривых производилась при подъеме скважинных приборов.

ГК. Измерения выполнялись скважинным радиометром КУРА-2М. Масштаб регистрации интенсивности γ -излучения по разрезам скважин 2,5-5 мкР/час на 1 см. Постоянная времени интегратора 1 сек. Скорость записи до 300 м/час. Контроль стабильности работы радиометра осуществлялся записью фона от рабочего эталона до и после каротажа на каждой скважине. Градуировка радиометра проводилась один раз в месяц на базе экспедиции [125].

ГГК-П. Измерения выполнялись скважинным радиометром КУРА-2М. Для наведения гамма-излучения использовался изотоп Цезий-137 (^{137}Cs), размер зонда 30 см. Постоянная времени интегратора 2 сек. Масштаб регистрации 6000-12000 имп/мин на 1 см. Скорость записи 100-300 м/час [125].

КС и ПС. Измерения выполнялись кровельным градиент-зондом N0.1M1.0A. Масштаб записи 500 Ом·м на 1 см. Скорость записи до 500 м/час. Измерения КС выполнялись с применением метода возбуждения знакопеременным полем и замером снижения значений напряжения на электродах, а измерения ПС были выполнены без задействования внешнего электрического поля [125].

АК. Измерения выполнялись прибором Парус-48, фиксирующем скоростные и амплитудные характеристики, значения коэффициента эффективного затухания продольной и поперечной волн, распространяющихся в породах, а также поверхностной волны, распространяющаяся вдоль границы скважинная жидкость-горная порода [125].

Кавернометрия проводилась малогабаритным каверномером КМ-2. Масштаб измерений 1:2 диаметра скважин. Калибровка каверномера осуществлялась на каждой скважине в градуировочных кольцах известного диаметра в начале и в конце каждой записи. Кавернометрия выполнялась для контроля технического состояния стволов скважин и учета влияния диаметра скважин на показания методов ГИС. Скорость регистрации до 800 м/час [125].

Инклинометрия проводилась для контроля соблюдения заданного направления оси скважины при бурении и определения истинного положения стволов скважин в пространстве.

Измерения выполнялись инклинометром ИЭМ36 с шагом 10 метров. Допустимая погрешность при замерах зенитных углов не более $\pm 0^{\circ}30'$, азимутального угла не более $\pm 5^{\circ}$ [125].

По итогам обработки первичных данных ГИС в скважине Р-8 было определено, что породы в стволе скважины характеризуются равномерным распределением трещиноватости, увеличивающимся в интервалах глубин 400-700 м, что также подтверждается результатами видеокаротажных обследований и описания керна. Естественная радиоактивность пород изменялась в среднем, в пределах от 3 до 35 мкР/час, существенных аномалий γ -активности не выявлено. Кажущееся удельное сопротивление пород изменяется в широком диапазоне: от десятков Ом·м до 50 000 Ом·м. На фазово-корреляционной диаграмме акустического каротажа также отмечаются участки с потенциально проницаемыми отдельными трещинам, трещиноватым проницаемым интервалам и др. Весь интервал исследований открытого ствола представлен в большей своей части плотными высокоскоростными породами.

Анализируя обобщенные геолого-гидрогеологические характеристики участка Енисейский было сформировано предположение о том, что потенциально водопроницаемыми зонами в стволе скважины являются участки сильно трещиноватых пород, приуроченные к контактам геологических тел и зон дробления. При отборе потенциально водопроницающих зон в скважине были задействованы глубинные отметки положения участков, на которых отдельные трещины, а также их системы не имеют минерального заполнителя. Для данных зон также было характерно наличие фиксируемых методами ГИС аномалий геофизических полей, проявляющихся в виде: падения амплитуд, скоростей волнового пакета, увеличения интервального времени, росте коэффициентов эффективного затухания; скачкообразного увеличения и снижения γ -активности пород; снижения интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (снижение скорости счёта импульсов), пониженных значениях кажущегося сопротивления горных пород.

Сопоставление результатов ГИС с результатами обработки данных видеокаротажных обследований позволило выделить потенциально водопроницающие интервалы для определения их задействования в подземных водообменных процессах (см. рис. 4.2) прямыми методами (ОФР). К таким зонам были отнесены интервалы глубин:

- 412-440, 484-488, 556-576, 582-587 м – трещиноватые интервалы, выделенные результатам анализа кернового материала и видеокаротажных обследований;
- 352-447, 527-556, 582-587, 605-664 м – трещиноватые интервалы, выделенные результатам анализа кернового материала и видеокаротажных обследований, проявляющиеся в виде падения амплитуд волнового пакета, уменьшением амплитуд поперечной волны, а

также увеличением интервального времени (падения скорости) продольной волны по данным АК, аномалиями в виде резких изменений амплитуд ГК, ГГК-П, КС и ПС.

На рис. 4.2 красными линиями отмечены трещиноватые участки, выделенные в ходе анализа керна и видеокаротажных обследований, синими линиями – в т.ч. по результатам комплекса ГИС.

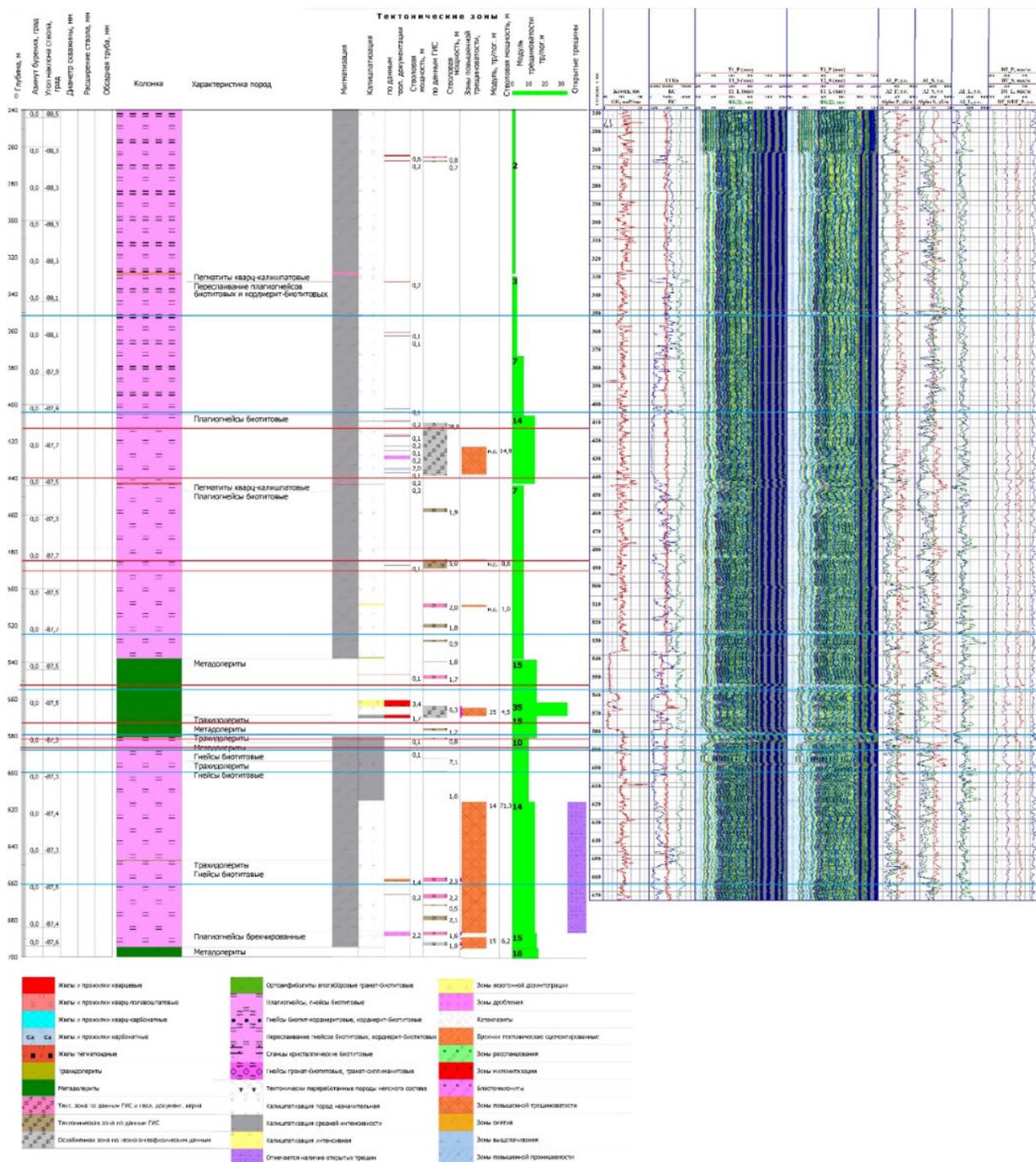


Рисунок 4.2 – Потенциально водопроницаемые участки по данным ГИС и керна к материалу (геологической документацией) по скважине Р-8

4.3 Выполнение опытно-фильтрационных работ с применением поинтервальных нагнетаний и наливов

В потенциально водопродящих участках ствола скважины Р-8, выделенных по итогам комплексного анализа результатов ГИС и видеокаротажных каротажных обследований были выполнены поинтервальные опытно-фильтрационные работы (ОФР) с задействованием специализированной исследовательской установки [127].

В основе исследовательской установки для ОФР применена двухпакерная система с регулируемым расстоянием (1-20 м) между пакерами. Исследования в изолированных пакерами интервалах проводились по методикам экспресс-откачек и нагнетаний воды. Схема исследовательской установки и проведения исследований представлена на рис. 4.3. При проведении исследований фиксировалось давление не только в межпакерном интервале, но и под нижним, и над верхним пакерами. Давление измеряется датчиками уровня воды, локализованными над верхним пакером. Каждый из датчиков имеет гидравлическую связь с зоной измерений [107]. Данная установка в совокупности с задействованными методиками поинтервальных ОФР является аналогом зарубежного исследовательского подхода, применяемого для количественной характеристики фильтрационных параметров массивов скальных горных пород, в которых планируется глубинное захоронение РАО [128].



Рисунок 4.3 – Схема оборудования скважины для поинтервальных исследований

Принцип работы по представленной выше схеме заключается в изоляции незакреплённого потенциально водопродящего интервала скважины с помощью пакерного снаряда. В ходе ОФР применялись различные компоновки пакерного снаряда – одинарная и двойная (рис. 4.4). При одинарной компоновке (рис. 4.4 А) исследуется интервал между забоем скважины и пакером без ограничения протяженности интервала. При двойной компоновке (рис. 4.4 Б) основной исследуемый интервал находится между пакерами с учетом расстояний

между ними. Для применения откачек использовалась одинарная компоновка, для нагнетаний применялась двойная компоновка.

Пакерный снаряд (рис. 4.3.) с помощью тросовой лебёдки опускался на глубинную отметку выбранного интервала исследований. Контроль уровня воды осуществлялся датчиком уровня. Расширение пакеров осуществлялись водой, закачиваемой в них по трубкам с помощью насоса высокого давления.

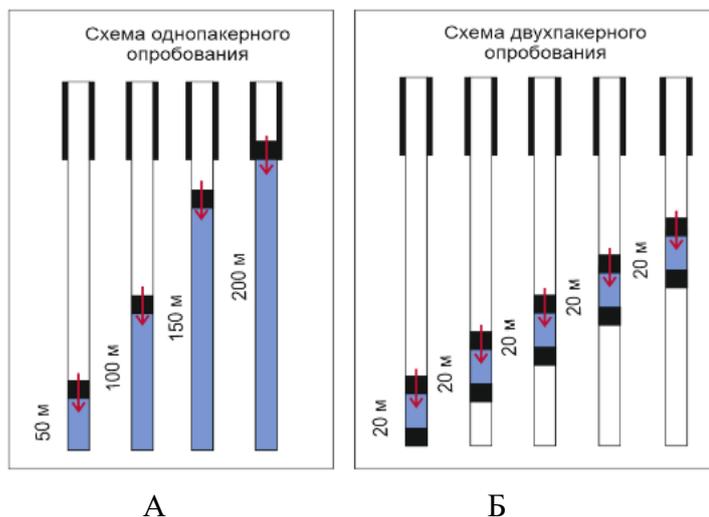


Рисунок 4.4 – Одинарная (А) и двойная (Б) компоновка пакерного снаряда

Количественные оценки водопроницающих свойств, полученные по результатам интерпретации результатов ОФР представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты интерпретации результатов ОФР в водопроницающих интервалах скважины Р-8

№	Интервалы	Проводимость (T), м ² /сут	Коэффициент фильтрации (k_f), м/сут	Методика ОФР
1.	250,00-586,7	0,0147	$0,437 \cdot 10^{-4}$	Нагнетания/наливы
2.	497,60-507,6	0,002	$2,0 \cdot 10^{-4}$	Нагнетания/наливы
3.	500,28-700,0	0,034	$1,71 \cdot 10^{-4}$	Откачки
4.	550,25-700,0	0,003	$2,0 \cdot 10^{-5}$	Откачки
5.	605,44-700,0	0,00087	$9,12 \cdot 10^{-6}$	Откачки
6.	647,50-700,0	0,0006	$1,15 \cdot 10^{-5}$	Откачки

Полученное распределение значений проводимости (T) по глубине свидетельствует о том, что в интервале глубин 500-550 м существует более проницаемая зона, нежели остальной вмещающий массив. В процессе камеральной обработки результатов ОФР применение различных методов расчета показало удовлетворительную сходимость результатов. Показатели проницаемости массива, полученные по итогам нагнетаний в изолированный

интервал, несколько ниже показателей, полученных методом откачек. Данное расхождение результатов может объясняться как реакцией массива на неодинаковые виды гидродинамических возмущений, так и влиянием дополнительных факторов в трещиноватых коллекторах. В дальнейшем видится целесообразным выполнение ОФР как с применением методики нагнетаний, так и откачек, т.к. при откачках оцениваются емкостные свойства трещиноватых участков массива, которые невозможно определить по итогам проведения нагнетаний. Методика нагнетаний позволяет в свою очередь осуществлять равномерную длительную нагрузку на изучаемый трещиноватый участок массива и получать более точные данные по параметрам его проницаемости.

По итогам сопоставления глубинных отметок положения потенциально водопрводящих интервалов, выделенных по результатам анализа ГИС, видеокаротажных обследований, а также выделенных по результатам ОФР водопрводящих интервалов (таблица 4.2.) отмечено, что не все трещиноватые участки являются водопрводящими из-за возможного кольматажа трещин или отсутствием связей между системами трещин. При этом положение потенциально водопрводящих трещиноватых интервалов в целом коррелируют с водопрводящими (таблица 4.3), что в свою очередь позволяет выполнить расчётную оценку неоднородности в водопрводящем интервале, используя в качестве исходных данных количественные характеристики трещин, включая их пространственное положение. Исходя из полученных по результатам ОФР количественных оценок проницаемости выделенного интервала можно определить фильтрационные параметры входящего в него трещиноватого участка (определённого в ходе каротажного обследования и/или анализа ориентированного кернового материала), используя выражение (1.3).

Таблица 4.3 - Выделение водопрводящих участков в скважине Р-8 по данным ОФР, результатов каротажных обследований и изучения кернового материала

№	Интервал, м.	Проводимость (T), м ² /сут	Коэф-т фильтрации (k _ф), м/сут	Тип пород	Трещиноватость	
					Керн, M _{тр}	Кол-во трещин*, шт.
1	483,5 – 484,1	0,002	2,0·10 ⁻⁴	Плагиогнейсы биотитовые	7	7
2	508,1 – 509,1			Плагиогнейсы биотитовые	7	9
3	564,0 – 568,5	0,003	2,00·10 ⁻⁵	Метадолериты, трахидолериты	35	114
4	615,0 – 686,3			Гнейсы биотитовые, трахидолериты	14	173

* – по данным видеокаротажных исследований в скважине

4.4 Определение состава методов ГИС, направленных на выделение потенциально водопродводящих участков

Для определения комплекса скважинных методов выявления интервалов возможной водопродводимости в необсаженных стволах скважин, пройденных в скальных горных породах участка Енисейский, был применён метод корреляции разрезов скважины. Суть метода заключается в сопоставлении каротажных диаграмм или количественных значений, полученных на соответствующих глубинах каждым из применённых методов [129]. С целью повышения точности корреляционного метода был выбран подход сопоставления количественных значений результатов ГИС – первичной информации. По каждому водопродводящему интервалу были составлены таблицы количественных параметров физических параметров горных пород и количественных параметров трещиноватости, определённых по итогам видеокаротажных исследований на соответствующих глубинных отметках. Далее для выявления взаимосвязи между количественными значениями, получаемыми в результате применения косвенных и прямых методов исследований, был выполнен корреляционный анализ. Значения коэффициентов корреляции (r) представлены в табл. 4.4. Оранжевым цветом отмечены очень слабые ($|r| < 0,29$), жёлтым - средние и слабые ($0,3 < |r| < 0,69$), зелёным – сильные ($|r| > 0,7$) корреляционные связи, отражающие взаимосвязь между значениями среднеквадратических отклонений значений геофизических параметров горных пород, фиксируемых ГИС, на трещиноватых участках скважины.

По итогам сравнительного анализа первичной документации по результатам ГИС, выполненных в скважинах на исследуемом участке, установлена приемлемая сходимость по совокупному объёму исследований результатов видеокаротажных обследований, акустического каротажа (АК) в части снижения скоростей распространения продольных волн - 83%, гамма-каротажа (ГК) – 91%, плотностного гамма-гамма каротажа (ГГК-П)- 89%.

Выявленные по результатам сопоставления полученных в скважине Р-8 данных, корреляционные взаимосвязи формируют первичный набор методов ГИС, позволяющих выделять потенциально водопродводящие зоны в открытых стволах скважин. Также на рис. 4.5 приведены карты интенсивности трещиноватости в значениях диапазонов изменения гамма-активности горных пород, интенсивности искусственного гамма-излучения, а также скоростей продольных волн. В соотв. с представленными на рис. 4.5 диаграммами, отражающими чувствительность методов ГИС по отношению к различным значениям интенсивности трещиноватости, наилучшая сходимость положения открытых трещин, определённых в ходе видеокаротажных обследований, отмечается на участках горных пород с пониженными значениями скоростей продольных волн (АК).

Согласно технической документации на измерительные приборы, с помощью которых производились исследования, радиус зондирования АК соответствует радиусу цилиндра, за пределами которого интервальное время, коэффициент затухания, амплитуды волн изменяются на величину, равную 10%. Глубинность АК по амплитуде упругих волн (динамическая глубинность) составляет 1,5 значения длины волны в горной породе, при этом за начало отсчёта берётся стенка ствола скважины. При скорости волны = 5 км/с, $f = \text{кГц}$ радиус зондирования составил 20 см. При этом радиус исследования АК по скорости продольных волн (кинематическая глубинность) составил 10 см. – в 2 раза меньше динамической глубинности. Данный аспект является дополнительным аргументом, формирующим предположения о том, что выявленные в ходе видеокаротажных обследований трещины распространяются в глубину массива и не имеют минерального заполнителя за пределами видимой зоны.

Таблица 4.4 – Значения коэффициентов корреляции, отражающие согласованность изменения геофизических параметров горных пород на глубинах трещиноватых участков массива в скважине Р-8

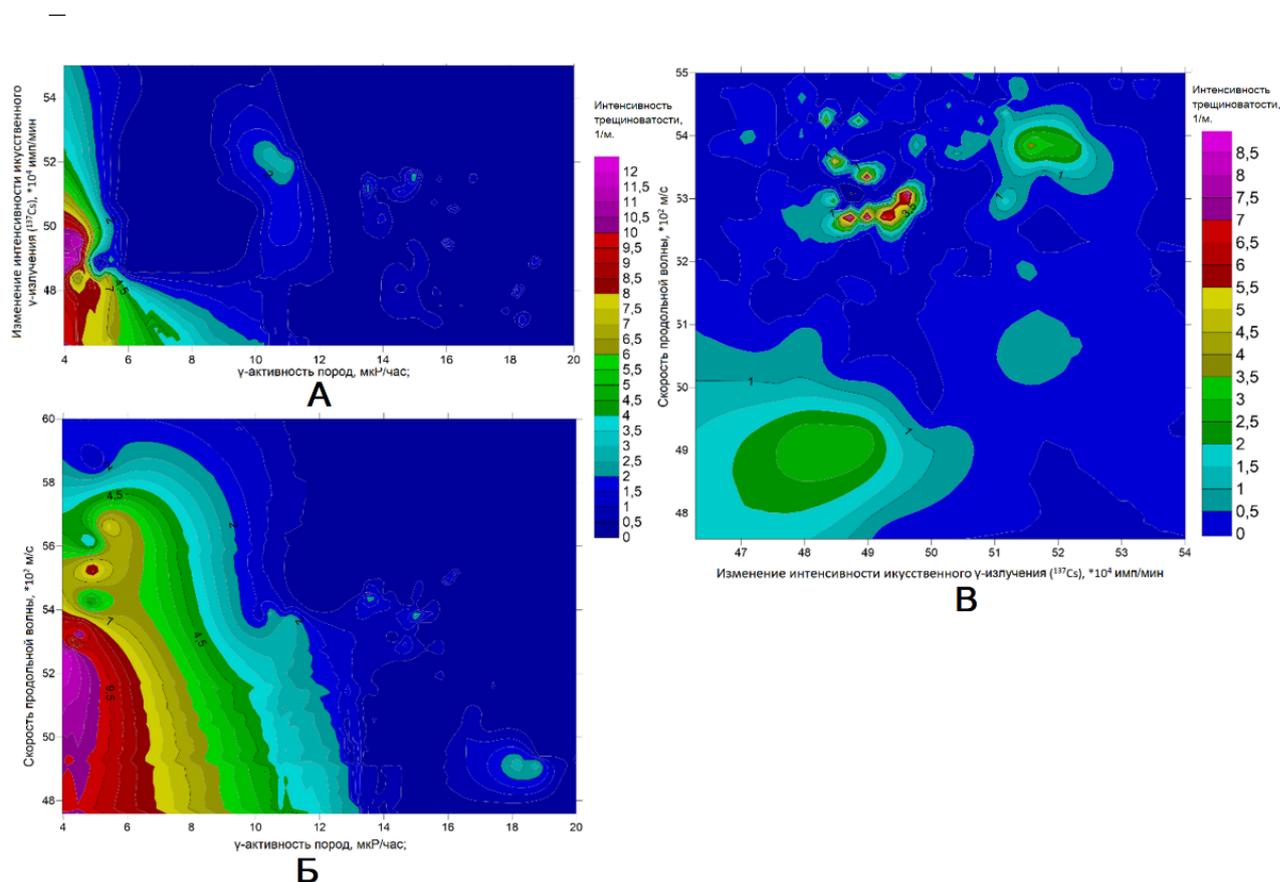
	ГК	ГГК-П	КС	ПС	АК St	АК Р	АК S	СВК
ГК	1	-0,88	0,52	-0,77	-0,34	-0,79	-0,62	-0,91
ГГК-П	-0,88	1	-0,70	0,73	0,11	0,93	0,66	0,89
КС	0,52	-0,70	1	-0,75	-0,36	-0,74	-0,35	-0,51
ПС	-0,77	0,73	-0,75	1	0,73	0,86	0,68	0,64
АК St	-0,34	0,11	-0,36	0,73	1	0,28	0,18	0,03
АК Р	-0,79	0,93	-0,74	0,86	0,28	1	0,83	0,83
АК S	-0,62	0,66	-0,35	0,68	0,18	0,83	1	0,78
СВК	-0,91	0,89	-0,51	0,64	0,03	0,83	0,78	1

Примечание: АК – скоростные и амплитудные параметры поверхностной волны Стоунли (St), продольных волн (Р), поперечных волн (S); СВК – количество трещин в интервале по данным скважинного видеокаротажа; Гамма-каротаж (ГК) – параметры γ -активности горных пород; гамма-гамма каротаж плотностной (ГГК-П) – параметры интенсивности поглощения искусственного γ -излучения; КС – каротаж сопротивлений; ПС – метод самопроизвольной поляризации.

В части применения радиоизотопных методов ГИС (ГК и ГГК-П) стоит отметить несколько фактов, обусловленных их физической основой:

ГК. Уровень естественной радиоактивности горных пород имеет опосредованную связь со степенью их трещиноватости. В случае вторичного заполнения трещин минералами, обогащенными природными радионуклидами, на каротажных диаграммах могут быть зафиксированы скачки естественной радиоактивности [45]. Соответственно, скачкообразное

повышение значений радиоактивности горных пород может в т.ч. подтверждать наличие трещиноватых участков, но их участие в подземных гидродинамических процессах из-за возможного кольматажа представляется сомнительным. По данным скважинного видеокаротажа раскрытие трещин, не имеющих минерального заполнителя, находится в диапазонах 1-5 мм, соответственно, влияние естественного радиационного фона массива горных пород будет перекрывать возможные сверхмалые изменения γ -активности.



А – в осях значений гамма-активности пород и изменения интенсивности искусственного гамма-излучения,
 Б– в осях значений скоростей продольных волн и изменения интенсивности искусственного гамма-излучения,
 В – в осях значений гамма-активности и скоростей продольных волн

Рисунок 4.5 – Карты интенсивности трещиноватости в значениях геофизических полей, фиксируемых методами ГК, ГГК-П и АК (скорости продольных волн) в водопродвижающем интервале скважины Р-8

– ГГК-П. В основу данного метода положена связь между трещиноватостью и объемной плотностью горных пород. Чем выше трещиноватость, тем ниже объемная плотность, что проявляется в снижении интенсивности поглощения γ -излучения, фиксируемом при каротаже. Основные ограничения в применении ГГК-П связаны с тем, что зонд не ориентирован и не вращается, соответственно, трещиноватость будет установлена только на одной стороне стенки скважины [45].

В ходе анализа первичных/полевых данных ГИС также отмечено, что ГК менее результативен для выделения потенциально водопрводящих трещин. Скачкообразное изменение параметров, фиксируемых ГК, было отмечено на контактах горных пород, различающихся по γ -активности, к которым приурочены зоны повышенной трещиноватости. Сильно трещиноватые зоны отчётливо проявлялись в пониженных значениях плотностных параметров горных пород, фиксируемых ГГК-П, при этом слабо трещиноватые участки, включая единичные трещины не были зафиксированы данным методом. Соответственно, основной методикой ГИС, верифицирующей результаты видеокаротажных обследований, является АК, а ГГК-П, в силу его меньшей чувствительности к слаботрещиноватым зонам, отводится роль дополнительного. Таким образом в составе комплекса скважинных методов для выделения и оценки зон возможной водопрводимости в необсаженных стволах скважин, по результатам корреляционного анализа и сравнения методик ГИС, результаты применения которых показали хорошую сходимость с положением водопрводящих трещин было определено:

- для формирования предположений о наличии потенциально водопрводящих зон на трещиноватых участках в стволе скважины, определённых по результатам видеокаротажных обследований, должны быть использованы результаты следующих методик ГИС: акустический каротаж и гамма-гамма плотностной каротажи.
- в качестве верифицирующих методик полевых ОФР должны быть применены методики поинтервальных экспресс-откачек и опытных нагнетаний в изолированный интервал.

4.5 Определение диапазонов количественных значений геофизических параметров, характерных для трещиноватых водопрводящих интервалов в скальном массиве

По результатам определения комплекса скважинных методов для выделения и оценки зон возможной водопрводимости в необсаженных стволах скважин, пройденных в массиве скальных горных пород участка Енисейский, определено, что наиболее результативными являются методы видеокаротажных обследований и АК. С целью формирования количественных критериев выделения потенциально водопрводящих интервалов и их последующего включения в состав разрабатываемой в рамках диссертационного исследования «Методики определения анизотропии фильтрационных свойств водопрводящих интервалов скальных пород скважинными методами» выполнен анализ

физических основ метода АК, описание задействованного при проведении ГИС исследовательского оборудования и интерпретации первичных данных. Также для минимизации риска ошибочного отнесения трещиноватых интервалов к потенциально водопроницаемым в лабораторных условиях определены скорости распространения упругих волн в монолитных образцах горных пород, отобранных из керна скважины Р-8. Полученные по итогам данных лабораторных исследований результаты послужили основой для отбора возможных диапазонов значений физических параметров горных пород, фиксируемых методами АК, ГГК-П, характерных как для монолитных интервалов горных пород, так и для трещиноватых водопроницаемых интервалов.

4.5.1 Проведение исследований с применением методики АК

Регистрируемые при проведении исследований с применением АК волновые пакеты содержат данные о колебаниях многих типов волн, которые возникают при преломлении и отражении первичной упругой волны от излучателя прибора на стенке скважины, контактах горных пород, трещин и других препятствий. По итогам проведения исследований в незакрепленных частях скважины Р-8 установлено, что наиболее информативными волнами в пакете являются продольная (Р) и поперечная (S), распространяющиеся в породах. При распространении упругих волн в скальных массивах наблюдается уменьшение их энергии из-за физических процессов поглощения, рассеяния и геометрического расхождения. Поглощение приводит к превращению энергии волны в другие виды энергии. Соответственно, при АК одним из регистрируемых параметров является не энергия волн (E), а амплитуда (A), связанная с энергией следующим выражением:

$$E = 2\pi^2 \delta^2 f^2 A^2, \quad (4.1)$$

где δ – плотность горной породы; f – частота; A – амплитуда.

Важной характеристикой волнового процесса является длина волны. Длина волны λ (м) определяет условия ее распространения в массиве пород, связана со скоростью и частотой колебаний.

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (4.2)$$

где v – скорость волны, f – частота.

Уменьшение амплитуды волны при увеличении расстояния от излучателя до приемника (база зонда) происходит по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 \exp(-\alpha l), \quad (4.3)$$

где A_0 и A – амплитуда колебаний вблизи излучателя и приемника волны, l – расстояние, пройденное волной, α – коэффициент эффективного поглощения/затухания упругой волны.

Коэффициент эффективного затухания упругой волны α (дБ/м) в горной породе характеризует потери энергии волны вследствие эффекта внутреннего трения, теплопроводности горной породы, молекулярного поглощения.

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{A_0}{A_1} \right). \quad (4.4)$$

В горных породах эффективное затухание продольной и поперечной волн вызвано в большей степени рассеянием, а не поглощением, соответственно амплитуды используют для выделения в горных породах неоднородностей геологических сред, трещин, каверн, контактов горных пород.

Для трещиноватых горных пород характерно снижение скоростей и рост затухания упругих волн в сравнении с теми же типами монолитных горных пород. Скорость волн при прохождении трещиноватых участков в разрезе массива снижается и степень снижения зависит в т.ч. от величины трещинной пустотности (пористости горной породы). На уменьшение скорости продольных волн существенное влияние оказывают трещины, расположенные под углом к оси скважины более 10 град. Интенсивная трещиноватость приводит к выполаживанию волновых картин и полному нарушению корреляции фазовых линий [130]. Трещиноватость горных пород влияет также на затухание – уменьшение амплитуд – продольных и поперечных волн. Наибольшему затуханию на трещиноватых участках подвержены поперечные волны. Значительное затухание продольных волн наблюдается только на макротрещинах и сильно развитой микротрещиноватости [51].

Средства для проведения исследований.

Для выполнения исследований ГИС с применением метода АК на участке Енисейский был использован прибор ПАРУС–48 производства АО НПП «ВНИИГИС». Прибор позволяет производить измерения интервального времени упругих волн (Δt), скорости, амплитуд и коэффициентов их эффективного затухания в горных породах [131].

ПАРУС–48 представляет собой четырёхэлементный каротажный зонд и состоит из состоит из импульсного излучателя и трёх расположенных на расстоянии от него приемников, воспринимающих колебания (рис. 4.6). Характеристики прибора представлены в таблице 4.5. В незакрепленной части ствола скважины Р-8 был использован удлинитель зонда (рис. 4.6.),

поставляемый в комплекте аппаратуры. Удлинение расстояния между приёмниками и излучателем увеличивает время пробега упругих волн и даёт хорошее разделение по времени между пакетами продольных (P) и поперечных (S) волн. Разделение по времени уменьшает наложение волн и упрощает обработку пакетов P- и S- волн. Удлинитель зонда был установлен между блоком приёмников и генератором, что дало увеличение длины зонда на 1 м, соответственно была применена формула зонда: ПЗ 0,25 П2 0,25 П1 2,0 И (где 0,25 – расстояние в м между приёмниками сигнала, а 2,0 – расстояние от излучателя до первого приёмника П1 – см. рис. 4.6). Шаг регистрации по глубине был использован 5 см, скорость каротажа составляла 400 м/час.

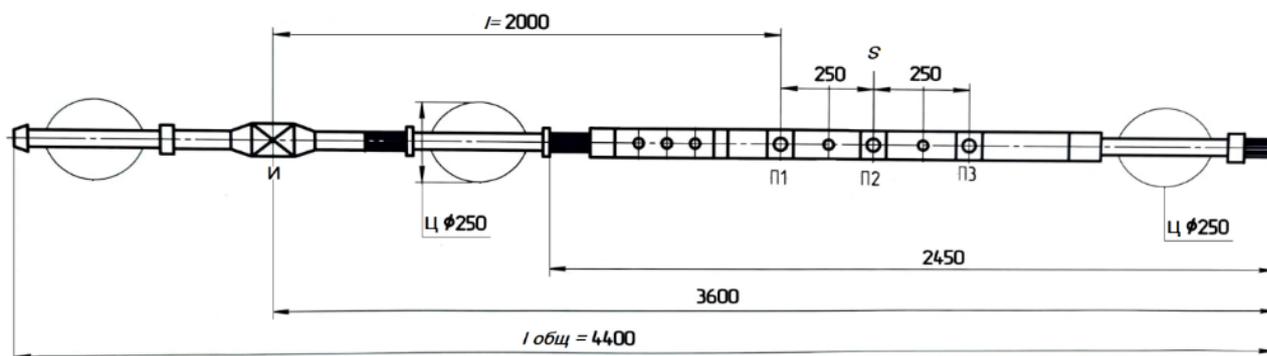


Рисунок 4.6 – Аппаратура АК (ПАРУС – 48), задействованная при проведении ГИС скважины Р-8 на участке Енисейский. И - излучатель, П - приёмник, Ц – центраторы, S- база зонда, l – расстояние от излучателя до первого приёмника, l_{общ} – общая длина зонда

Таблица 4.5 – Характеристики аппаратуры акустического каротажа ПАРУС-48 [132]

№	Наименование	Значение
1	Диаметр излучателя, мм	60
2	Частота излучателя, кГц:	20-30
3	Диапазон измерения интервального времени Δt , мкс/м	120-600
4	Относительная погрешность измерения интервального времени Δt , %	± 3
5	Абсолютная погрешность измерения коэффициента затухания α , дБ/м	± 5
6	Максимальное гидростатическое давление, МПа	60
7	Максимальная рабочая температура, °С	120
8	Габаритные размеры скважинного прибора, мм:	
8.1	– диаметр	48
8.2	– общая длина ($l_{общ}$)	4400
9	База зонда (S), мм	500
10	Расстояние от излучателя до первого приёмника (l), мм	2000

4.5.2 Интерпретация результатов АК на водопроявляющих трещиноватых интервалах в стволе скважины Р-8

Упругие колебания, исходящие от излучателя и зарегистрированные приемником, фиксируются цифровой исследовательской аппаратурой в виде волновых картин, представляемых в виде фазокорреляционных диаграмм (ФКД), а также графиков амплитуд и коэффициентов эффективного затухания. ФКД являются упрощенным представлением зарегистрированных волновых пакетов, на которой отражаются количественные данные о кинематических параметрах и частотах всех типов волн, которые возникают в стволе скважины в ходе каротажных акустических исследований. Передача динамических характеристик (амплитуд) упругих колебаний линии ФКД модулируется цветом (рис. 4.7). ФКД формируются фиксированием на временной оси фаз колебаний при каждом срабатывании излучателя и отображением этих фаз в функции глубины скважины на экране записывающего устройства (ПК).

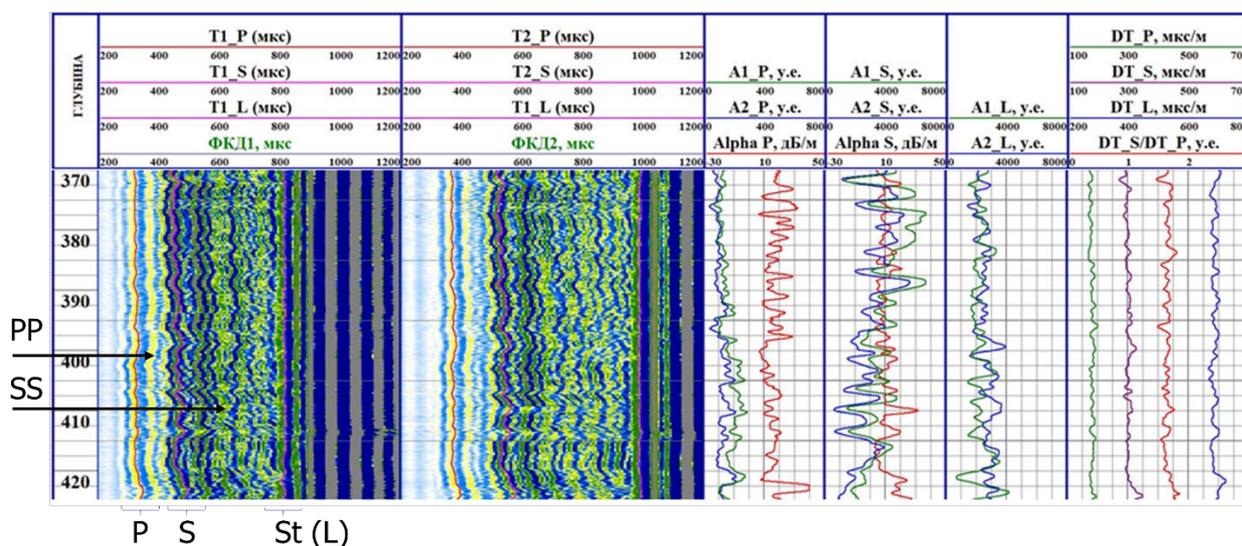


Рисунок 4.7 - фрагмент ФКД, совмещенной с графиками амплитуд и интервального времени

Примечание: P – продольная волна; S – поперечная волна; St / L – поверхностная волна; T – время прихода волн; A – амплитуды волн; 1,2 – каналы измерительного прибора; ФКД – фазокорреляционная диаграмма; Alpha – коэффициент эффективного затухания упругой волны; DT_(P / S / St (L)) - интервальное время пробега волны; PP и SS – отраженные продольная и поперечные волны

Представленные на рис. 4.7 параметры также доступны в виде количественных значений, которые использовались в рамках данной диссертационной работы для детальной проработки (рис. 4.8). В открытом/необсаженном стволе скважины первой приходит P – волна. Вступление S – волны находится в большем времени вступления P – волны. Согласно

количественным параметрам АК в стволе скважины Р-8 разница времени вступления S – волны превышает время вступления Р – волны, в среднем, в 1,4-1,5 раза (табл. 4.6). В интервалах разреза с высокоскоростными породами (условно монолитные породы, где $V_p = 5549-5782$ м/с, а $V_s = 3665-3784$ м/с) амплитуда продольной Р-волны имеет меньшую амплитуду чем у S-волны. Разница значений амплитуд S – волны в среднем в 15 раз больше амплитуды Р-волны (для интервалов условно монолитных гнейсов на глубинах 330-335 м). При этом значения коэффициента эффективного затухания (α , дБ/м) Р – волны в среднем, в 1,8 раза превышают значения S – волн (табл. 4.7).

```

~Curve information
# MNEM.UNIT          API CODE: CURVE DESCRIPTION
# -----:-----
DEPT.M              : Depth curve
A1_P.ye             :
A2_P.ye             :
ALFA_P.дБ/м        :
DT_P.мкс/м         :
T1_P.мкс           :
T2_P.мкс           :
~Parameter information block
# MNEM.UNIT          VALUE: DESCRIPTION
# -----:-----
~Other information
# ----- REMARKS AREA -----
# -----:-----
~ASCII Log Data
240.00  325.643  252.643  8.398  178.008  282.410  326.804
240.10  325.643  252.143  8.348  177.939  282.323  326.714
240.20  326.714  252.143  8.442  177.849  282.204  326.600
240.30  327.786  252.143  8.550  177.736  282.045  326.444
240.40  328.929  253.643  8.585  177.644  281.888  326.270
240.50  329.357  256.429  8.585  177.581  281.753  326.137
240.60  329.357  257.929  8.206  177.558  281.637  326.018
240.70  325.857  257.929  7.542  177.537  281.510  325.898
240.80  316.357  255.714  6.747  177.537  281.293  325.715
240.90  303.429  251.286  6.002  177.514  280.986  325.463
241.00  289.929  245.000  5.403  177.475  280.679  325.161
241.10  276.286  236.429  5.322  177.347  280.445  324.842

```

Рисунок 4.8 – Пример массива значений физических параметров горны пород, определённых методом АК по результатам исследований в стволе скважины Р-8

Таблица 4.6 – Оценка времен вступлений Р – и S – волн по всей протяжённости ствола скважины Р-8

	T1_P, мкс	T2_P, мкс	T1_S, мкс	T2_S, мкс	T1_S/T1_P	T2_S/T2_P
Сред. значение	324,71	370,89	467,39	542,21	1,4	1,5
Макс. значение	407,03	457,04	573,08	656,64	1,4	1,4
Мин. значение	277,75	322,22	422,57	467,89	1,5	1,5

Таблица 4.7 – Сравнение значений амплитуд и коэффициентов эффективного затухания Р – и S – волн в высокоскоростных породах на интервале 360,0 – 365,0 м. Скважина Р-8

	A1_P, у.е	A2_P, у.е	α_P , дБ/м	A1_S, у.е	A2_S, у.е	α_S , дБ/м	A1_S/ A1_P	A2_S/ A2_P	$\alpha_P /$ α_S
Сред. значение	299,82	207,32	19,35	3245,32	2167,57	9,94	10,82	10,46	1,79
Макс. значение	350,07	240,43	19,77	3775,2	2433,43	11,41	10,78	10,12	1,73
Мин. значение	249,57	174,21	18,93	2715,44	1901,71	10,22	10,88	10,92	1,85

В зоне низких скоростей, характерных для нарушений сплошности горной породы, а также на контактах различных типов горных пород амплитуда продольной волны может снижаться в т.ч. вплоть до полного исчезновения. Установленные по результатам ОФР водопроводящие интервалы, находящиеся в различных типах пород, характеризуются иными показателями как в части скоростных характеристик продольных и поперечных волн, так и по разностям значений амплитуд и коэффициентов эффективного затухания (таблицы 4.8 – 4.11).

Таблица 4.8 – Значения амплитуд и коэффициентов эффективного затухания Р – и S – волн в водопроводящем интервале 483,5 – 484,1 м. Скважина Р-8

	A1_P, у.е	A2_P, у.е	α_P , дБ/м	A1_S, у.е	A2_S, у.е	α_S , дБ/м	A1_S/ A1_P	A2_S/ A2_P	$\alpha_P /$ α_S
Сред. значение	284,57	213,68	20,06	1919,58	1740,54	16,76	6,74	8,14	1,74
Макс. значение	287,64	221,64	22,76	1985,35	1833,29	26,92	6,90	8,27	0,85
Мин. значение	281,5	205,71	17,35	1853,8	1647,79	6,6	6,59	8,01	2,63

Таблица 4.9 – Значения амплитуд и коэффициентов эффективного затухания Р – и S – волн в водопроводящем интервале 508,15 – 509,1 м. Скважина Р-8

	A1_P, у.е	A2_P, у.е	α_P , дБ/м	A1_S, у.е	A2_S, у.е	α_S , дБ/м	A1_S/ A1_P	A2_S/ A2_P	$\alpha_P /$ α_S
Сред. значение	196,09	168,82	17,75	2798,10	1738,63	18,19	14,29	10,38	0,99
Макс. значение	205,68	203,71	24,23	2855,36	2031,11	25,28	13,88	9,97	0,96
Мин. значение	186,5	133,93	11,26	2740,84	1446,14	11,09	14,70	10,80	1,02

Таблица 4.10 – Значения амплитуд и коэффициентов эффективного затухания Р – и S – волн в водопроводящем интервале 565.95 – 569.50 м. Скважина Р-8

	A1_P, у.е	A2_P, у.е	α_P , дБ/м	A1_S, у.е	A2_S, у.е	α_S , дБ/м	A1_S/ A1_P	A2_S/ A2_P	$\alpha_P /$ α_S
Сред. значение	346,57	276,64	14,32	1911,53	1535,39	12,24	5,52	6,54	1,22
Макс. значение	349,64	279,57	15,58	1929,08	1840,14	15,41	5,52	6,58	1,50
Мин. значение	343,50	253,71	13,05	1893,97	1230,64	9,07	5,51	4,50	1,44

Таблица 4.11 – Значения амплитуд и коэффициентов эффективного затухания Р – и S – волн в водопроводящем интервале 615,15 – 679,40 м. Скважина Р-8

	A1_P, у.е	A2_P, у.е	α_P , дБ/м	A1_S, у.е	A2_S, у.е	α_S , дБ/м	A1_S/ A1_P	A2_S/ A2_P	$\alpha_P /$ α_S
Сред. значение	274,04	158,42	19,77	1906,66	1485,45	17,39	7,47	9,37	1,40
Макс. значение	314,57	176,12	33,48	2637,88	1666,72	31,26	8,39	9,46	1,07
Мин. значение	179,5	140,71	6,05	1175,43	1304,17	3,51	6,55	9,27	1,72

4.5.3 Лабораторные оптико-акустические исследования монолитных образцов горных пород скважины Р-8

Риск ошибочного отнесения трещиноватых зон к потенциально водопрводящим может быть вызван некорректным выявлением трещин по результатам видеокаротажных обследований – например, трещина имеет минеральный наполнитель/закольматирована, сомкнута под действием литостатического давления или слишком малое простираие в глубину массива, что снижает вероятность ее попадания в водопрводящую сеть. Также при проведении каротажных обследований с применением АК не были определены скорости распространения волн в монолитных породах, что затрудняет определение корреляционных взаимосвязей на участках с единичными трещинами и диапазонов значений скоростей упругих волн на данных интервалах. С целью минимизации ошибки выделения трещиноватых интервалов в массиве скальных горных пород участка Енисейский была выполнена оценка значений скоростей продольных волн в монолитных участках горных пород в лабораторных условиях. Для лабораторных исследований были задействованы образцы горных пород, отобранные с различных глубин, в т.ч. в которых по результатам комплекса ГИС и видеокаротажных обследований были выявлены потенциально-водопрводящие участки/трещиноватые зоны. В ходе лабораторных испытаний, в частности, были задействованы образцы плагиогнейсов биотитовых, трахидолеритов и метадолеритов.

Для оценки скорости продольных волн в ненарушенных/монолитных образцах в лабораторных условиях использовался лазерно-ультразвуковой структуроскоп УДЛ-2М [150], работающий в режиме эхо-скопии при одностороннем доступе к исследуемому образцу. Данное оборудование и применённая методика лазерно-ультразвуковой дефектоскопии применяется для изучения структуры образцов горных пород, определения их анизотропии. Он также позволяет прецизионно измерять скорости упругих волн в образце горной породы [133, 134, 151, 154]. Диапазон измеряемых значений скоростей волн $2,0 - 7,0 \cdot 10^3$ м/с. Для проведения испытаний образцы горных пород участка Енисейский были нарезаны на пластины толщиной 5 мм (рис. 4.9), точность шлифовки образцов была выдержана в диапазоне 0,1-0,3 мм, что соответствует требованиям к подготовке образцов для проведения измерений на УДЛ-2М (рис. 4.10). Перед проведением тестовых замеров скоростей продольных волн в образцах горных пород, дополнительно были определены значения коэффициента открытой пористости для каждого образца с применением методики насыщения водой [135]. Данные замеры были проведены для выявления в образцах дефектов в виде пор или открытых трещин.

Принцип действия структуроскопа основан на лазерном термооптическом возбуждении широкополосных ультразвуковых импульсов в исследуемом материале, приеме

импульсов, прошедших материал полностью или частично по толщине в прямом и обратном направлениях, и анализе параметров принятых импульсов [152].



Глубина отбора – 424,0 м



Глубина отбора – 538,0 м



Глубина отбора – 567,0 м



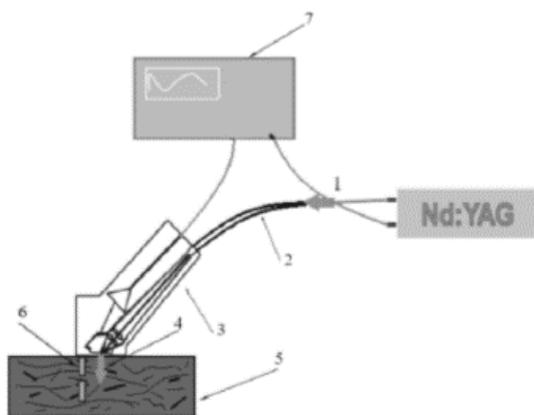
Глубина отбора – 530,0 м

Рисунок 4.9 – Образцы горных пород участка Енисейский, задействованные для лабораторных тестовых замеров скоростей прохождения продольных волн

Для измерений скорости распространения ультразвуковых волн используется время-пролетный метод измерений – по известной толщине образца или базы преобразователя и измеряемой разности времен прихода на пьезоприемник преобразователя зондирующего ультразвукового импульса и сигнала, отраженного от тыльной поверхности образца, рассчитывается скорость продольных ультразвуковых волн в образце [134]. Скорость распространения продольных волн V_p высчитывается по разнице времени прихода волны Δt_h , между донным и опорным сигналом, при этом толщина образца горной породы известна. Относительная погрешность вычислений значений скоростей продольных волн не превышает 1% [154].

$$V_p = \frac{2h}{\Delta t_h} . \quad (4.5)$$

где h – толщина образца горной породы, Δt_h – разница времени прихода волны.



- 1 – мпульсно-периодический YAG:Nd лазер;
- 2 – кабель оптоволоконный;
- 3 – пьезопреобразователь;
- 4 – ультразвуковой импульс;
- 5 – исследуемый образец горной породы;
- 6 – отражённые сигналы;
- 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Рисунок 4.10 – Схема проведения лазерно-ультразвуковой диагностики с применением структуроскопа УДЛ-2М [133]

Таблица 4.12 – Результаты лабораторных исследований образцов горных пород участка Енисейский

№	Глубина отбора образца, м / измерение	Скорость Р – волн, м/с	Кэфф. пористости, %	Наименование породы
1	424,0 / 1	5659	0,1	Плагииогнейсы биотитовые
	424,0 / 2	5598		
2	538,0 / 1	5214	0,3	Плагииогнейсы биотитовые /Метадолериты
	538,0 / 2	5241		
	538,0 / 3	5264		
	538,0 / 4	5925		
3	567,0 / 1	5837	0,1	Трахидолериты
	567,0 / 2	5940		
	567,0 / 3	6149		
4	530,0 / 1	5907	0,2	Метадолериты

Полученные результаты лабораторного определения скорости Р – волн (таблица 4.12) были задействованы в качестве количественных критериев для отнесения интервалов к монолитным участкам горных пород, выявленным по результатам комплекса ГИС.

Как уже было отмечено в предыдущем разделе, применённое в ходе ГИС оборудование АК позволяет получать количественные значений параметров распространения Р – и S – волн горной породе (рис. 4.8). С задействованием результатов лабораторных определений скорости Р – волны были выделены схожие значения скорости Р – волн в наборе первичных данных, полученных по итогам АК, определены таким образом амплитуды и коэффициенты эффективного затухания для данного типа волн в монолитных зонах, вскрытых скважиной Р-8. Аналогичным образом были определены характеристики S-волн (скорости, амплитуды и коэффициенты эффективного затухания) для данных глубинных отметок положения монолитных интервалов.

Дополнительно на данных глубинных отметках были установлены значения интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs), регистрируемые оборудованием ГГК-П и характеризующие плотностные параметры перечисленных в таблице 4.12 типов горных пород. Полученные значения геофизических параметров для монолитных интервалов горных пород (таблица 4.13) стали основой для оценки степени изменения соответствующих значений, регистрируемых методами АК и ГГК-П на выявляемых в ходе видеокаротажных обследований трещиноватых участках горных пород и формирования критериев отнесения трещиноватых участков к потенциально водопроницаемым.

Таблица 4.13 – Количественные характеристики значений геофизических параметров на глубинах залегания монолитных горных пород в стволе скважины Р-8

№	Глубинные отметки, м	330,0	538,1	559,0	559,6
	Параметры	Монолитные породы			
		Типы пород	Плагиогнейсы биотитовые	Плагиогнейсы биотитовые/ Метадолериты	Метадолериты
1	V_p - скорости Р-волн, м/с	5620	5542	6057	5971
2	A1_P - фиксируемые приёмником №1 амплитуды, у.е.	355	260	350	344
3	A2_P - фиксируемые приёмником №2 амплитуды, у.е.	240	209	299	188
4	α_P - коэффициенты эффективного затухания, дБ/м	17	16	12	14
5	V_s - скорости S-волн, м/с	3794	3562	3646	3799
6	A1_S - фиксируемые приёмником №1 амплитуды, уе	3784	2927	2102	2724
7	A2_S- фиксируемые приёмником №2 амплитуды, у.е.	2533	2277	1829	1824
8	α_S - коэффициенты эффективного затухания, дБ/м	12	11	10	12
9	Плотностные показатели горных пород по данным гамма-гамма плотностного каротажа, $\cdot 10^4$ имп/мин	50,34	51,29	43,61	44,79

Для этого представленные в таблице 4.13 значения скоростей, амплитуд, коэффициентов эффективного затухания Р- и S- волн, а также интенсивности поглощения искусственного γ -излучения были сопоставлены с соответствующими значениями на подтверждённых по результатам ОФР водопроницаемых интервалах (табл. 4.14).

Таблица 4.14 – Количественные характеристики значений геофизических параметров горных пород на водопродводящих и монолитных интервалах в скважине Р-8

№	Глубинные отметки, м	483,5 – 484,1	508,15– 509,1	565,95–569,50	615,15–679,40	330,0	538,1	559,0	559,6	
	Параметры	Типы пород	Трещиноватые водопродводящие				Монолитные породы			
			Плагиогнейсы биотитовые	Плагиогнейсы биотитовые	Метадолериты/трахидолериты	Гнейсы биотитовые/металотериты/трахидолериты/	Плагиогнейсы биотитовые	Плагиогнейсы биотитовые/Метадолериты	Метадолериты	Трахидолериты
1	V _p - скорости Р-волн, м/с	5495-5456	5489-5352	5811-5273	5478-4918	5620	5542	6057	5971	
2	A1_P - фиксируемые приёмником №1 амплитуды, у.е.	288-282	206-187	350-344	315-141	355	260	350	344	
3	A2_P - фиксируемые приёмником №2 амплитуды, у.е.	222-206	204-134	280-274	176-141	240	209	299	188	
4	α_P - коэффициенты эффективного затухания, дБ/м	23-17	24-11	16-13	34-6	17	16	12	14	
5	V _s - скорости S-волн, м/с	3403-3215	3250-3193	3346-2938	3608-2976	3794	3562	3646	3799	
6	A1_S - фиксируемые приёмником №1 амплитуды, уе	1985-1854	2855-2741	1929-1894	2638-1175	3784	2927	2102	2724	
7	A2_S- фиксируемые приёмником №2 амплитуды, у.е.	1833-1648	2031-1446	1840-1231	1667-1304	2533	2277	1859	1824	
8	α_S - коэффициенты эффективного затухания, дБ/м	27-7	25-11	15-9	31-4	12	11	10	12	
9	Плотностные показатели горных пород по данным гамма-гамма плотностного каротажа, ·10 ⁴ имп/мин	49,76-48,76	49,27-47,61	42,09-41,10	43,05-41,34	50,34	51,29	43,61	44,79	
10	Кол-во трещин, выявленных в интервале по данным видеокаротажных обследований, шт	7	9	114	173	0	0	0	0	

По итогам сравнительного анализа геофизических параметров горных пород на монолитных участках и непосредственно на глубинах расположения трещин установлено, что:

– в трещиноватых биотитовых гнейсах (интервал 483,5-484,1 м), наблюдается снижение скоростей Р волн на 3 % (5456 м/с) в сравнении с монолитной породой. Скорости S-волн на 15 % (3215 м/с) меньше, чем в монолитных породах. Наблюдается уменьшение средних значений амплитуд Р- и S- волн, на 17% и 45%, а также рост значений коэффициентов эффективного затухания Р- и S- волн на 25% (Значения α_P : 21 дБ/м) и на 43% (Значения α_S : 17 дБ/м). Уменьшение на 3%: ($48,76 \cdot 10^4$ имп/мин) плотностных показателей, характеризующихся снижением интенсивности поглощения искусственного γ -излучения, по сравнению с монолитными породами;

– в трещиноватых биотитовых гнейсах (интервал 508,15-509,1 м), наблюдается снижение скоростей Р волн на 3 % (5352 м/с) в сравнении с монолитной породой. Скорости S-волн на 10 % (3193 м/с) меньше, чем в монолитных породах. Наблюдается уменьшение средних значений амплитуд Р- и S- волн на 32% и 29%, а также рост значений коэффициентов эффективного затухания Р- и S- волн на 24% (Значения α_P : 20 дБ/м) и на 76% (Значения α_S : 19 дБ/м);

– отмечено существенное снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения на 7%, зафиксированное в интервале 508,15-509,1 м ($47,61 \cdot 10^4$ имп/мин). Это может быть связано с тем, что на участке 508,3-508,5 м по данным видеокаротажных обследований зафиксирована повышенная концентрация трещин (5 трещин с величиной раскрытия 1-2 мм на 20 см участок), что является дополнительным подтверждением о наличии в данном интервале глубин водопроницающих трещин;

– в интервале 565,95-569,50 м, представленном более плотными, чем гнейс, долеритами наблюдается снижение скоростей Р волн на 13 % (5273 м/с) в сравнении с монолитной породой. Скорости S-волн на 19 % (2976 м/с) меньше, чем в монолитных породах. Наблюдается уменьшение средних значений амплитуд Р- и S- волн на 9% и 26%, а также рост значений коэффициентов эффективного затухания Р- и S- волн на 16% и 27% (значения α_P : 14 дБ/м; значения α_S : 13 дБ/м). Для участка с высокой концентрацией трещин - в диапазоне глубин 566,3-567,1 м (22 трещины на 80 см с раскрытием 1-5 мм) характерны снижения скоростей Р- и S- волн на 13 и 19% (5273 и 2938 м/с) и рост значений коэффициентов эффективного затухания – на 20 и 35% (Значения α_P : 16 дБ/м; Значения α_S : 15 дБ/м). Также зафиксировано на 6%: ($41,10 \cdot 10^4$ имп/мин) плотностных показателей - снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения;

В наиболее протяжённом интервале 615,15-679,40, представленном, преимущественно, биотитовыми гнейсами и маломощными участками долеритов, трещиноватость пород распределена достаточно равномерно, а плотность трещинной сети по данным видеокаротажных

наблюдений не превышает, в среднем, 7 трещин на погонный метр по результатам видеокаротажных исследований. В интервале глубин 630,3 – 631,5 м наблюдается низкоскоростной участок, для которого характерны значения P- и S- волн 4918 и 2976 м/с, что меньше на 18 и 22 % по сравнению с монолитной породой. Отмечено наиболее существенное уменьшение средних значений амплитуд P- и S- волн на 46% и 64%. Рост коэффициентов эффективного затухания (Значения α_P : 27 дБ/м; Значения α_S : 13 дБ/м) на данном участке составил 12% и 19% соответственно. В данном участке наблюдается концентрация трещин с раскрытием 1-5 мм (порядка 12 трещин на 100 см). Отмечается уменьшение на 8% ($41,34 \cdot 10^4$ имп/мин) поглощения искусственного γ -излучения, что в т.ч. может свидетельствовать о достаточной чувствительности метода для участков с рассеянной трещиноватостью.

Выводы

По итогам выполненного сравнительного анализа результатов видеокаротажных исследований, геофизических исследований с применением методик акустического каротажа, электрических и радиоизотопных исследований на подтверждённых поинтервальными опытно-фильтрационными работами водопродводящих интервалах ствола скважины Р-8 установлен комплекс скважинных методов и соответствующих им значений показателей горных пород:

- в состав комплекса методов должны быть включены: видео-, гамма-гамма плотностной и акустический каротажи;
- определено, что критерием для надежного выявления потенциально водопродводящих интервалов является: средние значения снижения скоростей прохождения (V) и амплитуд (A) P-волн на 9% и 20%, S-волн на 20% и 41%; увеличения значений коэффициентов эффективного затухания (α) на 20% и 42% для P- и S- волн соответственно; снижение интенсивности искусственного γ -излучения (^{137}Cs) в среднем, на 6%.
- установлено, что наличие водопродводимости в выделенных трещиноватых интервалах должно быть подтверждено по итогам выполнения поинтервальных ОФР.

Данные результаты легли в основу первого и второго научных положений.

Глава 5. Оценка анизотропии водопроводящих свойств трещиноватых участков массива

По итогам обработки результатов видеокаротажных исследований в сети скважин участка Енисейский с использованием разработанного в рамках данного диссертационного исследований каротажного комплекса были определены пространственные положения, величины раскрытия трещин и интенсивность трещиноватости на различных глубинных отметках стволов сети скважин участка Енисейский. Полученные количественные характеристики трещин, определённые по итогам обработки результатов видеокаротажных исследований (Глава 3), были использованы для вычисления значений тензора проницаемости в потенциально водопроводящих интервалах стволов скважин. Предположение о задействовании в подземных гидродинамических процессах интервалов обследованных скважин было сформировано по итогам сравнительного анализа физических характеристик горных пород (АК и ГГК-II) на участках с открытыми трещинами в стволах скважин 1-Е, Р-1, Р-3, Р-4, Р-5 и на подтверждённых по итогам ОФР трещиноватых водопроводящих интервалах ствола скважины Р-8. Соответственно, были задействованы определенные в предыдущей главе критерии для надежного выявления потенциально водопроводящих интервалов. С учётом имеющихся данных о строении горного массива участка Енисейский, а также о геофизических параметрах горных пород геологического разреза (рис. 5.1 – 5.3), применение данных критериев является оправданным для формирования предположений о наличии в выявленных трещиноватых участках подземных гидродинамических процессов. При этом однозначный вывод об отнесении выделенных трещиноватых зон к водопроводящим может быть сформирован только по итогам поинтервальных ОФР с применением методических подходов и оборудования, описанных в главе 4. В соответствии с вышеперечисленными критериями к потенциально водопроводящим интервалам были отнесены интервалы глубин, перечень которых представлен в табл. 5.1.

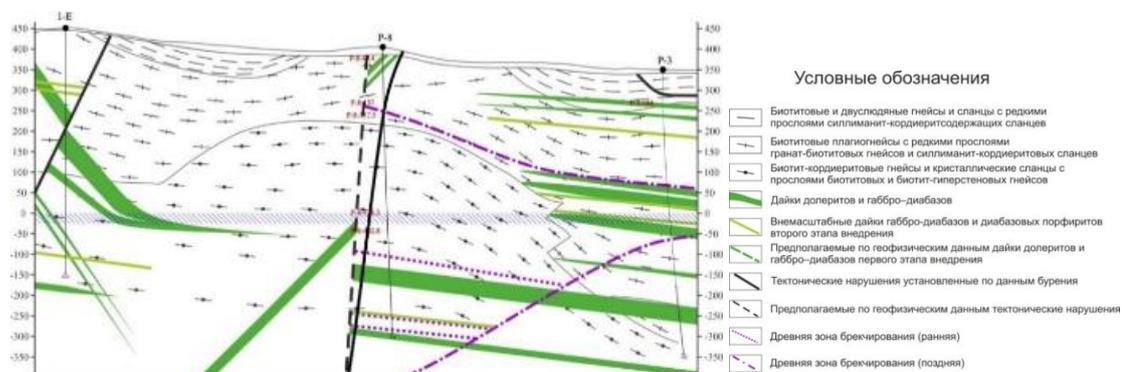


Рисунок 5.1 – Схематический геолого-структурный разрез по профилю 1-Е – Р-8 –Р-3

Таблица 5.1 – Перечень и характеристики потенциально водопрводящих глубинных интервалов в стволах скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е

№	Интервал		Типы пород	Количество трещин в интервале*, шт.
	Глубинная отметка, м. (Отн. / Абс.)	Длина, м		
Р-1				
1	529,95 – 539,7 / -171,3 – -181,05	9,75	Гнейсы биотитовые	7
2	568,0 – 604,0 / -209,35 – -245,35	36,0	Метадолериты	17
Р-3				
3	374,0 – 382,9 -24,00 – -32,90	8,9	Плаггиогнейсы Биотитовые, Метадолериты	12
Р-4				
4	538,9 – 548,1 / -134,12 – -143,32	9,20	Метадолериты, трахидолериты, Плаггиогнейсы биотитовые	76
5	556,6 – 557 / -151,82 – -152,22	0,4	Метадолериты	14
Р-5				
6	329,4 – 348,7 / +44,09 – +4,79	19,3	Плаггиогнейсы биотитовые, Метадолериты	18
7	433,9 – 447,95 / -60,41 – -76,46	14,05	Метадолериты	33
8	515,25 – 518,15 -141,76 – -144,66	2,90	Метадолериты, Плаггиогнейсы биотитовые	11
1-Е				
9	384,4 – 397,6 +70,5 – +57,3	13,2	Метадолериты/ плаггиогнейсы	41
10	408,35-435,5 +46,55 – +19,4	27,15	Плаггиогнейсы биотитовые	110

* – по данным видеокаротажных обследований скважин.

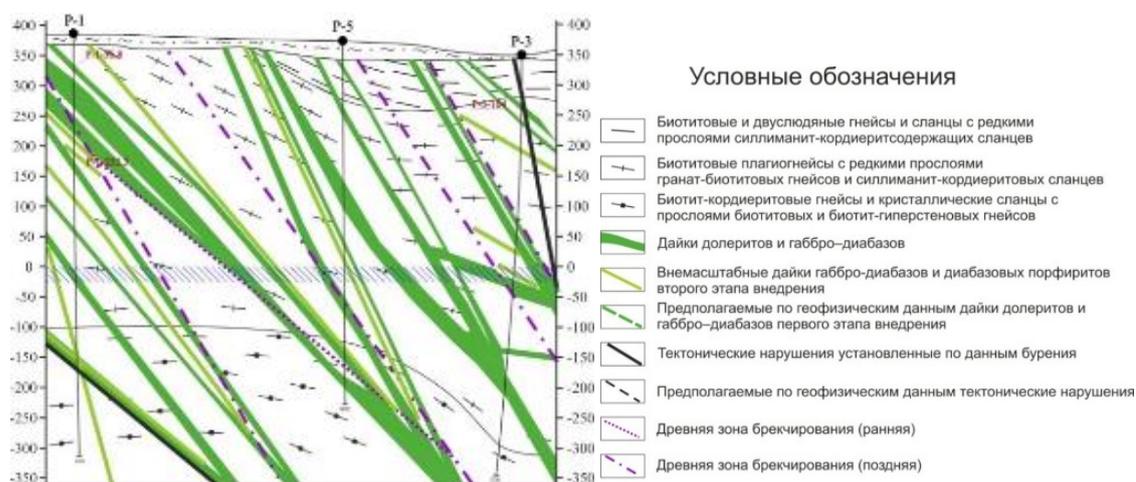


Рисунок 5.2 – Схематический геолого-структурный разрез по профилю P-1 – P-5 – P-3

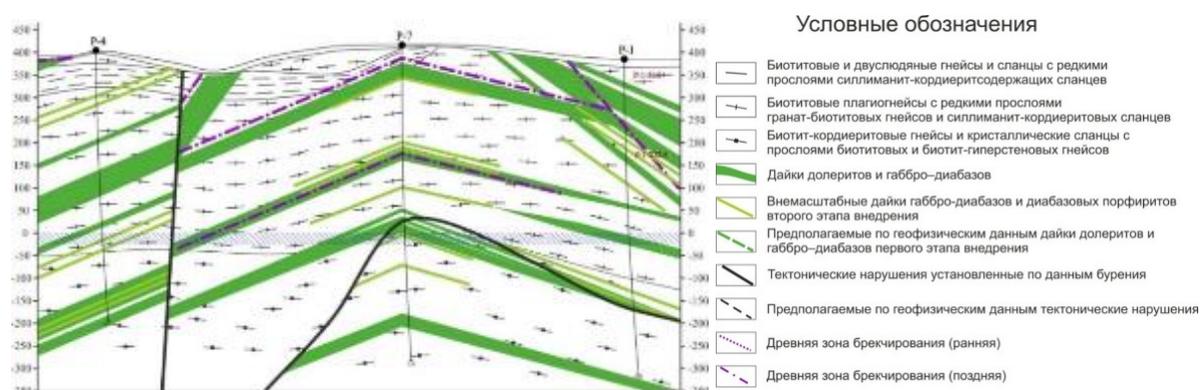


Рисунок 5.3 – Схематический геолого-структурный разрез по профилю P-4 – P-7 – P-1

5.1 Алгоритм оценки анизотропии фильтрационных свойств водопроводящих интервалов

Для вычисления тензора трещинной проницаемости в трещиноватых интервалах был применен подход, предложенный Е.С. Роммом, согласно которому модель трещиноватой горной породы представляет собой непроницаемый материал, рассеченный трещинами (системами трещин), каждая из которых характеризуется количественными значениями раскрытия и пространственной ориентировкой. С использованием параметров трещин и данных по их пространственному положению можно количественно охарактеризовать неоднородность водопроводящих свойств трещиноватого интервала через величины коэффициента трещинной проницаемости (k_n). Коэффициент трещинной проницаемости в любом совпадающем с градиентом давления направлении оценивается из выражения (4.6) [33, 92]. Неравномерность распределения значений k_n (м^2 , см^2 , мм^2), полученных с помощью

выражения (4.6), может быть продемонстрирована как в виде диаграмм - эллипсов, так и объёмных графиков – эллипсоидов трещинной проницаемости.

$$k_n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^N b_i^3 \Gamma_i \left\{ 1 - [\sin \omega_i (\cos \delta_i \cos \beta - \sin \delta_i \cos \alpha) + \cos \omega_i \cos \gamma]^2 \right\} \quad (4.6)$$

где ω_i и δ_i – угол и азимут падения системы трещин i -го номера; α , β и γ - углы между вектором градиента давления, совпадающим с направлением, в котором измеряется k_n и координатными осями X, Y, Z. Γ_i – интенсивность трещиноватости, характеризуемая, как отношение площади трещин к единице объема горного массива (м^{-1}), b_i – раскрытие трещины (м). Интенсивность трещиноватости ($\text{м}^2/\text{м}^3$) - отношение площади трещин к единице объема трещиноватого горного массива [148, 149].

Для каждого потенциально водопроницающего интервала, выделенного по итогам комплекса каротажных обследований в скважинах Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е с использованием полученных количественных характеристиках трещин определены значения k_n . Расчёт значений k_n производился по каждой потенциально водопроницающей трещины в интервале с учётом параметра интенсивности трещиноватости Γ_i , характерной для сети трещин в интервале. Полученные расчётные значения k_n представлены на рис. 5.4 – 5.8 в виде диаграмм, отражающих зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и всевозможных направлений вектора направления градиента давления в пространстве. Диаграммы, представленные на рис. 5.4 – 5.8 являются проекцией на горизонтальную плоскость эллипсоида трещинной проницаемости, отражающего объёмную неоднородность значений k_n . Для более полного представления о неоднородности k_n в потенциально водопроницающих интервалах на рис. 5.9 представлены примеры объёмных графиков значений (эллипсоиды) трещинной проницаемости k_n в выделенных трещиноватых интервалах.

По результатам анализа приведенных на рис. 5.4 – 5.8 диаграмм трещинной проницаемости (k_n) и количественных характеристик трещин, включая их пространственное положение отмечено, что во всех выделенных потенциально водопроницающих интервалах скважин распределение значений k_n коррелирует с положением трещин. Пространственное положение трещины и ее раскрытие способны оказать существенное влияние на расчётное значение k_n , измеряемое в направлении, совпадающем с градиентом давления, что отчётливо заметно при сопоставлении данных, представленных на рис. 5.10. Отмечено, что с увеличением протяженности интервала и плотности трещинной сети возрастает анизотропия значений k_n . Но вне зависимости от плотности трещинной сети и протяженности потенциально

водопродящих интервалов сохраняется возможность определения преобладающих направлений минимальных и максимальных значений k_n .

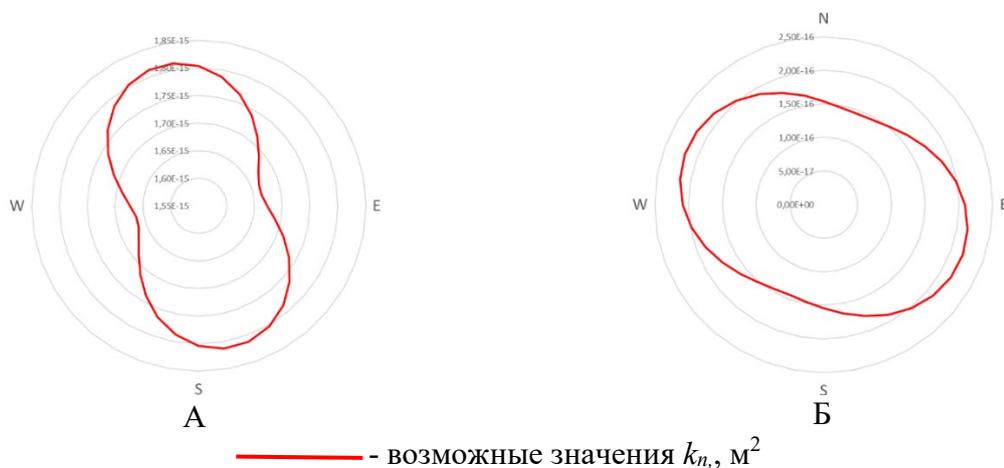


Рисунок 5.4 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (м^2) для потенциально водопродящих интервалов ствола скважины Р-1: интервал 529,95 – 539,7 м (А), интервал 568,0-604,0 м (Б)

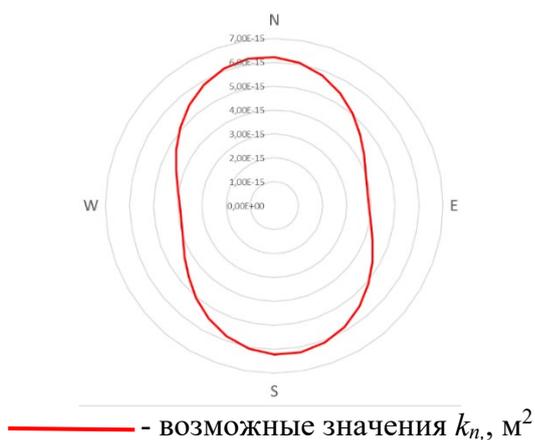


Рисунок 5.5 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (м^2) для потенциально водопродящего интервала ствола скважины Р-3: интервал 374,0-382,9 м

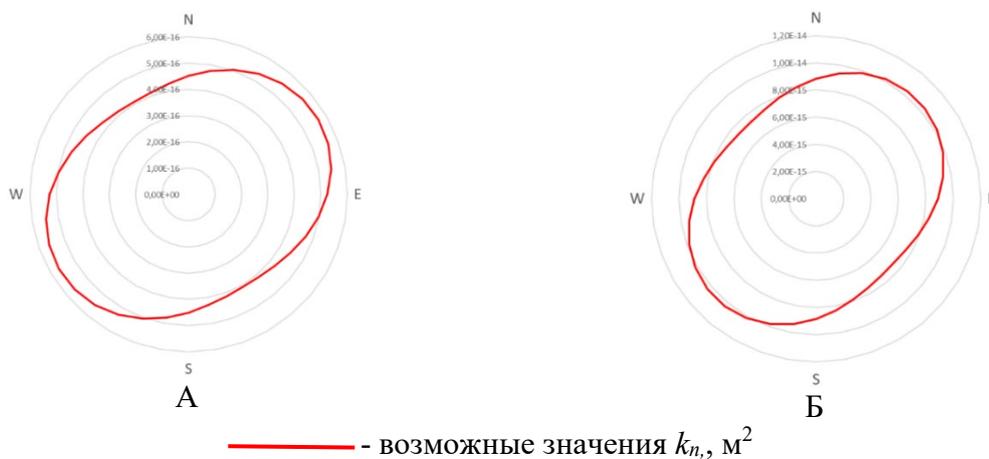
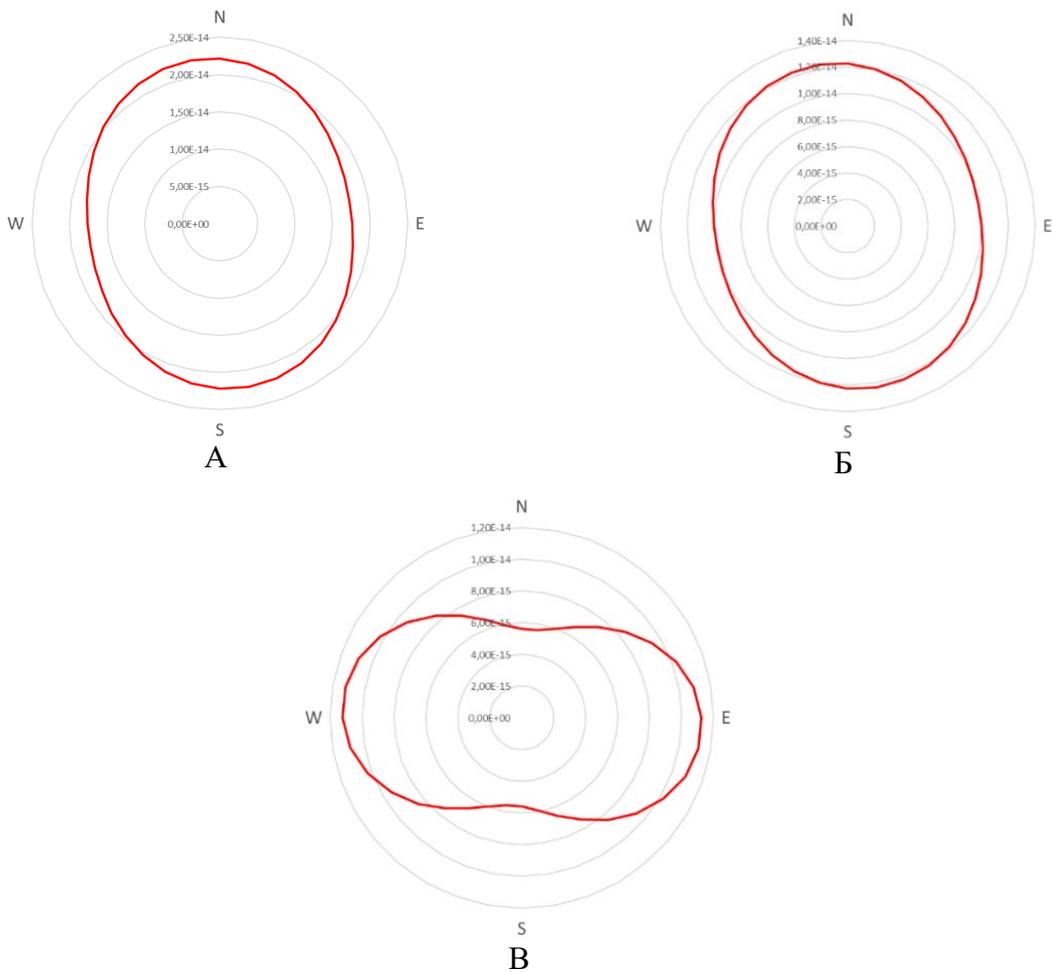
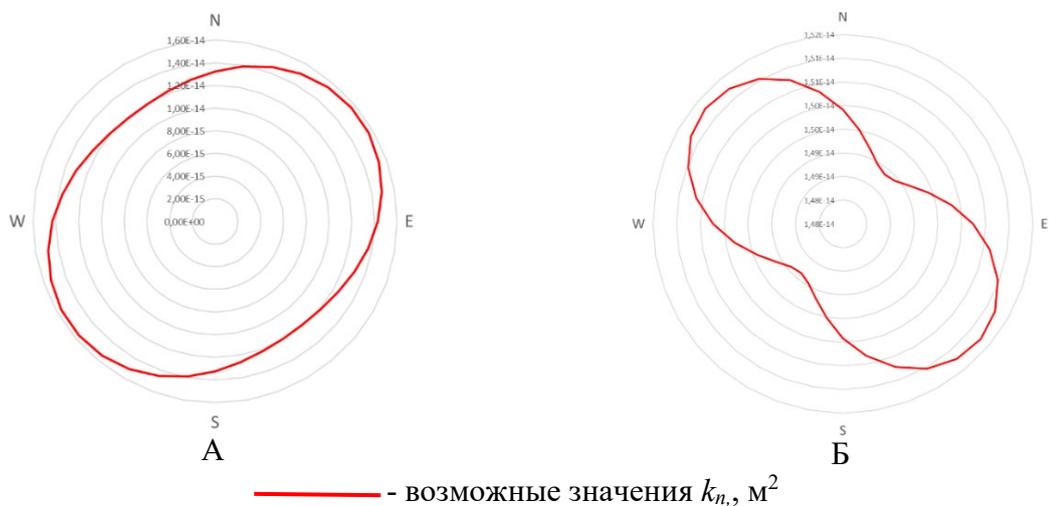


Рисунок 5.6 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (м^2) для потенциально водопродящих интервалов ствола скважины Р-4: интервал 538,9-548,1м (А), интервал 556,6-557,0м (Б)



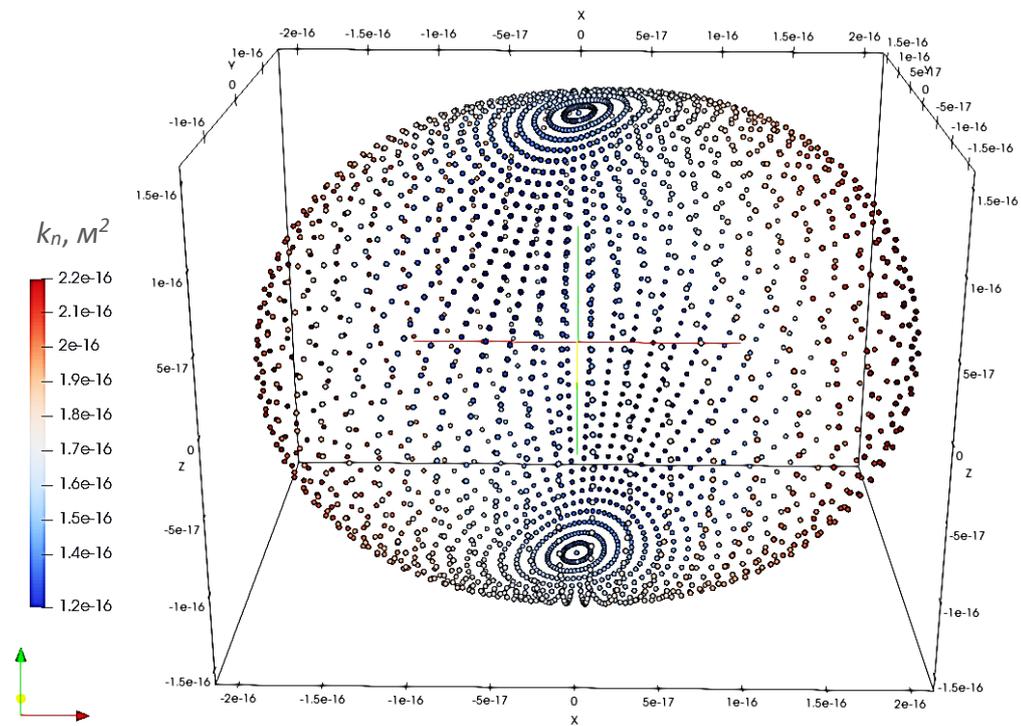
— - возможные значения $k_n, \text{ м}^2$

Рисунок 5.7 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (м^2) для потенциально водопрводящих интервалов ствола скважины Р-5: интервал 329,4-348,7 м (А), интервал 433,9-447,95 м (Б), интервал 515,25-518,15 (В)

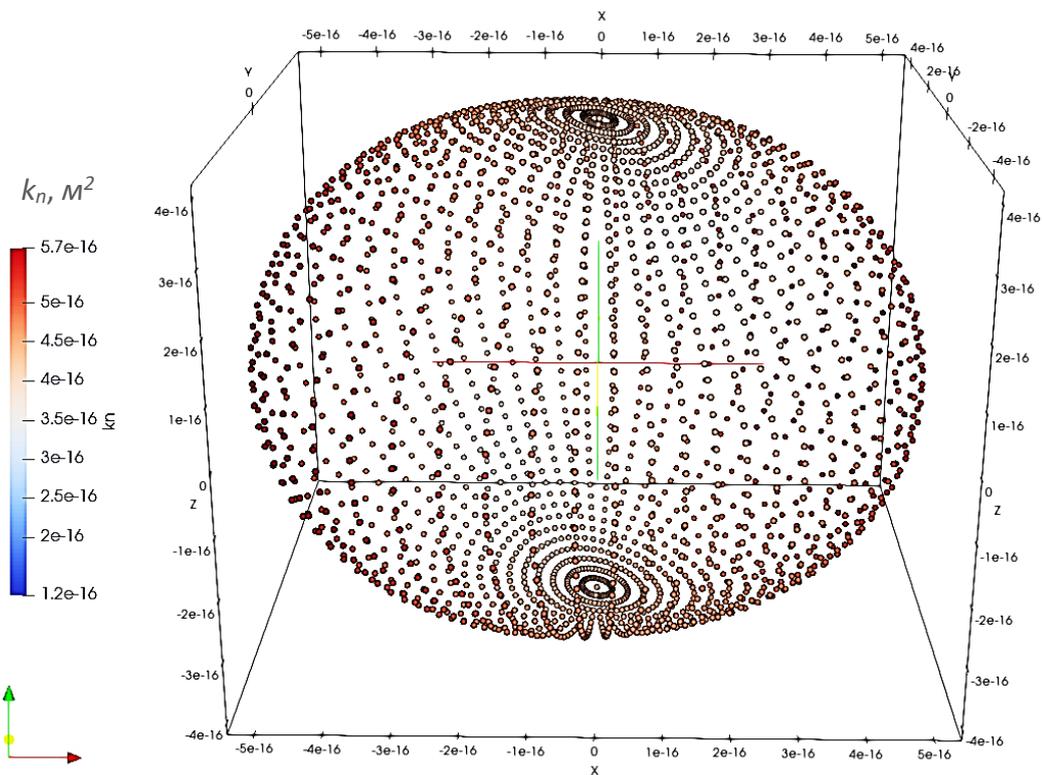


— - возможные значения $k_n, \text{ м}^2$

Рисунок 5.8 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (м^2) для потенциально водопрводящих интервалов ствола скважины 1-Е: интервал 384,4-397,61 м (А), интервал 408,35-435,5 м (Б)



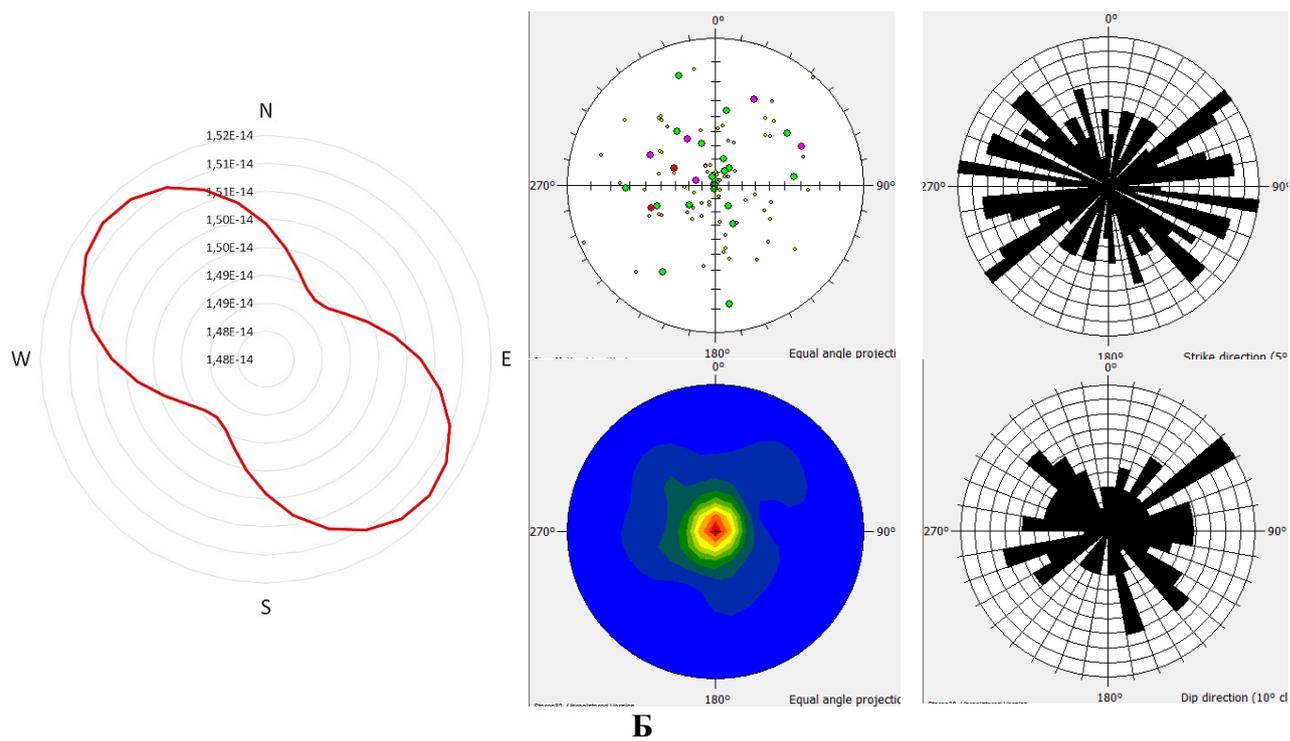
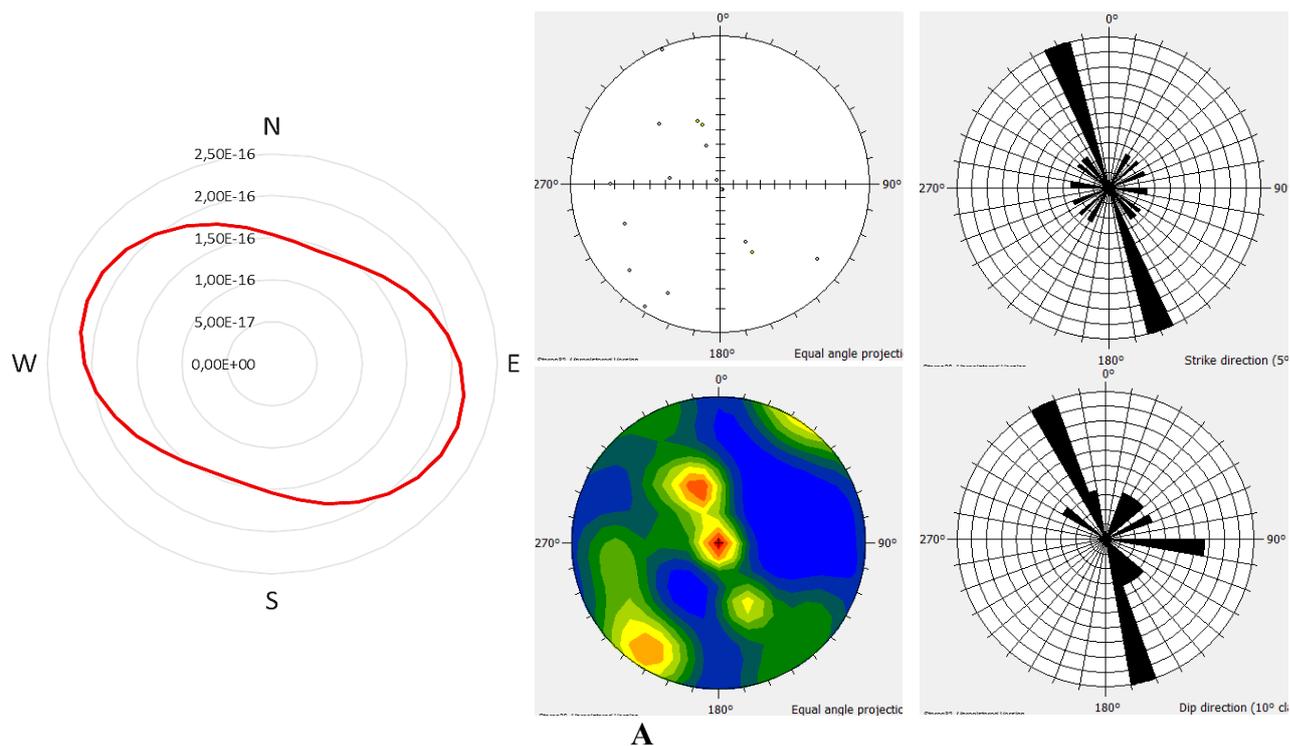
А



Б

• - минимальное значение $k_n, \text{ м}^2$; • - максимальное значение $k_n, \text{ м}^2$

Рисунок 5.9 – Объёмные графики значений k_n (м^2) для трещиноватых потенциально водопродвижающих интервалов стволов скважин: Р-1, интервал 568,0-604,0 м (А); Р-4, интервал 556,7-557,0 м (Б) [138]



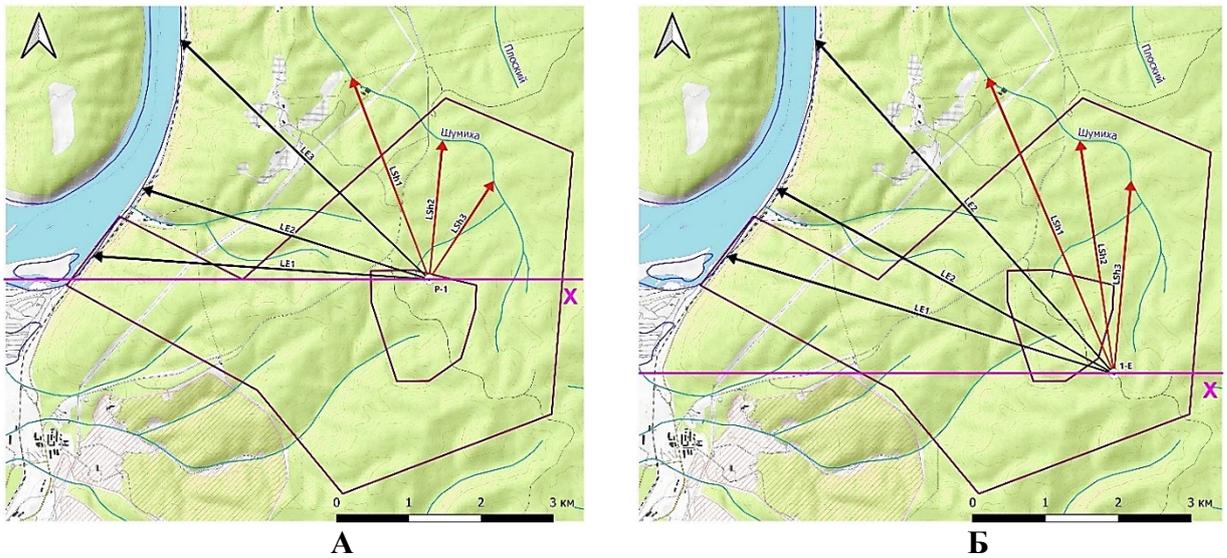
Раскрытие трещин:
 ● - 1 мм; ● - 2 мм; ● - 3 мм; ● - 4 мм; ● - 5 мм;
 мм;

Рисунок 5.10 – Зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и их раскрытия в потенциально водопроницающих интервалах скважин: Р-1, интервал: 568,0-604,0 м (А); 1-Е, интервал 408,35 – 435,5 м (Б)

5.2 Оценка неоднородности водопроводящих свойств трещиноватых участков в зависимости от возможных направлений движения подземных вод

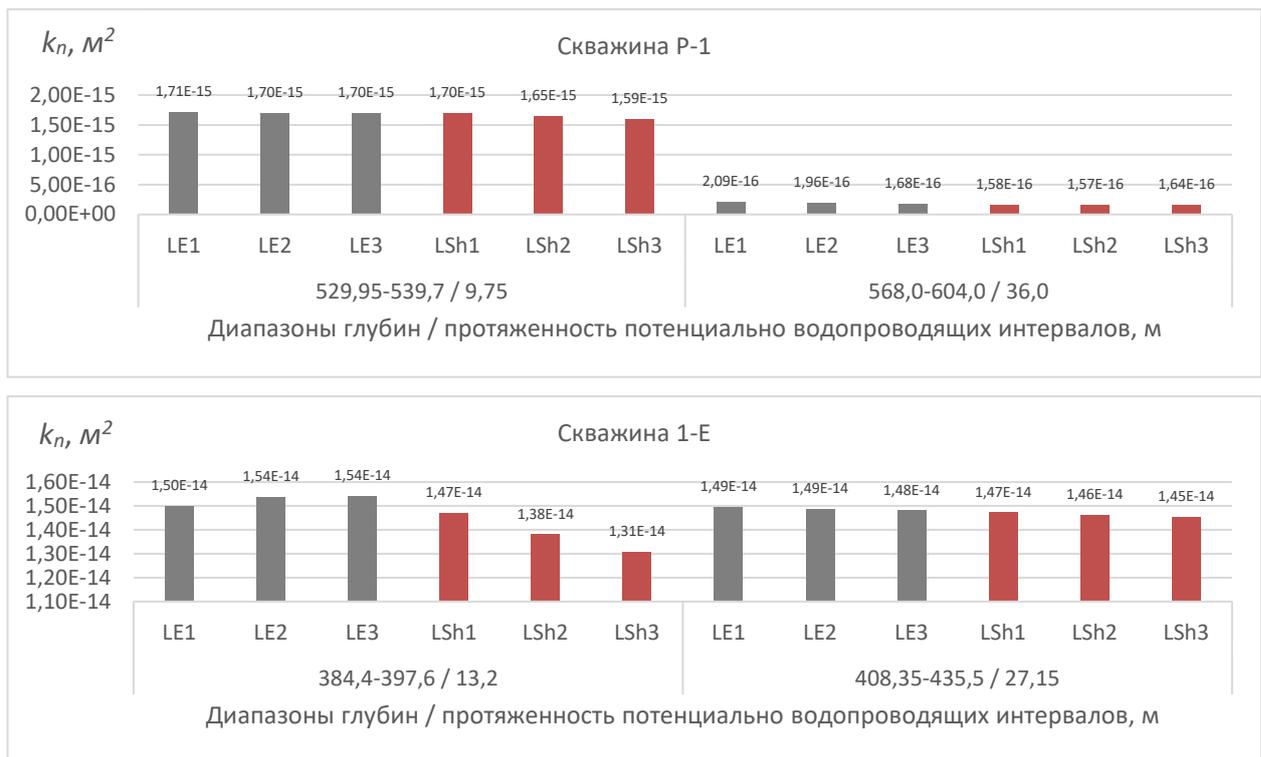
Для определения закономерности распределения значений k_n в потенциально водопроводящих трещиноватых интервалах стволов скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е были заданы направления движения подземной воды от оси скважин до, определённых модельными расчётами зон разгрузки, а именно русел: р. Енисей [136] и р. Шумиха [137]. Длины векторов, определенные как кратчайшее расстояние между глубиной залегания потенциально водопроводящих интервалов в стволах скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е и предполагаемыми зонами разгрузки подземных вод, послужили основой для вычисления углов векторов градиентов давлений между координатными осями X, Y, Z (α, β, γ). Далее с применением выражения (1) были вычислены значения k_n по каждому водопроводящему интервалу в направлениях LE (1-3) и LSh (1-3) (рис. 5.11). Пример графической иллюстрации неравномерности распределения значений k_n в потенциально водопроводящем интервале ствола скважины представлен на рис. 5.12. На рис. 5.11 чёрными и красными стрелками показаны предполагаемые направления потоков подземных вод от скважины Р-1 и 1-Е до вероятных мест их разгрузки в направлениях к р. Енисей и р. Шумиха. По итогам анализа полученных результатов (рис. 5.12.) было установлено, что на различных глубинах, согласно заданным расчётным направлениям векторов градиентов давлений, наблюдается неравномерное распределение минимальных и максимальных значений трещинной проницаемости k_n . Отмечено, что с ростом глубины водопроводящего интервала наблюдается смена положения максимальных и минимальных значений трещинной проницаемости в направлениях расчётных зон разгрузки подземных вод (р. Шумиха и р. Енисей).

Вычисленные с помощью выражения (1.2) значения коэффициента фильтрации (k_f) для потенциально водопроводящих интервалов находятся в диапазоне $6,3 \cdot 10^{-3} - 1,24 \cdot 10^{-4}$ м/сут, что соответствует значениям слабопроницаемых горных пород и совпадает с диапазоном значений k_f , определённых по итогам обработки результатов скважинных опытно-фильтрационных исследований, выполненных в скважинах Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е, Р-8 [138]. При этом вне зависимости от направлений движения подземных вод (градиентов давлений) эллипсы, характеризующие возможные значения k_n для каждого водопроводящего интервала, могут быть ориентированы как в направлении р. Енисей, так и в направлении р. Шумиха. Для наглядного представления данного вывода на схему расположения сети скважин участка Енисейский вынесены диаграммы значений трещинной проницаемости k_n (эллипсы красного цвета), составленные для соответствующих потенциально водопроводящих интервалов в стволах скважин (рис. 5.13).



- ← - LE (1-3) – предполагаемые направления движения подземных вод в сторону р. Енисей;
- - LSh (1-3) – предполагаемые направления движения подземных вод в сторону р. Шумиха.

Рисунок 5.11 – Предполагаемые направления движений подземных вод в пределах участка Енисейский к зонам разгрузки от скважин: P-1 (А) и 1-Е (Б) [138]



- ← - LE (1-3) – предполагаемые направления движения подземных вод в сторону р. Енисей
- - LSh (1-3) – предполагаемые направления движения подземных вод в сторону р. Шумиха

Рисунок 5.12 – Результаты оценки неравномерности распределения максимальных значений k_n на потенциально водопроницаемых интервалах стволов скважин P-1, 1-Е в зависимости от направлений векторов градиентов давлений, совпадающих с расчётными направлениями зон разгрузки подземных вод [138]

Как видно из диаграмм (эллипсы красного цвета на рис. 5.13), центры которых совмещены с положением осей стволов скважин, на схожих глубинных отметках положения (диапазоны глубин залегания потенциально водопрводящих интервалов представлены в Балтийской системе высот) наблюдается разнонаправленность возможных максимальных и минимальных значений k_n .

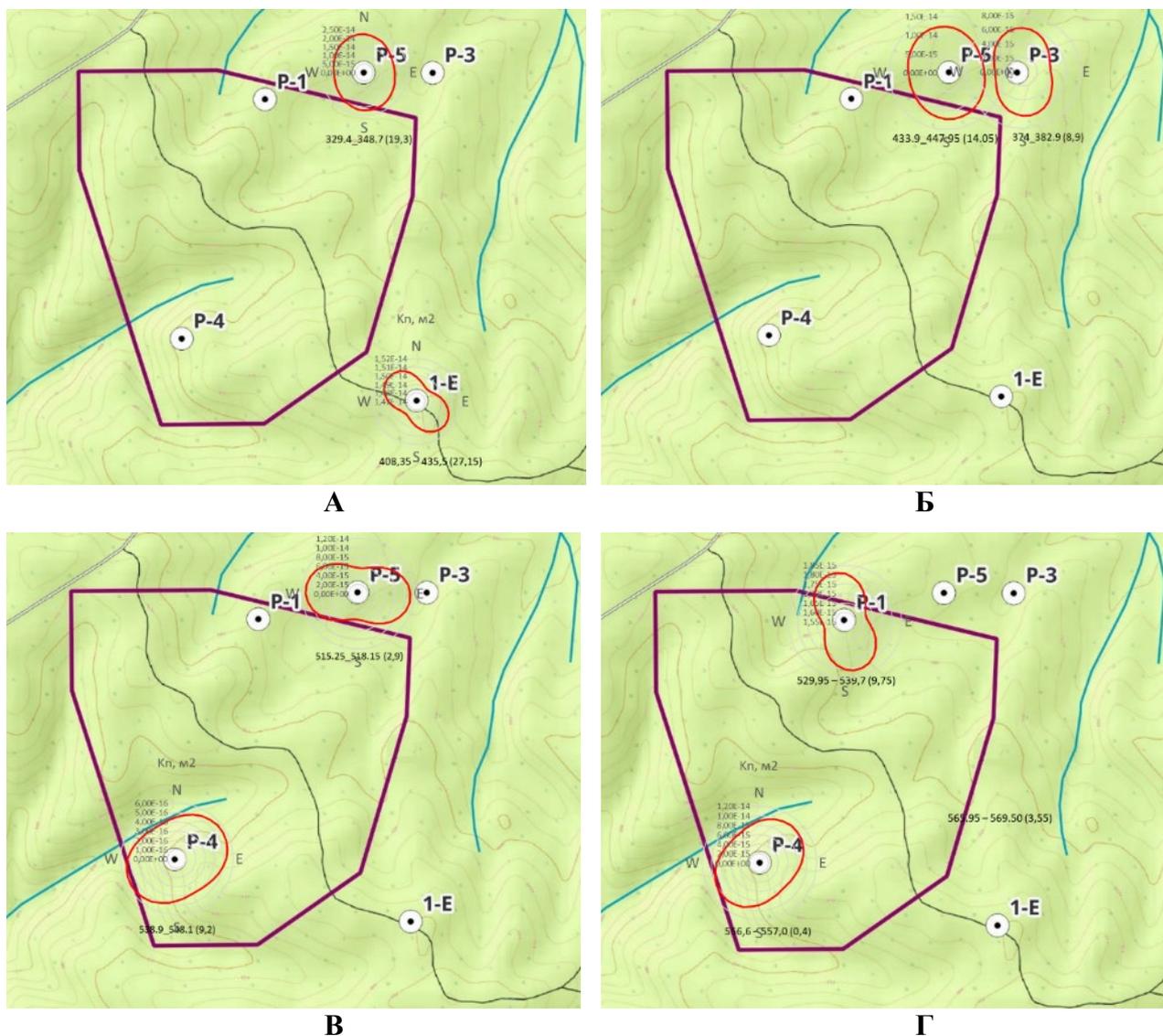


Рисунок 5.13 – Диаграммы трещинной проницаемости k_n (m^2) потенциально водопрводящих интервалов стволов скважин на схожих глубинах залегания (Балтийская система высот): интервал + 47,0 м – +3,0 м (А); интервал -24,0 – -76,0 м (Б); интервал интервал -100,0 – -145,0 м (В); интервал -150,0 – -182,0 м (Г) [138]

Выводы

На примере потенциально водопрводящих трещиноватых участков массива скальных горных пород участка Енисейский выполнена разработка алгоритма оценки анизотропии фильтрационных свойств водопрводящих интервалов с использованием тензора трещинной

проницаемости. Вычисление тензора трещинной проницаемости на основе количественных параметров трещинной сети, характерной для водопроницающего блока скальных горных пород, позволяет оценить неравномерность трещинной проницаемости и оценить анизотропию значений коэффициента фильтрации и водопроницаемости.

Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости являются следующие количественные параметры: пространственное положение трещин – азимуты падения и простирания, углы падения, геометрические характеристики трещин – раскрытие, интенсивность трещиноватости. Необходимые исходные данные могут быть получены по итогам обработки результатов видеокаротажных обследований стволов скважин, позволяющих получить количественные данные о пространственном положении трещин, либо по ориентированному керну с обязательным учётом возможного завышения интенсивности трещиноватости. В качестве исходных данных могут также использоваться геометрические характеристики трещин и их пространственное положение, полученные по итогам замеров на породных обнажениях в горных выработках. Предположение о задействовании трещин в подземных гидродинамических процессах должно быть подкреплено результатами косвенных методов оценки неоднородностей массива, а именно: комплекса ГИС или геофизическими методами, выполняемыми на породных обнажениях в горных выработках. Вычисление тензора трещинной проницаемости на основе количественных параметров трещинной сети, характерной для водопроницающего блока скальных горных пород, позволяет оценить неравномерность трещинной проницаемости и оценить анизотропию значений коэффициента фильтрации и водопроницаемости.

Определено, что данные о пространственном положении векторов градиентов давлений, представляют возможность выполнить сравнение связанных с коэффициентом трещинной проницаемости параметров водопроницающих свойств горных пород в различных направлениях.

Приведенные результаты легли в основу третьего научного положения, а также позволили разработать «Методику определения анизотропии фильтрационных свойств водопроницающих интервалов скальных пород скважинными методами», что представляет практический интерес для прогнозного гидрогеологического моделирования с задействованием программных сред, аттестованных надзорными органами для применения при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии [139].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача выделения водопрводящих участков в массиве скальных горных пород, предназначенном для захоронения радиоактивных отходов, и оценки анизотропии их фильтрационных свойств, что имеет важное значение для обеспечения безопасности объектов ПЗГРО и развития атомной отрасли в целом.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором, заключаются в следующем:

1. Проведен анализ современного состояния методов определения параметров систем трещин в натуральных условиях. Установлено, что существующие решения в части количественной характеристики систем трещин в массивах скальных пород прямыми и косвенными методами с использованием сети разведочных скважин не обеспечивают получение необходимого набора данных для определения неоднородности водопрводящих свойств трещиноватых участков.

2. Определен перечень количественных параметров трещин, оказывающих наибольшее влияние на водопрводящие характеристики исследуемого блока скальных пород. К данным параметрам отнесены: раскрытие трещин и интенсивность трещиноватости, а также пространственное положение трещин в массиве (угол падения, азимут падения и простирания трещин).

3. Разработан каротажный исследовательский программно-аппаратный комплекс, позволяющий получать количественные характеристики систем трещин, значимые для оценки водопрводящих свойств массивов скальных горных пород.

4. Проведены полевые исследования существующей сети скважин участка Енисейский, получены статистические данные о количественных характеристиках и пространственному положению трещиноватых зон в массиве на разных глубинах. Оценка значений определённого по керну модуля трещиноватости является завышенной в сравнении с результатами видеокаротажных обследований. Разница в значениях модуля трещиноватости может достигать порядка 10-60% в одних и тех же интервалах.

5. Сформирован метод выделения водопрводящих интервалов массива скальных горных пород, предназначенного для захоронения радиоактивных отходов, основанный на совместном применении видео-, гамма-гамма плотностного, а также акустического каротажей. Для надежного выявления водопрводящих интервалов необходимо единовременное выполнение следующих условий: средние значения снижения скоростей

прохождения и амплитуд продольных акустических волн (Р-волн) не менее чем на 9% и 22%, поперечных акустических волн (S- волн) – не менее чем на 20% и 40%; уменьшения значений коэффициентов эффективного затухания не менее чем на 48% и 53% для Р- и S- волн соответственно; снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs) в среднем, на 6%.

6. Установлено, что анизотропия фильтрационных свойств трещиноватого интервала горных пород может быть количественно охарактеризована с применением расчётного метода определения тензора трещинной проницаемости, базирующегося на количественных параметрах сети трещин, включая их пространственное положение.

7. Разработана «Методика определения анизотропии фильтрационных свойств водопроницающих интервалов скальных пород скважинными методами», переданная в АО «Красноярскгеология» для практического использования при выполнении работ из состава мероприятий утвержденной в 2018 году Директором по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» О.В. Крюковым «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров».

Основные положения диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ, а также статьи, индексируемые наукометрической базой Scopus:

1. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 30-41.

2. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В. О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве // Горный журнал. 2020. №3 (2272), С. 72-78.

3. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т. ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021 № 1 (14), стр. 76-86.

4. Казаков К. С. К вопросу о выполнении расчетных оценок неоднородности характеристик массивов скальных пород, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 3. С. 42-54.

Статьи в прочих изданиях:

5. Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В. Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. 2019. № 1 (6). С. 90-99.

6. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А. Определение фильтрационной анизотропии массива горных пород скважинными методами в целях обоснования долговременной безопасности глубинного захоронения РАО // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. (1 файл: 62.0 Мб). – М.: ИГЕМ РАН. 2020. С. 797-800.

7. Озерский Д. А., Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважаев Г. Д. К вопросу обоснования границ области исследований геологической среды при создании и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: материалы VI Международной конференции (Томск, 20–24 сентября 2021 г.). В 2 томах. Том 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2021. С. 448-451.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Пронь И. А., Коновалов В. Ю. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть III. Зарубежный опыт создания и эксплуатации подземных исследовательских лабораторий. Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-12. Москва. ИБРАЭ РАН. – 2017. — 34 с.
2. Обращение с РАО в некоторых странах ЕС и в России. Гражданское участие (Швеция, Финляндия, Германия, Франция, Россия). Под общей редакцией Александра Никитина. Экологическое объединение «Беллона», www.bellona.ru. – 2017 г. – С. 29.
3. Абрамов А. А., Бейгул В. П. Создание подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» Нижнеканского массива: состояние и дальнейшее развитие работ // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – 2017. – №. 8. – С. 108.
4. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Неуважаев Г. Д., Озерский Д. А. Анализ подходов к консервации и ликвидации скважин на участке недр «Енисейский» (Красноярский край, Нижнеканский массив) // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 30—41. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-4.
5. Tsang C. F., Neretnieks I., Tsang Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories // Water Resources Research. – 2015. – Vol. 51. – №. 9. – P. 6923-6972.
6. Лаверов И. П., Величкин В. И., Кочкин Б. Т., Мальковский В. И., Петров В. А. и др. Методологические основы исследований на завершающем этапе выбора площадок для размещения хранилищ отработавших ядерных материалов в кристаллических породах // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2010. – №. 1. – С. 3-12.
7. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. – 2017. – № 1(1). – С. 33–42.
8. Гупало В. С., Казаков К. С., Крючков Д. В., Панкратенко А. Н., Плешко М. С., Вознесенский А. С., Гайсин Р. М., Мосейкин В. В. Изучение состояния массива пород при строительстве подземной исследовательской лаборатории как этап получения исходных данных для оценок безопасности ПГЗРО // Радиоактивные отходы. – 2019. – № 1 (6). – С. 90—99.
9. Posiva 2003–03. ONKALO Underground Characterisation and Research Programme (UCRP). – Eurajoki : Posiva Oy, 2003. – 148 p.
10. Posiva O. ONKALO. Underground characterisation and research programme (UCRP). – Posiva Oy, 2003. – №. POSIVA--03-03.
11. Гупало Т. А., Бейгул В. П., Миловидов В. Л., Даценко В. М., Линд Э. Н. и др. Разработка обобщенного плана проведения научно-исследовательских и проектно-изыскательских работ по созданию объекта подземной изоляции РАО на Нижнеканском массиве. Проект МНТЦ #2377Р, 2002—2005 гг. Итоговый отчет, 2005.
12. Епифанцев О.Г., Плетенчук Н.С. Трещиноватость горных пород. Основы теории и методы изучения. СибГИУ. – Новокузнецк, 2008. – 41 с.
13. Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринцов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов / Под ред. В.Н. Морозова. - М.: Издательство «Горная книга», 2011. - 592 с.
14. Кушнарёв И.П., Лукин Л.И. Об изучении трещинной тектоники. В сб. «Проблемы тектонофизики». Тр. 1 Всесоюзный тектоноф. сов. 1957. Госгеолиздат, 1960.

15. Рац М.В., Чернышёв С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. – 160 с.
16. Корсаков А.К. Структурная геология: учебник – М.: КДУ, 2009. – 328 с.
17. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
18. Бахтеев М.К. Курс лекций по структурной геологии. – М.: МГГА, 1988. – С. 120
19. Мюллер Л. Механика скальных массивов. – М.: Мир, 1971. – 254 с.
20. Жиленков В.Н. Руководство по методике определения фильтрационно-суффозионных свойств скальных массивов. – тр. Ленинград. инж.-экон.ин-та им. П.Тольятти, 1967, вып. 68, С. 62-70.
21. Красилова Н. С. Анализ характера трещиноватости скальных пород при мелкомасштабной инженерно-геологической съемке части территории, прилегающей к трассе БАМ //Инженерная геология. – 1979. – №. 4. – С. 38-48.
22. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов". Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 года N 439.
23. Тугарова М.А. Породы-коллекторы: Свойства, петрографические признаки, классификации: Учебно-методич. пособие. – СПб., 2004. – 36 с.
24. Нейштадт Л.И. Методы геологического изучения трещиноватости горных пород при инженерно-геологических исследованиях. М.: Госэнергоиздат, 1957. 103 с.
25. Magnor B. Äspö Pillar Stability Experiment. Geological mapping of tunnel TASQ. – SKB R-02-43, Svensk Kärnbränslehantering AB, 2004.
26. Raven K. G. et al. Geoscientific site characterization of the proposed Deep Geologic Repository, Tiverton, Ontario //Proceedings of Geo Canada 2010 Convention “Working with the Earth—Terre d’Avenir”, Calgary, May. – 2010. – Т. 10.
27. Staub I., Andersson J. C., Magnor B. Äspö Pillar Stability Experiment. Geology and mechanical properties of the rock in TASQ. – 2004. – 207 p.
28. Tsang C. F., Neretnieks I., Tsang Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories //Water Resources Research. – 2015. – Vol. 51. – №. 9. – P. 6923-6972.
29. Серый С. С., Кожуховский А. В., Яницкий Е. Б. Опыт применения скважинной видеометрии для изучения структуры массива скальных пород //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – №. 4. – С. 260-267.
30. Методические указания по изучению массива горных пород для обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. – М.: ИПКОН РАН. – 2022. – С.102.
31. Ямщиков В. С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. Учебник для ВУЗов. М., Недра. – 1982. – 296 с.
32. Руководство по геомеханическому документированию керна. ООО «Черногорская ГРК». 06.07.2014 Интернет-ресурс. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rukovodstvopogtdokumentirovaniyukerna.pdf> (дата обращения 12.02.2024).
33. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых пород. М. Недра. – 1966. – 283 с.

34. Верутин М. Г. Инженерная геофизика. Курс лекций по спецкурсу. Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины. Гомель. 2005. – 154 с.
35. Никитин В. Н. Инженерная сейсморазведка. – М.: МГУ. 1981. – 176 с.
36. Горяинов Н. Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. – М.: Недра. 1979. – 143 с.
37. Крылатков С. М., Крылаткова Н. А., Крылевская А. Н., Гуськова В. Д. Сейсмические изображения геологической среды в методе преломленных волн // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2-24. – С. 5409-5415
38. Бобачев А. А., Большаков Д. К., Модин И. Н., Шевнин В. А. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей. Т. II. Малоглубинная электроразведка/ Под ред. проф. В.А. Шевнина, доц. А.А. Бобачева. – М.: МГУ, 2013. – 123 с.
39. Хмелевской В. К. Электроразведка. Учеб. пособие. 2-е изд., переработанное и дополненное. - М.: Издательство Московского Университета. 1984. – 422 с.
40. Приказ Минприроды РФ от 23.05.2011 N 378 «Об утверждении Требований к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по подсчету запасов твердых полезных ископаемых» Интернет-ресурс. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rf-ot-23052011-n-378/> (дата обращения 22.02.2023).
41. Климов В. В., Шостак А. В. Геофизические исследования скважин. ФГБОУ ВПО «КубГТУ». Издательский Дом – Юг Краснодар. – 2014. – 220 с.
42. М-во геологии СССР. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований в скважинах. М.: Недра. – 1985. – 31 с.
43. Перельгин В. Т. и др. Аппаратурно-методические комплексы для исследования рудных, угольных и гидрогеологических скважин //Каротажник. – 2015. – №. 9. – С. 99-127.
44. Сковородников И. Г. и др. Оценка трещиноватости массива скальных горных пород по данным геофизических исследований скважин //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – №. 3. – С. 154-159.
45. Орехов А. Н., Аmani Мангуа Марк М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 6. – С. 198-209.
46. Pirson S. J., Trunz J. P., Gomez N. P. How to map fracture development from well logs //World Oil. – 1967. – Vol. 164. – №. 4.
47. Сальникова О. Л., Савич А. Д., Серкина А. В., Чухлов А. С. Исследование новых технологий и методов для повышения эффективности ГИС. Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – Пермь. Пермский государственный национальный исследовательский университет. – 2018. – С. 246-252.
48. Beck J., Schultz A., Fitzgerald D. Reservoir evaluation of fractured cretaceous carbonates in south Texas //SPWLA Annual Logging Symposium. – SPWLA, 1977. – С. SPWLA-1977-M.
49. Aguilera R. Combined log analyses and material balance help to explain performance of naturally fractured reservoirs below the bubble point //The Log Analyst. – 1977. – Vol. 18. – №. 06.
50. Николенко П. В., Зайцев М. Г. Комплексный оптико-акустический каротаж приконтурного массива. Оборудование и физическое моделирование // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 1. – С. 95-106. DOI 10.25018/0236_1493_2023_1_0_95.

51. Еникеев В. Н., Ташбулатов В. Д., Гайфуллин М. Я. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твердых полезных ископаемых //Каротажник. – 2011. – №. 5. – С. 224-237.

52. Терехов О. В., Горохов В. М., Садыков А. Р., Береснев В. В. Акустический сканер САС-90 как инструмент для решения геолого-геофизических задач при исследовании скважин //Каротажник. – 2012. – №. 7-8. – С. 25-34.

53. Oskar Sigurdsson, H Ask Geokonsult AB. Äspö Hard Rock Laboratory. Boremap mapping of core drilled boreholes KA2051A01 and KA3007A01, P-13-32. ID 1385925. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Stockholm. July 2013. 76 p.

54. Вознесенский А. С., Набатов В. В., Петерс Ш. Скважинные видеозонды и их использование для задач геотехнологий //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2007. – №. 9. – С. 5-12.

55. Оборудование для каротажных исследований скважин. Интернет-ресурс. URL: <https://mountsopris.com/borehole-well-logging-equipment/downhole-probes/> (дата обращения 22.02.2022).

56. Смирнов Н. А., Пивоварова Н. Е. Методическое руководство по применению аппаратуры волнового акустического каротажа АВАК-11 //Тверь: ООО «Нефтегазгеофизика. – 2011. – 74 с.

57. Запорожец В. М. (ред.). Геофизические методы исследования скважин: справочник геофизика. –М.: – Недра, 1983. – 591 с.

58. Гальперин А. М., Зайцев В. С., Харитоненко Г. Н., Норнатов Ю. А. Геология: Часть III – Гидрогеология: Учебник для ВУЗов. - Москва: Горная книга, 2009. – 400 с.

59. Гавич И. К., Ковалевский В. С., Язвин Л. С. и др. Гидрогеодинамика / Новосибирск: Наука, 1983. – 241 с.

60. Всевожский В.А. Основы гидрогеологии: Учебник – 2-е издание, переаб и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – 448 с.

61. Liu R., Zhu T., Jiang Y., Li B., Yu L., Du, Y., Wang, Y. A predictive model correlating permeability to two-dimensional fracture network parameters //Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2019. – Vol. 78. – P. 1589-1605.

62. Liu Y., Yin G., Zhang D., Li M., Deng B., Liu C., Zhao H., Yin S. Directional permeability evolution in intact and fractured coal subjected to true-triaxial stresses under dry and water-saturated conditions //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – Vol. 119. – P. 22-34.

63. Rong, G., Peng, J., Wang, X., Liu, G., Hou, D., 2013. Permeability tensor and representative elementary volume of fractured rock masses //Hydrogeology journal. – 2013. – Vol. 21. – №. 7. – P. 1655.

64. Banks D. et al. Permeability and stress in crystalline rocks //Terra Nova. – 1996. – Vol. 8. – №. 3. – P. 223-235.

65. Webster D. S., Marine I. W., Proctor J. F. Two-well tracer test in fractured crystalline rock. – US Government Printing Office, 1970.

66. Голф-Рахт Т. Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – Рипол Классик, 1986.

67. Riedmüller G. et al. Engineering geological characterization of brittle faults and classification of fault rocks //Felsbau. – 2001. – Vol. 19. – №. 4. – P. 13-19.
68. Zimmerman, R.W., Chen, D.-W. and Cook, N.G.W., 1992. The effect of contact area on the permeability of fractures. J. Hydrol., Vol.139. P. 79-96.
69. Жуков В. С., Моторыгин В. В. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИН НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГОРНЫХ ПОРОД //ГеоЕвразия-2022. Геологоразведочные технологии: наука и бизнес. – 2022. – С. 65-69.
70. Жуков В. С., Моторыгин В. В. Влияние межзерновой пористости и трещинной пустотности на проницаемость //Вести газовой науки. – 2019. – №. 1 (38). – С. 82-88.
71. Zheng J., Wang X., Lü Q., Sun H., & Guo J. A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses. Journal of Hydrology, 2020. 124811. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124811.
72. Snow D. T. Anisotropic permeability of fractured media //Water resources research. – 1969. – Т. 5. – №. 6. – С. 1273-1289.
73. Yao C., Jiang Q. H., Shao J. F. A numerical analysis of permeability evolution in rocks with multiple fractures //Transport in Porous Media. – 2015. – Vol. 108. – P. 289-311.
74. Zhang X., Sanderson D. J. Anisotropic features of geometry and permeability in fractured rock masses //Engineering Geology. – 1995. – Vol. 40. – №. 1-2. – P. 65-75.
75. Gale J. E. Assessing the permeability characteristics of fractured rock. – 1982.
76. Тесля В. Г., Расторгуев А. В. Особенности планирования детального изучения гидродинамических и гидрохимических свойств участка «Енисейский» Нижнеканского массива // Радиоактивные отходы. – 2020. – № 4 (13). – С. 58—70. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-58-70.
77. Hämäläinen H. Monitoring hydraulic conductivity with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, Drillholes OL-KR31 and OL-KR32, in 2009. – Posiva Oy, 2010. – №. POSIVA-WR--10-49.
78. Гупало В. С., Казаков К. С., Коновалов В. Ю., Демин А. В. О синхронизации мероприятий программы исследований массива с проходческими работами при создании подземной исследовательской лаборатории в Нижнеканском массиве //Горный журнал. – 2020. – №. 3. – С. 72-78.
79. Öhberg A. Investigation equipment and methods used by Posiva. – Posiva Oy, 2006. – №. POSIVA-WR--06-81.
80. Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. Министерство энергетики и электрификации СССР ГЛАВНИИПРОЕКТ (Всесоюзный ордена Ленина проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт Гидропроект имени С.Я. Жука) П-717-80. Гидропроект. Москва Энергоиздат 1981.
81. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин. ПНИИИС.— М.: Стройиздат, 1986. – 143 с.
82. Синдаловский Л. Н. Проведение и интерпретация опытно-фильтрационных опробований. Санкт-Петербург, 2020 г. Интернет-ресурс.URL: <http://ansdimat.com/download/trening/treningOFO.pdf> (дата обращения 11.05.2022).
83. ГОСТ 23278-2014. Грунты. Методы полевых испытаний проницаемости. – М., Стандартинформ, 2015. – 31 с.

84. Конструкция двойного пневматического пакера. Интернет-ресурс.URL: https://exostra.ru/tool/geopro/all_packers/double_packer (дата обращения 08.06.2023).
85. Ludvigson J. E., Hansson K., Rouhiainen P. Methodology study of Posiva difference flow meter in borehole KLX02 at Laxemar. – 2002. – 146 pp.
86. Difference flow logging in borehole KA3007A01. Äspö Hard Rock Laboratory. Eemeli Hurmerinta, Janne Pekkanen Pöyry Finland Oy. vensk Kärnbränslehantering AB. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Stockholm. P-13-26, 2013. – 51 pp.
87. Komulainen J. Posiva Flow Log (PFL). Tool for detection of groundwater flows in bedrock. Mine Water and Circular Economy, IMWA, 2017, pp. 556 – 563.
88. Ohberg A., Rouhiainen P. Posiva Groundwater flow Measuring Techniques. Posiva 2000-12, 2000. 83 p.
89. Аверьянов С. Ф. Зависимость водопроницаемости почвогрунтов от содержания в них воздуха //ДАН СССР. – 1949. – Т. 69. – №. 2. – С. 141-144.
90. Каменский Г. Н., Гавич И. К., Семенова С. М. Гидродинамическая характеристика различных видов потоков подземных вод //Изв. вузов. Геология и разведка. – 1960. – №. 10. – С. 81-88.
91. Шедеггер А. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Гостоптехиздат, 1960. – 249 с.
92. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с.
93. Snow D.T. Anisotropic permeability of fractured media // Water Resources Research. – 1969. – № 5(6) – P. 1273-1289.
94. Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. М.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.
95. Teklu Hadgu, Satish Karra, Elena Kalinina, Nataliia Makedonska, Jeffrey D. Hyman, Katherine Klise, Hari S. Viswanathan, Yifeng Wang. A comparative study of discrete fracture network and equivalent continuum models for simulating flow and transport in the far field of a hypothetical nuclear waste repository in crystalline host rock //Journal of Hydrology. – 2017. – Vol. 553. – P. 59-70.
96. Lang, P.S., Paluszny, A., Zimmerman, R.W. Lang P. S., Paluszny A., Zimmerman R. W. Permeability tensor of three-dimensional fractured porous rock and a comparison to trace map predictions //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 2014. – Vol. 119. – №. 8. – P. 6288-6307.
97. Ferrandon J. Les lois de l'écoulement de filtration //Génie civil. – 1948. – Vol. 125. – №. 2. – P. 24-28.
98. He J., Chen S., Shahrour I. Numerical estimation and prediction of stress-dependent permeability tensor for fractured rock masses //International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2013. – Vol. 59. – P. 70-79.
99. Hsieh P. A. et al. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media: 2. Methodology and application to fractured rocks //Water Resources Research. – 1985. – Vol. 21. – №. 11. – P. 1667-1676.
100. Lei G., Dong P. C., Mo S. Y., Yang S., Wu Z. S., Gai S. H. Calculation of full permeability tensor for fractured anisotropic media //Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2015. – Vol. 5. – P. 167-176.

101. Singhal B. B. S., Gupta R. P. Applied hydrogeology of fractured rocks. – Springer Science & Business Media, 2010. 408 p.
102. Oda M., Hatsuyama Y., Ohnishi Y. Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa mine, Sweden //Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1987. – Vol. 92. – №. B8. – P. 8037-8048.
103. Zheng, Jun, et al. "A new determination method for the permeability tensor of fractured rock masses." Journal of hydrology 585 (2020): 124811. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124811.
104. Zhang X. et al. Evaluation of the 2-D permeability tensor for fractured rock masses //International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. – Pergamon, 1996. – Vol. 33. – №. 1. – P. 17-37.
105. Pan J. B. et al. Application of fracture network model with crack permeability tensor on flow and transport in fractured rock //Engineering Geology. – 2010. – Vol. 116. – №. 1-2. – P. 166-177.
106. Miyakawa K., Tanaka K., Hirata Y., & Kanauch M. Detection of hydraulic pathways in fractured rock masses and estimation of conductivity by a newly developed TV equipped flowmeter //Developments in geotechnical engineering. – Elsevier, 2000. – Vol. 84. – P. 19-27.
107. Озерский Д. А., Гупало В. С., Казаков К. С., Неуважаев Г. Д. Изучение параметров геологического массива в рамках создания и эксплуатации подземной исследовательской лаборатории на участке «Енисейский» в Красноярском крае // Радиоактивные отходы . 2022 . № 4 (21) . С . 78—89 . DOI: 10 .25283/2587-9707-2022-4-78-89.
108. Гупало В. С., Казаков К. С., Минаев В. А., Озерский Д. А., Устинов С. А., Нафигин И. О. Результаты исследований в существующих скважинах на участке недр «Енисейский», в т.ч. для определения основных систем трещин и анизотропии массива пород // Радиоактивные отходы. 2021. № 1 (14). С. 76—86. DOI.: 10.25283/2587-9707-2021-1-76-86.
109. Руководство пользователя QGIS. Электронный ресурс. URL: https://docs.qgis.org/2.18/ru/docs/user_manual/index.html (дата обращения 06.05.2023).
110. Jensen J. R. Introductory Digital Image Processing, PrenticeYHall Series in Geographic Information Science, USa //ISBN 0Y13Y2005840Y5. – 1996. – Vol. 316.
111. Suzen M. L., Toprak V. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey //International journal of remote sensing. – 1998. – Vol. 19. – №. 6. – P. 1101-1114.
112. Chavez Jr P., Bauer B. An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement //Remote Sensing of Environment. – 1982. – Vol. 12. – №. 1. – P. 23 – 38.
113. L. Q. Hung, O. Batelaan, F. De Smedt. Lineament extraction and analysis, comparison of LANDSAT ETM and ASTER imagery. Case study: Suoimuoi tropical karst catchment, Vietnam. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology V Proceedings volume 5983. Bruges, Belgium, 19-22 September 2005.
114. Hirono T., Takahashi M., Nakashima S. In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT // Engineering Geology. – 2003. – № 70 (1-2). – P. 7 – 46.
115. Пустовит О. Е., Попов Ю. В. Учебно-методическое пособие «Методика изучения и анализа трещиноватости» Часть 2. Графические методы изображения замеров ориентировки трещин и анализ трещиноватости. Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, 2009, – 34 с.
116. Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов// Радиоактивные отходы. – 2018. – № 2 (3). – С. 114—120.

117. The role of underground laboratories in nuclear waste disposal programmes. Paris, France: NEA-OECD Technical Series, 2001.
118. Зуев В. К., Качевский Л. К., Качевская Г. И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000. (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46 – Красноярск. Объяснительная записка. ВСЕГЕИ, СПб, 2009, 500 с.
119. Качевский Л. К., Зуев В. К. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000. (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист О-46 – Красноярск. ВСЕГЕИ, СПб, 2005.
120. Парфенов Ю. И., Гончаров Ю. И. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Енисейская. Лист О-46-XXV. Объяснительная записка. М., Недра, 1967, 74 с.
121. Никулов Л. П., Бабкин А. Н., Колямкин В. М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:2000 000. Издание второе. Енисейская серия. Лист О-46-XXXIV (Сосновоборск). Объяснительная записка. М., СПб, 2001, 249 с.
122. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:100 0000 (новая серия). Объяснительная записка. Лист О-46(47) – Красноярск. Отв. ред. Е.К. Ковригина, Н.С. Подгорная. Л.: ВСЕГЕИ. 1978, с. 167.
123. Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А. Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»). Книга 2. ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2011. – 243 с.
124. Караулов В. А., Заблоцкий К. А. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450-525 метров (+5 – -70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Книга 1. ОАО «Красноярскгеология», Красноярск, 2015. – 240 с.
125. Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А. Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве (участок Енисейский). Книга 1. ОАО «Красноярскгеология». Красноярск, 2010. – 274 с.
126. Ольховатенко В. Е., Трофимова Г. И., Ожогина Т. В. Методы изучения трещиноватости горных пород: учебно-методическое пособие для самостоятельной работы по курсу «Инженерная геология». – Томск: Изд-во Томского государственного архитектурно – строительного университета, 2015. – 80 с.
127. Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д., Смирнов К. Д. Интерпретация опытно-фильтрационных работ из несовершенных скважин в слабопроницаемом скальном массиве с учетом потока в стволе совершенной наблюдательной скважины на примере участка «Енисейский» // Радиоактивные отходы. – 2021. – № 3 (16). – С. 61—71. DOI: 10.25283/2587-9707-2021-3-61-71.
128. Hämäläinen H. Hydraulic conductivity measurements with HTU at Eurajoki, Olkiluoto, drillholes OL-KR40, OL-KR42 and OL-KR45 in 2008. – Posiva Oy, 2009. – №. POSIVA-WR--09-104.
129. Мараев И. А. Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований скважин. Учебное пособие. - М.: 2013. – 95 с.
130. Шаумян Л. В. Природа физико-механических свойств массивов горных пород. - М.: изд-во МГУ, 1988. – 192 с.

131. Применение скважинных акустических методов для решения задач разработки месторождений твердых полезных ископаемых. Интернет-ресурс. URL: <http://www.akustika-okt.ru/index.php?cat=article&number=5> (дата запроса – 25.07.2023).
132. Описание прибора акустического каротажа ПАРУС-48. Интернет-ресурс. URL: <http://akustika-okt.ru/index.php?cat=tool&name=parus-48> (дата обращения 07.09.2023).
133. Иванов П. Н., Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерноультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – №. 4-1. – С. 26-40.
134. Соколовская Ю. Г., Карабутов А. А. Лазерно-ультразвуковая дефектоскопия конструкций из мультиаксиальных полимерных композиционных материалов // Конструкции из композиционных материалов. – 2018. – №. 1. – С. 56-61.
135. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением.
136. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО // Радиоактивные отходы, 2017. № 1 (1). С. 42—53.
137. Морозов О. А., Расторгуев А. В., Неуважаев Г. Д. Оценка состояния геологической среды участка Енисейский (Красноярский край) // Радиоактивные отходы, 2019. – № 4 (9). – С. 46—62. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-46-62.
138. Казаков К. С. К вопросу о выполнении расчетных оценок неоднородности характеристик массивов скальных пород, предназначенных для захоронения радиоактивных отходов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 3. С. 42-54.
139. Novikov K., Kapurin I. Coupled surface–subsurface flow modelling using the gera software // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2020. – Vol. 41. – P. 538-551. DOI:10.1134/S1995080220040162.
140. Дорофеев А. Н., Большов Л. А., Линге И. И., Уткин С. С., Савельева Е. А. Стратегический мастер-план исследований в обоснование безопасности сооружения, эксплуатации и закрытия пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. — 2017. — № 1. — С. 32—41.
141. Portone T. Fracture statistics and integration into computational models. – Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2021. – №. SAND2021-6083PE.
142. Kiuru R. et al. Comparison of DFN modelled microfracture systems with petrophysical data in excavation damaged zone // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – №. 7. – P. 2899.
143. Hancock P. L. Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of structural geology. – 1985. – Vol. 7. – №. 3-4. – P. 437-457.
144. Hancock P. L. The Oxford companion to the Earth. – 2001. – P. 1184.
145. Dershowitz W. S., Einstein H. H. Characterizing rock joint geometry with joint system models // Rock mechanics and rock engineering. – 1988. – Vol. 21. – №. 1. – P. 21-51.
146. Васильева Л. А. О генетических классификациях трещин горных пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2023. – №. 1. – С. 10-23.
147. Семинский К. Ж., Бурзунова Ю. П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – №. 3. – С. 330-343.

148. Wheeler R. L., Dixon J. M. Intensity of systematic joints: methods and application //Geology. – 1980. – Vol. 8. – №. 5. – P. 230-233.
149. Palmström A. The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing //Conference on recent advances in tunnelling technology, New Delhi. – 1996.
150. Kravcov A. N. et al. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiber-reinforced plastics //Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 722. – P. 267-272.
151. Иньков В. Н., Черепецкая Е. Б. Возможности выявления микродефектов в образцах горных пород лазерным ультразвуковым методом //Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2004. – №. 4. – С. 104-106.
152. Бойчук А. С. и др. Определение пористости в монолитных конструкциях из углепластиков ультразвуковым эхо-методом с использованием лазерного возбуждения ультразвуковых колебаний //Труды ВИАМ. – 2016. – №. 12 (48). – С. 72-80.
153. Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерноультразвуковая спектроскопия горных пород // М.: Изд. "Горная книга". – 2008. С – 176.
154. Описание типа средства измерений «Дефектоскоп лазерно-ультразвуковой УДЛ-2М». Приложение к свидетельству об утверждении типа средств измерений RU.E.27003.A №42731 «Дефектоскоп лазерно-ультразвуковой УДЛ-2М». Изготовитель ООО «Линкс 2000», г. Москва. – 2011. С –5.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОДОПРОВОДЯЩИХ ИНТЕРВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД СКВАЖИННЫМИ МЕТОДАМИ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего образования

«Национальный исследовательский технологический университет

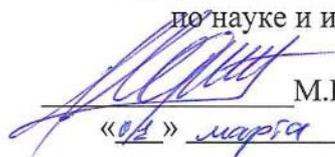
«МИСИС»

Кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля

УДК 550.8.053

УТВЕРЖДАЮ

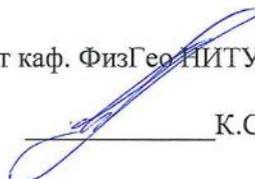
Проректор НИТУ МИСИС
по науке и инновациям


М.Р. Филонов
«02» марта 2024 г.

МЕТОДИКА

ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНИЗОТРОПИИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ВОДОПРОВОДЯЩИХ ИНТЕРВАЛОВ СКАЛЬНЫХ ПОРОД СКВАЖИННЫМИ
МЕТОДАМИ

Автор:
Аспирант каф. ФизГео НИТУ МИСИС


К.С. Казаков

Методика рассмотрена и одобрена
На заседании кафедры ФизГео НИТУ МИСИС

Протокол № 6 от «27» февраля 2024 г.

 д.ф.-м.н., зав.каф. ФизГео, В.А. Винников
«27» февраля 2024 г.

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

1	Общие положения.....	3
2	Область применения.....	3
3	Применяемое исследовательское оборудование.....	4
3.1	Оборудование для выполнения видеокаротажных исследований скважин.....	4
3.2	Оборудование для выполнения геофизических исследований скважин.....	6
3.3	Оборудование для выполнения лабораторных исследований.....	7
3.4	Оборудование для поинтервальных опытно- фильтрационных работ.....	7
4	Проведение видеокаротажных обследований.....	8
4.1	Требования к подготовке скважин к обследованиям.....	8
4.2	Полевые видеокаротажные обследования скважин.....	9
4.2.1	Составление плана обследований.....	9
4.2.2	Подготовка исследовательского оборудования к работе.....	9
4.2.3	Видеокаротажные обследования стволов скважин.....	10
4.3	Камеральная обработка результатов обследований.....	10
5	Выделение потенциально водопрводящих участков.....	14
5.1	Лабораторные измерения скоростей продольных волн.....	14
5.2	Выбор потенциально водопрводящих интервалов в скважине.....	14
6	Верификация положения водопрводящих трещиноватых интервалов.....	16
6.1.1	Методика проведения ОФР с применением поинтервальных откачек.....	16
6.1.2	Методика проведения ОФР с применением поинтервальных нагнетаний.....	16
6.1.3	Длительные нагнетания в проницаемые интервалы пород.....	16
7	Расчёт фильтрационной анизотропии.....	17
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	19

1 Общие положения

Критически важным аспектом в обосновании безопасности глубинного захоронения радиоактивных отходов (РАО) является прогнозирование распространения радионуклидов в геологической среде. Наиболее вероятным механизмом возможного выхода радионуклидов из области захоронения является их перенос подземными водами по системам трещин в массиве. Неравномерность распределения трещинных систем в совокупности с различием их пространственных и геометрических характеристик формируют неоднородность водопроводящих свойств на различных участках массива.

Потенциально пригодные для строительства пунктов глубинного захоронения РАО (ПГЗРО) массивы скальных горных пород обладают достаточно низкой проницаемостью. В связи с этим поиски потенциально водопроводящих интервалов с применением традиционных методик скважинных опытно-фильтрационных работ (ОФР) – стволые откачки неинформативны. По итогам обработки результатов данных ОФР формируется интегральная оценка фильтрационных характеристик по всему разрезу, а оценка неравномерности распределения водопроводящих свойств в нём не представляется возможной. Соответственно, для поинтервальной фильтрационной характеристики геологического разреза целесообразно определить глубины залегания потенциально водопроводящих трещиноватых участков массива и выделить интервалы для заверки прямыми методами. Данные интервалы предлагается определять на основе комбинации методов видеокоротажного обследования незакреплённых участков скважин, акустического и плотностного радиоизотопного каротажей. Определённые по итогам обработки данных видеокоротажных обследований количественные геометрические параметры трещин и их пространственное положение являются исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости, характеризующего фильтрационную анизотропию трещиноватого участка скважины.

2 Область применения

Настоящая методика предназначена для определения анизотропии фильтрационных свойств водопроводящих интервалов разведочных скважин, пройденных в массиве скальных горных пород, в т.ч. рассматриваемом для целей создания объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов. В основу методики заложен алгоритм оценки анизотропии фильтрационных свойств водопроводящих интервалов с использованием тензора трещинной проницаемости. Вычисление тензора трещинной проницаемости на основе количественных параметров трещинной сети позволяет оценить неравномерность значений трещинной проницаемости, оценить фильтрационную анизотропию. Разработанная методика, базирующаяся на применении результатов коротажных геофизических методов, поинтервальных гидрогеологических исследований проницаемости позволяет:

- производить поиск потенциально водопроводящих трещиноватых интервалов горных пород в незакреплённых участках разведочных скважин;
- определять количественные характеристики трещинной сети, включая пространственную ориентировку трещин в стволе разведочной скважины;
- расчётными методами определять объёмную неравномерность водопроводящих свойств трещиноватых участков в стволе скважины.

3 Применяемое исследовательское оборудование

3.1 Оборудование для выполнения видеокаротажных исследований скважин

Скважинный каротажный программно-аппаратный комплекс (далее: каротажный комплекс) предназначен для визуального изучения строения стенок скважин вертикального или горизонтального заложения диаметром от 56 мм и выше, на глубинах до 1000 м, не заполненных водой или заполненных оптически прозрачной жидкостью с записью видеозображения в цифровом формате. Основным элементом каротажного комплекса является скважинный видеозонд (таблица 3.1). Комплект оборудования, входящего в состав каротажного программно-аппаратного комплекса представлен на рис. 3.1.

Таблица 3.1 - Характеристики скважинного видеозонда

№	Наименование	Параметры
1.	Габариты зонда – без учёта центрирующих элементов / с учётом центрирующих элементов	600 × 48 / 600 × 54 мм
2.	Вес	4 кг
3.	Потребляемая мощность	4 Вт
4.	Питание	12 В постоянного тока, от встроенных аккумуляторов (9 аккумуляторов по 3,7 В. Ёмкость 9900 мА/час)
5.	Время работы	до 15-и часов (до полного разряда аккумуляторов)
6.	Рабочий диапазон температур	на поверхности: -10 °С – +50 °С в скважинной жидкости от +5 °С – +60 °С
7.	Приемник 1	камера высокого разрешения фронтальная с передачей изображения на ПК
8.	Приемник 2	вращающаяся камера высокого разрешения боковая с передачей изображения на ПК
9.	Чувствительность камер	0,1 люкс
10.	Освещение	8 (фронтальные) + 3 (боковые) светодиодов 1 лк каждый
11.	Выходное напряжение	аналоговое видео НЧ, уровень 1,5 В, через систему усилителей
12.	Блок измерения магнитного азимута и температуры	измерение азимута, точность 0,01 гр.
13.	Блок измерения температуры	измерение температуры, точность 0,01 гр.
14.	Индикация контроля глубины, температуры и азимута	На экране



1 – скважинный видеозонд, 2 – лебедка с кабелем ГПСМПО 2х1,0 длиной 700 м и винтовым геофизическим разъемом; 3 – каротажный блок; 4 – блок-баланс с счётчиком глубины погружения видеозонда; 5 – зарядное устройство; 6 – ноутбук спредустановленным программным обеспечением (Модуль 1, Модуль 2, Модуль 3)

Рисунок 3.1 – Комплект оборудования каротажного программно-аппаратного комплекса для визуального изучения строения стенок скважин вертикального или горизонтального заложения

Программное обеспечение в составе каротажного комплекса:

1. Модуль 1 – предназначен для проведения полевых исследований - управления зондом и сбора первичных данных в формате видеоизображений. Данный модуль является серийным программным обеспечением, позволяющим формировать видеофайлы в формате *.mp4;

2. Модуль 2 – предназначен для подготовки полевой информации к камеральной обработке – программный код, осуществляющий конвертацию формируемых Модулем 1 файлов в панорамные изображения с наложением на них меток пространственной привязки и масштабной сетки;

3. Модуль 3 – предназначен для камеральной обработки, систематизации и визуализации полевых исследований – полуавтоматический алгоритм вычисления углов падения, азимутов падения и простираения линеаментов, определения значений раскрытия трещин и интенсивности трещиноватости. В составе модуля применяется серийное программное обеспечение – «QGIS» (<https://qgis.org/ru/site/>).

3.2 Оборудование для выполнения геофизических исследований скважин

Таблица 3.2 - Перечень рекомендуемого оборудования ГИС, в т.ч. его параметры

№	Наименование прибора	Метод	Параметры	Комментарий
1.	ПАРУС-48	АК	Применяемая формула зонда: ПЗ 0,25 П2 0,25 П3 2,0 И. Шаг регистрации по глубине – не более 5 см, Скорость каротажа составляла 400 м/час.	0,25 – расстояние в м между приёмниками сигнала, а 2,0 – расстояние от излучателя до первого приёмника П1 – см. рис. 3.2
2.	Радиометр КУРА-2М	ГТК-П	Масштаб регистрации интенсивности поглощения искусственного гамма-излучения по разрезам скважин 2,5-5 мкР/час на 1 см. Постоянная времени интегратора 1 сек. Скорость записи до 300 м/час.	

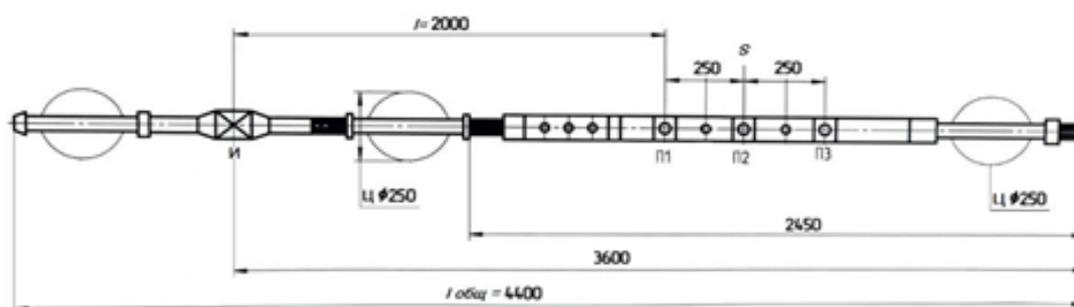


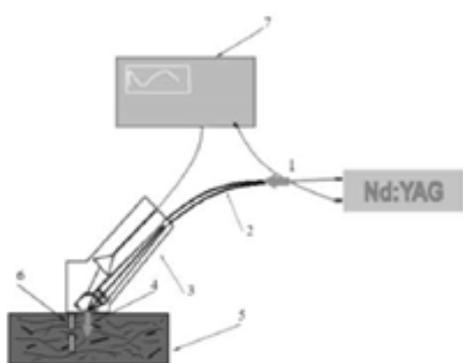
Рисунок 3.2 – Прибор ПАРУС – 48. И – излучатель, П – приёмник, Ц – центраторы, S – база зонда, l – расстояние от излучателя до первого приёмника, l_{общ} – общая длина зонда

Таблица 3.3 – Характеристики прибора акустического каротажа ПАРУС-48 производства АО НПП «ВНИИГИС»

№	Наименование	Значение
1.	Диаметр излучателя, мм	60
2.	Частота излучателя, кГц:	20 – 30
3.	Диапазон измерения интервального времени Δt , мкс/м	120 – 600
4.	Относительная погрешность измерения интервального времени Δt , %	± 3
5.	Абсолютная погрешность измерения коэффициента затухания α , дБ/м	± 5
6.	Максимальное гидростатическое давление, МПа	60
7.	Максимальная рабочая температура, °С	120
8.	Габаритные размеры скважинного прибора, мм:	
8.1.	– диаметр	48
8.2.	– общая длина (l _{общ})	4400
9.	База зонда (S), мм	500
10.	Расстояние от излучателя до первого приёмника (l), мм	2000

3.3 Оборудование для выполнения лабораторных исследований

Для минимизации ошибки выделения трещиноватых интервалов в массиве скальных горных пород по данным ГИС должна быть выполнена оценка значений скоростей продольных волн на образцах монолитных горных пород в лабораторных условиях. Лабораторные оценки скоростей продольных волн в монолитных образцах горных пород рекомендуется производить на лазерном ультразвуковом структуроскопе УДЛ-2М (рис. 3.3), работающий в режиме эхо-скопии при одностороннем доступе к исследуемому образцу [14]. Диапазон измеряемых значений скоростей волн $2,0 - 7,0 \cdot 10^3$ м/с.



- 1 – импульсно-периодический YAG:Nd лазер;
- 2 – кабель оптоволоконный;
- 3 – пьезопреобразователь;
- 4 – ультразвуковой импульс;
- 5 – исследуемый образец горной породы;
- 6 – отраженные сигналы;
- 7 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Рисунок 3.3 – Схема проведения лазерно-ультразвуковой диагностики с применением структуроскопа УДЛ-2М [14]

3.4 Оборудование для поинтервальных опытно-фильтрационных работ

Исследовательская установка для поинтервальных гидрогеологических скважинных исследований (рис. 3.4) предназначена для проведения измерений фильтрационных параметров трещиноватых участков горных пород в скважинах методом отсечения внешних перетоков. Их исключение достигается изоляцией исследуемого участка /интервала в стволе скважины резиновыми манжетами пакера. Таким образом, в интервале ограниченной длины осуществляется выполнение измерений при производстве опытно-фильтрационных работ. Измеряемыми параметрами являются уровень воды в скважине и межпакерном интервале.

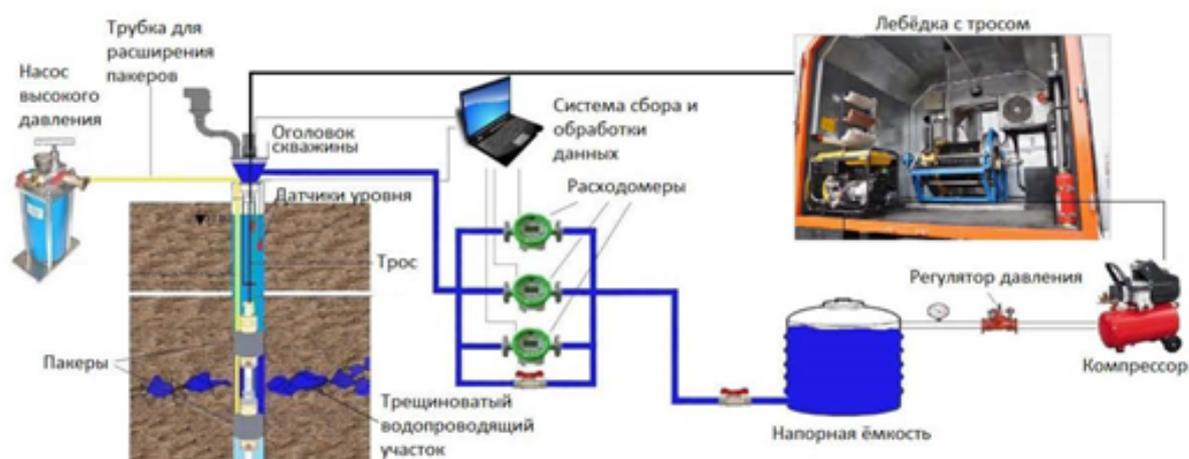


Рисунок 3.4 - Схема оборудования скважины для поинтервальных исследований

Основные технические характеристики установки для поинтервальных гидрогеологических скважинных исследований:

- Глубина погружения пакерной системы – до 700 метров;
- Исследуемый интервал (длина межпакерного расстояния) – 1-20 м;
- Давление в манжетах пакера – до 40 атм.;
- Давление в межпакерном пространстве – до 8 атм.;
- Вес в сборе – 40 кг без воды (вода используется для расширения манжет).

В зависимости от горно-геологических условий и состояния скважины может быть применена одинарная или двойная компоновка пакерного снаряда (рис. 3.5).

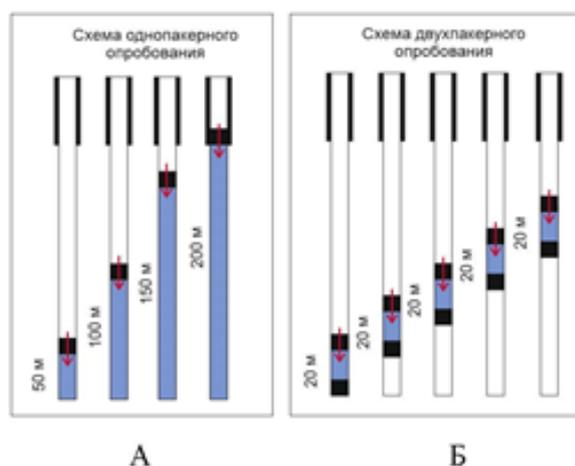


Рисунок 3.5 – Одинарная (А) и двойная (Б) компоновка пакерного снаряда

При одинарной компоновке (рис. 3.5 А) исследуется интервал между забоем скважины и пакером без ограничения протяженности интервала. При двойной компоновке (рис. 3.5 Б) основной исследуемый интервал находился между пакерами.

4 Проведение видеокаротажных обследований

4.1 Требования к подготовке скважин к обследованиям

Выполнение исследований производится только на незакрепленных участках ствола разведочной скважины:

- ниже колонны обсадных труб, фиксирующей неустойчивые участки массива;
- вне интервалов неустойчивых участков стволов скважины после их укрепления (цементацией, установкой фильтровальных колонн и проч.).

Для проведения полевых исследований с использованием каротажного комплекса необходима гарантия беспрепятственного перемещения зонда по всей протяженности ствола скважины. Для этого стволы скважин должны быть подготовлены надлежащим образом, в частности должны быть выполнены:

- 1) проработка буровым инструментом имеющегося диаметра для удаления вывалов, высыпаний и прочих неровностей в ее стволе;

2) шаблонирование металлическим макетом видеозонда с центраторами до забоя диаметром, превышающим диаметр используемых приборов. Жесткость центраторов должна быть равной или большей, чем у видеозонда;

3) промывка водой для полного удаления из стволов скважин продуктов бурения – производится до осветления промывочной жидкости на выходе из скважины. Исследования должны быть начаты не ранее чем через 6 дней после завершения промывки скважины.

Если по итогам выполнения мероприятий пп. 1-3 сохраняется риск потери зонда (вывалы горных пород в ствол, зацепы видеозонда о неровности стенок), последовательность мероприятий по пп. 1-4 повторяется, либо оформляется акт о невозможности проведения измерений данным методом.

Если по итогам выполнения мероприятий пп. 1-3 не представляется возможным получить четкое изображение стенки ствола скважины п.3 повторяется, либо оформляется акт о невозможности проведения измерений данным методом.

4.2 Полевые видеокаротажные обследования скважин

4.2.1 Составление плана обследований

Производится сбор информации о конструкции скважины, даты и времени проходки, литологическому разрезу, результатам анализа кернового материала, данных ГИС (ГГК-II и АК), включая первичную документацию в цифровом виде и каротажные диаграммы в виде сводного каротажного планшета (рис. 5.1).

Согласно геологическому описанию скважины и глубинам прогнозного положения трещиноватых интервалов, приуроченных к зонам контактов горных пород, дробления и брекчирования и проч., формируется перечень приоритетных глубинных интервалов для обследований. Глубины приоритетных интервалов сверяются с данными ГИС и заносятся в план работ по обследованию скважин.

4.2.2 Подготовка исследовательского оборудования к работе

При проведении видеокаротажных исследований на площадках расположения скважин должно быть в наличии следующее оборудование, помимо каротажного комплекса: аккумулятор 12В либо генератор 220В, набор инструментов автомобильный, эпоксидная смола, изоляционная лента/термоизоляция. Элементы каротажного комплекса должны быть размещены возле устья скважины.

Последовательность действий по запуску Каротажного комплекса:

- включить зонд и на ПК запустить программу записи изображения на ПК (**Модуль 1**);
- соединить все элементы управления зондом между собой: выход ТВ-тюнера каротажного блока соединить с ноутбуком; контроллер счетчика глубины, установленный на блок-балансе, подключить к каротажному блоку через соответствующий разъем; каротажный блок подключить к сети 220В; кабель, передающий видеосигнал, подключить к каротажному блоку через соответствующие разъемы;
- присоединить к зонду наконечник с геофизическим кабелем с помощью винтового разъема, произвести проверку наличия изображения на экране ПК;

- в рабочем окне ПО (Модуль 1) произвести проверку работоспособности видеозаписи на жесткий диск, при необходимости откорректировать параметры изображения;
- разместить резиновые центраторы на корпусе зонда с учетом минимального диаметра скважины;
- опустить камеру в скважину, предварительно установив на устье скважины блок-баланс и выставив нулевые значения счетчика глубины на каротажном блоке и окне программного обеспечения. Начать спуск;
- при проведении записи, следовать рекомендациям программы по созданию файла, месте его сохранения на жестком диске ПК;
- при необходимости использования функции ориентации и координатной привязки, осуществить ее активацию переключением соответствующего тумблера. На экране ПК появятся значения глубины спуска прибора в скважину и его азимута, а также температуры окружающей среды (опционально).

4.2.3 Видеокаротажные обследования стволов скважин

Исследования начинаются после прохождения зондом интервала обсадной колонны. Рекомендуемая скорость погружения зонда – не более 0,5 м/сек. Контроль погружения зонда осуществляется оператором с помощью выведенного на экран ПК изображения, получаемого с фронтальной камеры.

После выхода зонда из обсадной колонны скорость погружения должна быть снижена до значений, при которых возможно выявление на стенке ствола скважины трещиноватого участка.

Боковая камера активируется на локальных участках массива, выделяемых как в ходе подготовительных работ, так и по результатам оперативного анализа информации с фронтальной камеры. Формирование изображения стенок скважины при таком обследовании осуществляется путем перемещения зонда вдоль оси скважины, фиксация трещиноватых участков осуществляется боковой камерой с включенным режимом видеозаписи изображений при ее повороте вокруг своей оси. Для каждого трещиноватого участка должно быть выполнено не менее двух оборотов боковой камеры вокруг своей оси.

4.3 Камеральная обработка результатов обследований

Подготовка полевых данных исследований осуществляется с применением **Модуля 2** и представляет собой следующую последовательность действий:

- выбор на видеозаписи отрезков, снятых боковой камерой, на котором запечатлён участок массива с системой трещин;
- определение тайм-кода-времени начала поворота боковой камеры (после установки зонда на заданной глубине);
- занесение тайм-кода соответствующего интервала обследований в единую таблицу (рис. 4.1). Тайм-код вносится в столбец «идентификационный номер панорамного изображения»;
- загрузка конвертированной видеозаписи в программную среду (диск Google);
- формирование панорамных снимков ствола на выделенном интервале с помощью модуля подготовки.

	В	С	Д	Е	Ф	Г
1	Скважина	P-1				
2	Дата обследования	09.09.2020				
3	Уровень воды, м	13,45				
4	Глубинная отметка, м	Диаметр бурилки, мм	Время	Идентификационный номер панорамного изображения	Файл	Комментарий
230	224,80	112,00	38,04		P-01-005	Трещины коры выветривания
231	225,05	112,00	38,49		P-01-005	Трещины коры выветривания
232	226,40	112,00	40,10	0:40:22:60	P-01-005	Мощная открытая трещина
233	226,85	112,00	43,12	0:41:35:30	P-01-005	Мощная открытая трещина
234	226,80	112,00	42,00		P-01-005	Трещины коры выветривания
235	227,50	112,00	42,57	0:43:08:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
236	227,75	112,00	43,50	0:44:02:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
237	228,80	112,00	44,50	0:45:03:20	P-01-005	Мощная открытая трещина
238	229,05	112,00	45,43		P-01-005	Трещины коры выветривания
239	229,90	112,00	47,00		P-01-005	Трещины коры выветривания
240	230,15	112,00	47,35	0:48:08:20	P-01-005	Трещины коры выветривания
241	230,20	112,00	48,55	0:49:07:05	P-01-005	Трещины коры выветривания
242	230,15	112,00	49,35		P-01-005	Трещины коры выветривания
243	230,60	112,00	50,25		P-01-005	Трещины коры выветривания

Рисунок 4.1 – Таблица интервалов обследований (желтым цветом выделены первоочередные) и соответствующих тайм-кодов/идентификационных номеров панорамных снимков

Модуль 2 задействует «облачный» ресурс/платформа Google «Colaboratory». Для корректной работы Модуля 2 все видеофайлы видеокаротажных обследований скважины должны быть загружены в облачное хранилище «Google». Запуск Модуля 2 осуществляется копированием и переносом в адресную строку браузера ссылки:

<https://colab.research.google.com/drive/1vKtUiso-hr7WytqvwcOdCLQs6cebfbND#scrollTo=Wt-tC7Hv0fm->

Для формирования панорамного изображения интервала из соответствующего видео файла в используемом коде должны быть в обязательном порядке введены следующие данные:

- название видеофайла, например: /gdrive/My Drive/Probe/url/P1/P-1-004.mp4;
- папку для сохранения панорамного снимка, например: /gdrive/My Drive/Probe/pano/P1;
- диаметр ствола скважины в м, например: 0.112;
- тайм-код прохождения камеры через шлейф, например: 01:23:39:10.

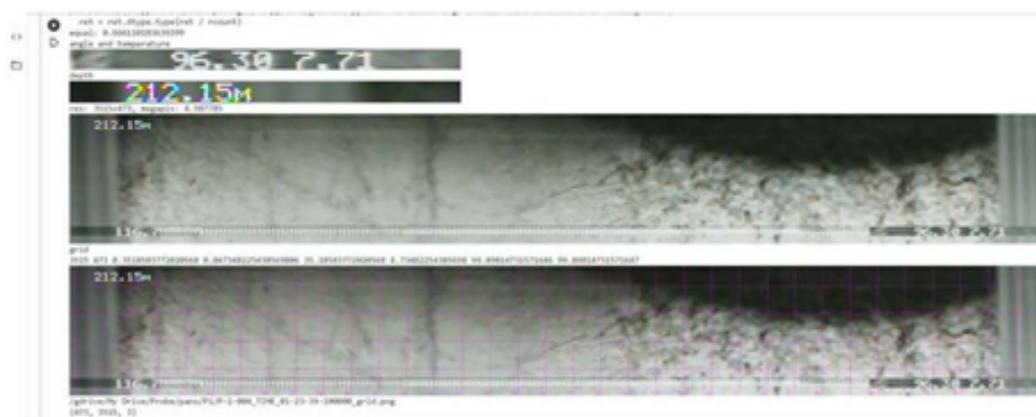


Рисунок 4.2 – Пример панорамного снимка трещиноватого участка в стволе скважины с наложением масштабной сетки

Представленный на рис. 4.2 панорамное изображение формируется программой в папке на Google Drive в двух вариантах – с масштабной сеткой и без нее, имеющих автоматически присвоенные файловые имена – идентификаторы, например: P-1-004_TIME_01-36-11-200000_pano.png; P-1-004_TIME_01-36-11-200000_grid.png. Файлы имеют различные наименования, но общий идентификатор, отраженный в их названии, где «P-1-004» - название исходного файла видеозаписи, TIME_01-36-11-200000 – тайм-код видеозаписи, pano/grid – наличие или отсутствие на изображении масштабной сетки. При разрешении 3467 x 473 пикселей размер панорамного снимка составляет, в среднем, 2-3 Мб.

Последующее выделение трещин из панорамных изображений, их количественная параметризация и определение пространственного положения осуществляется с помощью **Модуля 3**. На рис. 4.3 приведено описание основных этапов линеamentного анализа.

Привязка панорамного изображения в локальной прямоугольной системе координат производится с использованием географической информационной системы (ГИС) QGIS. Для того чтобы задать прямоугольную проекцию изображению, выполняется его сохранение из ГИС с использованием проекции Google Maps Global Mercator, имеющей EPSG – 90091.

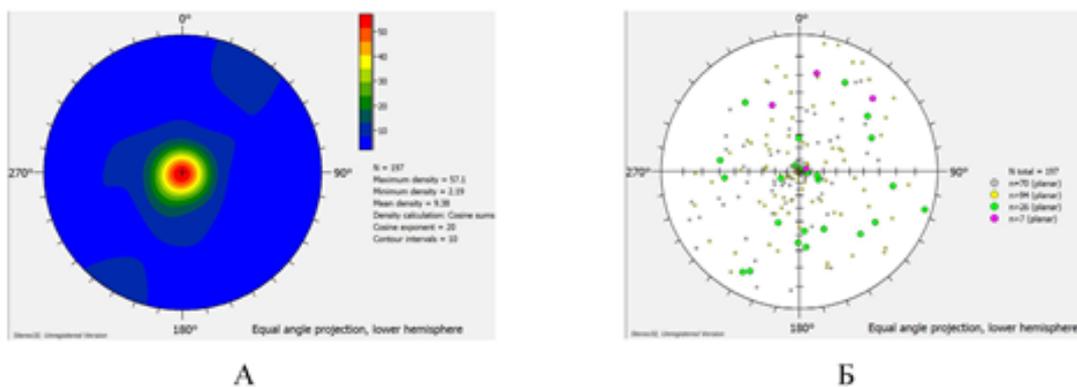
Автоматическое извлечение трещин (линеamentов), согласно методике [14] производится в два этапа:

1. обнаружение границ для получения информации об областях резких изменений значений в соседних пикселях, затем производится обнаружение кривых с использованием модуля LINE программного обеспечения PCI Geomatica;
2. извлечение кривых и их преобразование в векторную форму путем связывания отрезков линии.



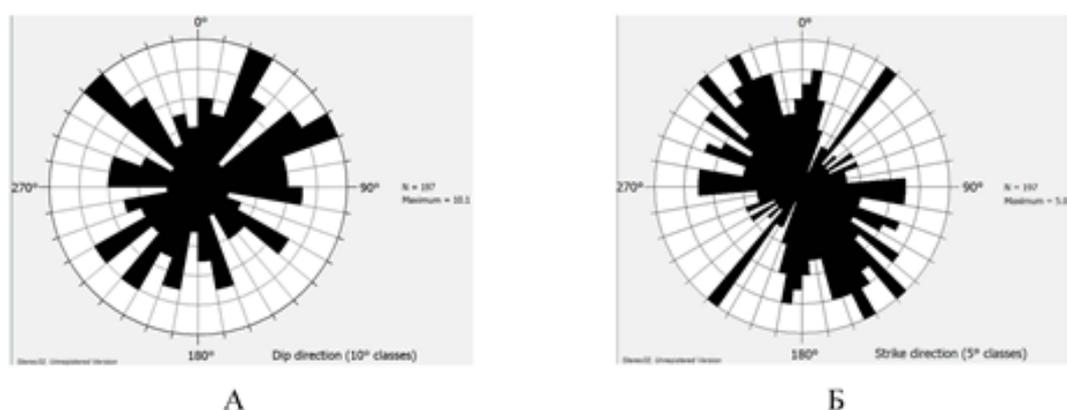
Рисунок 4.3 – Алгоритм обработки панорамных изображений видеокаротажных обследований

Полуавтоматический алгоритм вычисления углов падения, азимутов падения и простирания линеamentов, а также их длин, величины раскрытия, интенсивности трещиноватости выполняется с помощью функционала QGIS. Для графического представления данных о распределении трещиноватости по различным направлениям на основе результатов видеокаротажных исследований применяются диаграмма плотности трещинной сети (по падению), круговая точечная диаграмма трещиноватости (по падению), розы-диаграммы трещиноватости по падению и простиранию (см. рис. 4.4 – 4.5).



N и N total – общее количество трещин, n – количество трещин каждого класса, согласно величине раскрытия; Maximum density - максимальной плотности, Minimum density - минимальная плотность, Mean density - средняя плотность, Density calculation (метод вычисления плотности) = Cosine sums (суммы косинусов).

Рисунок 4.4 – Пример графического представления данных о распределении трещиноватости в форматах диаграммы плотности трещиноватости по падению трещин (А), круговой точечной диаграммы по падению трещин (Б)



N – общее количество трещин, Maximum – максимальное количество трещин в одной группе.

Рисунок 4.5 – Пример графического представления данных о распределении трещиноватости в форматах роз-диаграмм по падению (А) и простиранию (Б)

Статистические данные для расчётного определения неоднородности трещиноватых интервалов оформляются в табличной форме (табл. 4.1)

Таблица 4.1 - Пример оформления результатов количественной характеристики трещин по итогам камеральной обработки результатов видеокаротажных обследований

№	Глубина, м. (Depth)	Наименование вмещающей породы	Тип	Заполнитель	Элементы залегания			Раскрытие, мм (Apert)
					Азимут простирания (Stike)	Азимут падения (Dip)	Угол падения (Dip)	
1	256.30	Гнейсы	Открытая трещина	нет	195	105	50	0.5
2	256.30	Гнейсы	Открытая трещина	Гидроокислы железа	280	190	17	1
3	256.30	Гнейсы	Открытая трещина	нет	190	100	25	3
4	256.30	Гнейсы	Открытая трещина	нет	350	260	5	2

5 Выделение потенциально водопроводящих участков

5.1 Лабораторные измерения скоростей продольных волн

С целью минимизации ошибки выделения трещиноватых интервалов в массиве скальных горных пород необходимо выполнить оценку значений скоростей продольных волн для монолитных участков горных пород в лабораторных условиях. Для этого из кернового материала производится отбор ненарушенных образцов горных пород по каждой литологической разности. Для выявления в образцах дефектов в виде пор или открытых трещин перед проведением тестовых замеров скоростей продольных волн должны быть определены значения коэффициента открытой пористости для каждого образца с применением методики насыщения водой [1]. Результаты лабораторных испытаний оформляются в виде таблицы – см. табл. 5.1.

Таблица 5.1 – Пример оформления результатов лабораторных испытаний на монолитных образцах горных пород для каждой литологической разности, отобранных из кернового материала

№	Глубина отбора пробы, м.	Скорость, м/с	Кoeff. пористости, %	Типы горных пород
1	424,1	5659	0,1	Плагиогнейсы биотитовые
...				

5.2 Выбор потенциально водопроводящих интервалов в скважине

Результаты лабораторных исследований скорости Р – волн (табл. 5.1.) должны быть использованы для определения количественных критериев выделения монолитных участков горных пород, а также уточнения диапазонов значений скоростей для S волн, амплитуд Р- и S- волн, коэффициентов эффективного затухания, выявленным по результатам АК на трещиноватых участках горных пород, определенных по результатам видеокаротажных исследований, а также для уточнения диапазонов значений горных пород в части их плотностных параметров, регистрируемых ГГК-II (интенсивности поглощения искусственного гамма-излучения (^{137}Cs)).

Оборудование АК (Парус-48) позволяет получать количественные значения параметров распространения Р – и S – волн горной породе. С задействованием результатов лабораторных определений скорости Р – волны выделяются схожие значения скорости Р – волн в наборе первичных данных, полученных по итогам АК. Таким же образом определяются амплитуды и коэффициенты эффективного затухания для данного типа волн в монолитных зонах, вскрытых скважиной. Аналогичным образом определяются характеристики S-волн (скорости, амплитуды и коэффициенты эффективного затухания), а также значения интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs), регистрируемые оборудованием ГГК-II и характеризующие плотностные параметр для данных глубинных отметок положения монолитных интервалов.

Базовыми критериями надежного выявления потенциально водопродящих интервалов является одновременное выполнение в интервале следующих условий:

- наличие открытых трещин без минерального заполнителя в видимой зоне – как единичных, так и их систем;
- средние значения снижения скоростей прохождения (V) и амплитуд (A) Р-волн на 9% и 20%, S-волн на 20% и 41%; увеличения значений коэффициентов эффективного затухания (α) на 20% и 42% для Р- и S- волн соответственно; снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs) в среднем, на 6%.

Для упрощения процесса выполнения исследований с применением методики ОФР необходимо выделить трещиноватые интервалы массива, на которых будут производиться соответствующие гидродинамические исследования. Данные интервалы (рис. 5.1) определяются в соответствии с вышеперечисленными критериями.

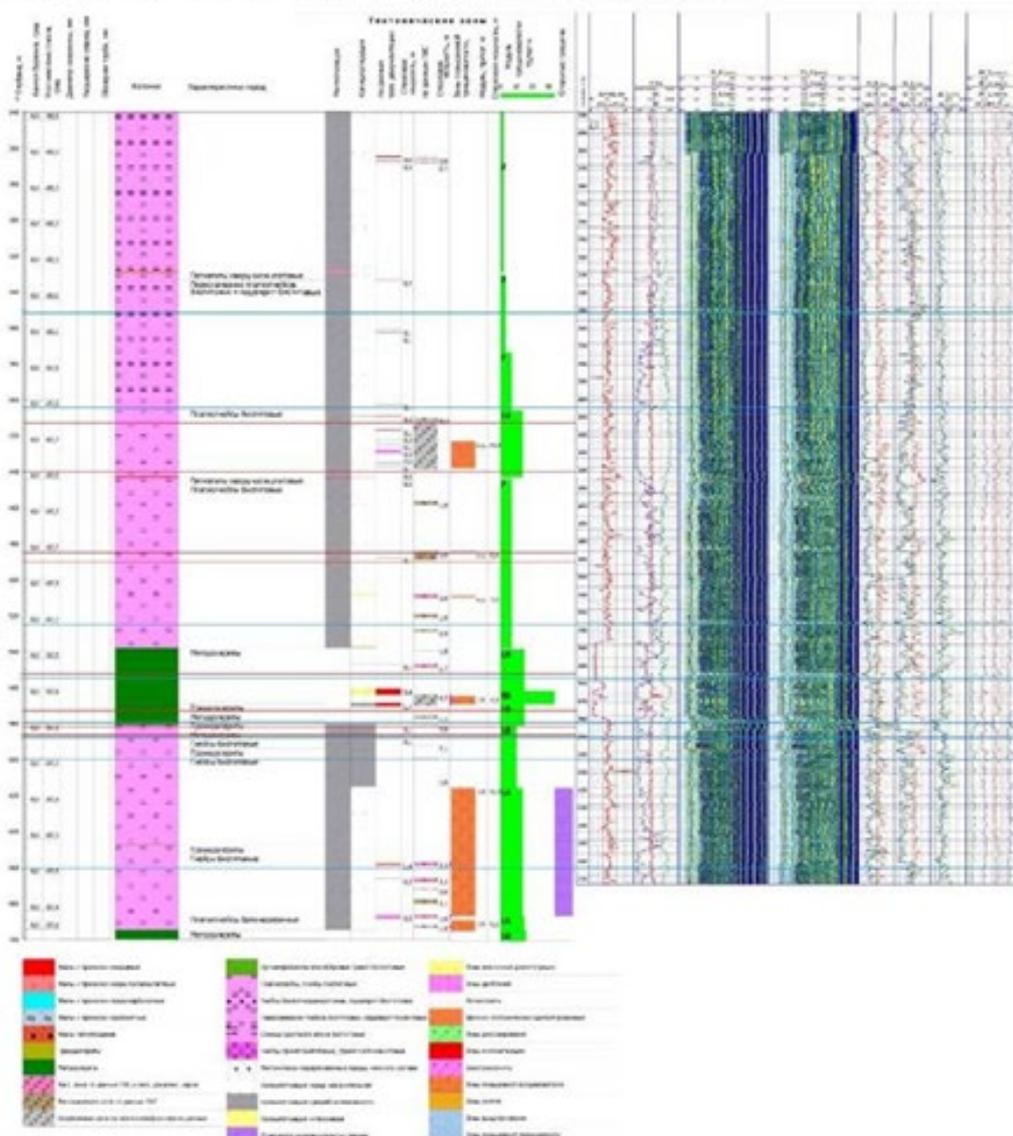


Рисунок 5.1 – Пример положения потенциально водопродящих интервалов на основе сопоставления результатов видеокаротажных обследовани и ГИС для поинтервальных опытно-фльтрационных исследований

6 Верификация положения водопроводящих трещиноватых интервалов

В выделенных по итогам комплексного анализа результатов ГИС, видеокаротажных обследований потенциально водопроводящие участки должны быть выполнены поинтервальные ОФР с применением соответствующего оборудования (см. раздел 3.4).

6.1.1 Методика проведения ОФР с применением поинтервальных откачек

Исследования выполняются в соответствии с «Рекомендациями по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин» [3]. В ходе работ также устанавливаются взаимосвязи поверхностных и подземных вод, зависимости дебита от понижения уровня в скважине и химический состав подземных вод. Для определения проницаемых интервалов возможно проведение экспресс-нагнетаний с быстрым повышением избыточного давления на пласт или жилу. Наличие реакции при таком воздействии связано с откликом водопроводящей зоны и отсутствием реакции для непроницаемой. Экспресс-опробование открытого ствола скважины позволяет определить суммарную водопроводимость пород, характеризующую всю открытую часть ствола скважины.

Водопроводимость (T , м²/сут;) считается обобщенной характеристикой водопроницаемости или проницаемости пласта в целом:

$$T = k_{\phi} \cdot m, \quad (1)$$

где: k_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут; m – мощность водоносных пород, м.

Обработка результатов исследований производится с помощью апробированных аналитических решений Купера [3], Пикинга [4], Брэдхофта [6], Боувера [6], Хворслева [7].

6.1.2 Методика проведения ОФР с применением поинтервальных нагнетаний

Для ОФР с применением поинтервальных нагнетаний применяется методика Люжона [8], суть которой заключается в непрерывном нагнетании воды в изолированный пакерами интервал ступенями в 1–2 атмосферы. Как правило проводят до 5–6 ступеней наращивания, а затем снижение давления. При этом на каждой ступени фиксируется расход нагнетаемой жидкости. Нагнетание проводится до тех пор, пока расход не стабилизируется, после чего переходят к следующей ступени. Максимальная ступень нагнетания, как правило, не должна превышать 10 атм. Успешное проведение ОФР по методике Люжона требует строгого выполнения ряда последовательных действий, контроля герметичности пакеров во время проведения экспериментов, а также соблюдения допустимых давлений для подачи на пакеры и в опробуемый интервал.

6.1.3 Длительные нагнетания в проницаемые интервалы пород

Особенностью слабопроницаемых скальных массивов является то, что проницаемые интервалы, обнаруженные при поинтервальных ОФР, могут быть ограничены в пространстве и не пересекаться с другими трещиноватыми водопроводящими зонами. Для выявления гидравлической связи проницаемых зон в выделенном проводящем интервале выполняют длительное нагнетание с постоянным давлением. Предполагается, что в случае связной

системы трещин будет происходить стабилизация расхода во времени, а при замкнутой системе на больших временах будет происходить резкое уменьшение расхода. Обработку результатов длительных нагнетаний производят с использованием решений Хантуша [9] и Стернберга [10].

Количественные оценки водопроводящих свойств, полученные по результатам интерпретации результатов поинтервальных ОФР представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Пример оформления результатов интерпретации ОФР в трещиноватых интервалах

№	Интервалы	Проводимость (Км), м ² /сут	Коэффициент фильтрации (к), м/сут	Методика ОФР
1.	497,60-507,6	0,002	2,0*10 ⁻⁴	Нагнетания
2.	500,28-700,0	0,034	1,71*10 ⁻⁴	Откачки
...				

7 Расчёт фильтрационной анизотропии

Для оценки объёмной анизотропии водопроводящих характеристик трещиноватых горных пород в верифицированных по итогам поинтервальных ОФР интервалах применяется методика вычисления тензора трещинной проницаемости. В качестве исходных данных используются количественные параметры трещин, включая их пространственное положение, определенные по итогам видеокаротажных исследований необсаженных участков стволов разведочных скважин (табл. 4.1). Расчёт тензора трещинной проницаемости k_n (м², см², мм²) в любом совпадающем с градиентом давления направлении выполняется с применением выражения (1), согласно методике Ромма [11, 13]

$$k_n = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^N b_i^3 \Gamma_i \left\{ 1 - [\sin \omega_i (\cos \delta_i \cos \beta - \sin \delta_i \cos \alpha) + \cos \omega_i \cos \gamma]^2 \right\}, \quad (2)$$

где ω_i и δ_i – угол и азимут падения системы трещин i -го номера; α , β и γ – углы между вектором градиента давления, совпадающим с направлением, в котором измеряется k_n и координатными осями X, Y, Z. Γ_i – интенсивность трещиноватости, характеризуемая, как отношение площади трещин к единице объема горного массива (м⁻¹), b_i – раскрытие трещины (м).

Интенсивность трещиноватости Γ_i (м²/м³) – отношение площади трещин к единице объема трещиноватого горного массива. Для каждого водопроводящего интервала, выделенного по итогам комплекса каротажных обследований в скважине с использованием полученных количественных характеристиках трещин (табл. 4.1) определяются значения k_n . Расчёт значений k_n производится по каждой потенциально водопроводящей системе трещин в интервале с учётом параметра интенсивности трещиноватости, характерной для сети трещин в интервале. Неравномерность значений k_n в потенциально водопроводящих интервалах стволов скважин позволяет оценить значения коэффициента фильтрации k_ϕ (2), а также других характеристик проницаемости трещиноватых участков скальных пород, в частности: водопроводимости T (3) и, при наличии дополнительных исходных данных, расхода воды Q (4) в водопроводящем интервале ствола скважины относительно направлений осей X, Y, Z.

$$k_{\phi} = k_n \frac{\gamma \cdot g}{\mu}, \quad (3)$$

где k_n – трещинная проницаемость (м^2), γ – плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$) жидкости, g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$), μ – динамическая вязкость жидкости ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

$$Q = k_{\phi} \frac{\Delta p F}{\mu l}, \quad (4)$$

где: $\frac{\Delta p}{l}$ – градиент давления, F – площадь фильтрации.

Полученные расчётные значения k_n представляются в виде числовых данных в формате *xlsx, а также в графическом – в виде диаграмм и эллипсоидов трещинной проницаемости, отражающих зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и всевозможных направлений вектора направления градиента давления в пространстве (рис. 7.1).

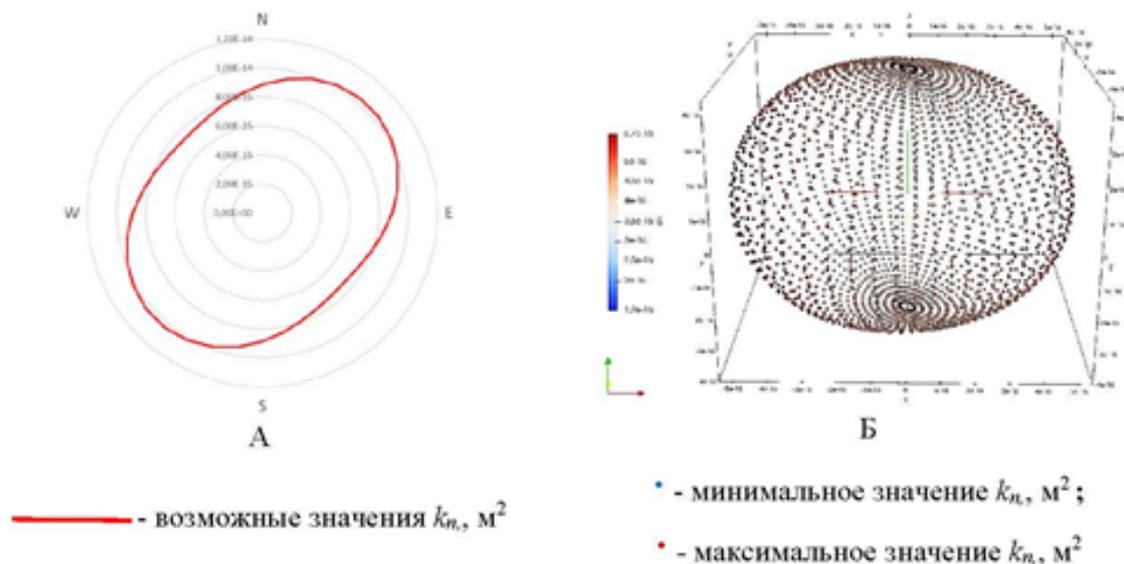


Рисунок 7.1 – Графическое отображение неоднородности трещинной проницаемости k_n (м^2) в трещиноватом водопрводящем интервале (556,7-557,0 м) ствола скважины. Диаграмма трещинной проницаемости (А); Эллипсоид трещинной проницаемости (Б)

Для расчётов применяется программа Microsoft Excel, для построения диаграмм и эллипсоидов трещинной проницаемости применяется программное обеспечение ParaView, находящееся в свободном доступе (<https://www.paraview.org/>).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Hirono T., Takahashi M., Nakashima S. In situ visualization of fluid flow image within deformed rock by X-ray CT // *Engineering Geology*. – 2003. – № 70 (1-2). – P. 7-46.
2. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением
3. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров грунтов методом откачки воды из скважин. ПНИИИС.— М.: Стройиздат, 1986. – 143 с.
4. Cooper Jr H. H., Bredehoeft J. D., Papadopoulos I. S. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water // *Water Resources Research*. – 1967. – Т. 3. – №. 1. – С. 263-269.
5. Picking L. W. Analyzing the recovery of a finite-diameter well after purging at an unknown rate--A substitute for slug-testing // *Ground Water*. – 1994. – Т. 32. – №. 1. – С. 91.
6. Bredehoeft J. D., Papadopoulos S. S. A method for determining the hydraulic properties of tight formations // *Water Resources Research*. – 1980. – Т. 16. – №. 1. – С. 233-238.
7. Bouwer H., Rice R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells // *Water resources research*. – 1976. – Т. 12. – №. 3. – С. 423-428.
8. Hvorslev M. J. Time lag and soil permeability in ground-water observations. – Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army, 1951. – №. 36.
9. Housley A. C. Routine interpretation of the Lugeon water-test // *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. – 1976. – Т. 9. – №. 4. – С. 303-313.
10. Hantush M. S. et al. Hydraulics of wells // *Advances in hydroscience*. – 1964. – Т. 1. – С. 281-432.
11. Sternberg Y. M. Some approximate solutions of radial flow problems // *Journal of Hydrology*. – 1969. – Т. 7. – №. 2. – С. 158-166.
12. Ромм Е. С. Фильтрационные свойства трещиноватых пород. – М.: Недра, 1966. – 283 с.
13. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. – Л.: Недра, 1985. – 240 с
14. Иванов П. Н., Безруков В. И. Экспериментальное исследование упругих свойств углей различной степени тектонической нарушенности методом лазерноультразвуковой спектроскопии // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2021. – №. 4-1. – С. 26-40

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРАКТИЧЕСКОЕ ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Красноярск
ГЕОЛОГИЯ

Акционерное общество
«Красноярская горно-геологическая компания»

«The Krasnoyarsk mining-geological
joint-stock company»

№ 01/121 от 15.03.24г.

на № _____ от _____

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационного исследования
Казакова Константина Сергеевича, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук, по теме: «Разработка метода определения анизотропии
фильтрационных свойств массива скальных пород, предназначенного для захоронения
радиоактивных отходов»

Настоящей справкой подтверждаем, что разработанная Казаковым Константином Сергеевичем «Методика определения анизотропии фильтрационных свойств водопроводящих интервалов скальных пород скважинными методами» (далее: Методика) принята для практического использования в АО «Красноярская горно-геологическая компания» (АО «Красноярскгеология»).

Результаты диссертационного исследования К. С. Казакова на соискание учёной степени кандидата технических наук, включая разработанную Методику, используются в ходе выполнения геологоразведочных работ по объекту: разведка участка захоронения радиоактивных отходов (Енисейский участок Нижне-Канского массива) Лицензия КРР 16117 ЗД от 22.07.2016 г. Лицензия КРР 014222 ЗП от 26.04.2023 г., выполняемых в рамках реализации утверждённой руководством Госкорпорации «Росатом» «Комплексной программы исследований в обоснование долговременной безопасности захоронения РАО и оптимизации эксплуатационных параметров».

Достоверность параметров, получаемых с применением разработанной К. С. Казаковым Методики, подтверждается результатами полевых опытно-фильтрационных работ.

И.о. генерального директора

А. Г. Бледнов

Главный геолог,
канд. геол.-мин. наук

В. Ф. Кошкин

Главный гидрогеолог,
канд. геол.-мин. наук

А. Ю. Озерский