

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

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

Казаков Константин Сергеевич

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

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

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук Гупало Владимир Сергеевич

Москва, 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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. Захоронение предполагается осуществлять в различных типах горных пород - глины, соляные пласты, скальные породы.

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. 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». 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). 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. Вышеперечисленные аргументы задают приоритет поиска решений по получению реалистичных характеристик водопроводящих свойств горных пород на участках планируемого размещения ПГЗРО.

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.

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 водопроводимости для прогноза долговременной безопасности глубинного захоронения РАО.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. определить перечень количественных параметров трещинной сети, оказывающих наибольшее влияние на водопроводящие свойства массива скальных пород;
2. разработать оборудование, позволяющее получать количественные характеристики систем трещин, значимые для оценки водопроводящих 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 водопроводимости на основе результатов исследований, выполненных прямыми и косвенными методами;
5. оценить возможность применения расчётного 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) 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%.

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 расчётных методов.

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 водопроницаемости трещиноватых участков горных и их верификацию с использованием результатов скважинных гидродинамических исследований.

Научная новизна работы заключается в:

- 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;
- 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;
- 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;
- 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 работы и реализация полученных результатов:

- 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 объем 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен аналитический обзор применяемых методов изучения трещиноватости, включая подходы к определению основных параметров систем трещин массивов скальных пород в натурных условиях и прогнозированию их влияния на водопроводящие свойства массивов. Сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

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. Протождяконова, М.В. Раца, Ф.П. Саваренского, И.Г. Сковородникова, 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. 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. Анализ литературных источников позволил установить, что:

- характеристики трещинной сети оказывают влияние на параметры движения жидкости в массиве скальных пород, в т.ч. определяют направление движения подземных вод в отдельных блоках и массиве в целом;
- перечень количественных параметров трещинной сети, влияющих на водопроводящие свойства скального массива, достаточно широк и включает в себя

пространственное положение, характеризующееся азимутами падения и простирания, углом падения, раскрытием трещин и интенсивностью их распространения;

- получены эмпирические зависимости водопроводящих свойств скальных массивов от количественных параметров и пространственного положения трещинных систем;
- несмотря на наличие теоретических подходов к оценке водопроводящих свойств скальных массивов в зависимости от параметров присутствующих в них трещинных систем, в практике инженерных изысканий практический опыт выполнения данных оценок практически отсутствует.

Анализ подходов к определению основных параметров систем трещин в натурных условиях показал, что для их количественной характеристики существует широкий набор прямых и косвенных методов изучения. Косвенные методы, такие как геофизические методы, позволяя спрогнозировать изменчивость параметров по глубине массива, предполагают получение лишь относительных количественных характеристик массива и требуют верификации прямыми методами. Прямые методы, подразумевающие изучение трещиноватости на породных обнажениях, позволяют получать наиболее точные количественные показатели. При этом комплексные решения по количественной характеристике систем трещин прямыми методами с использованием сети разведочных скважин, отсутствуют. Большая часть методик прямой оценки водопроводящих характеристик (скважинных опытно-фильтрационных исследований) позволяет получить количественную оценку параметров проницаемости горных пород по разрезу/глубине без учёта неравномерности их распределения в различных направлениях. Помимо прямых методов существуют расчётные методы оценки неоднородности водопроводящих свойств скальных пород, базирующиеся на применении количественных характеристик, включая пространственное положение систем и единичных трещин. В их число входит метод определения тензора трещинной проницаемости. Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости являются следующие количественные характеристики трещин: азимуты падения и простирания, углы падения, раскрытие трещин и интенсивность трещиноватости.

Оценка количественных показателей трещинной сети может быть произведена в ходе видеокаротажных обследований, но большинство каротажных комплексов позволяет 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 количественных характеристик в массиве не представляется возможным.

Проведенный анализ позволил сформулировать цель и решаемые в работе задачи.

Вторая глава посвящена разработке, лабораторным и полевым испытаниям каротажного программно-аппаратного комплекса, позволяющего фиксировать количественные параметры трещин, оказывающие наибольшее влияние на водопроводящие свойства, и необходимые для выполнения расчётных оценок фильтрационной анизотропии трещиноватых зон в массивах скальных горных пород.

Исходя из определенного в первой главе перечня количественных показателей сети трещин, оказывающих наибольшее влияние на водопроводящие свойства массива, каротажное оборудование должно обладать следующими возможностями:

- созданием имеющих пространственную координатную привязку панорамных (360°) цветных фотоснимков трещиноватых участков в незакреплённом 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 незакреплённом стволе скважины.

В состав разработанного в рамках диссертационного исследования каротажного программно-аппаратного комплекса входят: скважинный зонд, предназначенный для работы в водонаполненных скважинах глубиной до 1000 м; каротажный блок, с помощью которого осуществляется управление зондом и передача поступающих с зонда данных; счётчик глубины погружения зонда; электрическая лебёдка; пакет программного обеспечения для обработки данных, получаемых в ходе видеокаротажных обследований.

В соответствии с вышеперечисленными требованиями, в аппаратной части зонда использованы статичная фронтальная камера и вращающаяся вокруг своей оси камера бокового обзора. Фронтальная камера позволяет выполнять первичное визуальное выявление трещиноватых участков массива в стволе, а камера бокового обзора предназначена для формирования панорамных изображений стенок ствола (рис. 1). Обе камеры – цветные и позволяют получать изображения высокой четкости на расстоянии от 5 мм до 15 см в водной среде. Фокус боковой камеры настроен исходя из цели получения оптимального изображения стенки скважины диаметром 60-300 мм. В качестве осветителей применены маломощные диоды, не требующие специального радиатора охлаждения. Спектр света диодов близок к дневному, что обеспечивает корректную цветопередачу панорамного изображения, получаемого каждой камерой зонда.

Привязка изображений к сторонам света выполняется электронным компасом, интегрированным в управляющую электронную плату, которая, в свою очередь, объединена с согласующей платой управления камерами/режимами съемки и вращения шагового двигателя.

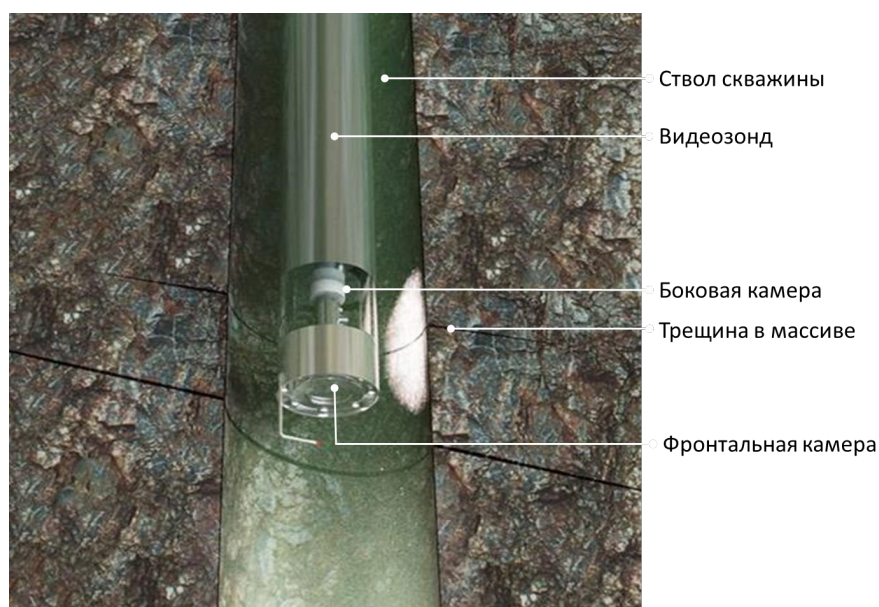


Рисунок 1 – Принципиальная схема обследования прискважинной зоны массива пород с помощью разработанного оборудования

Такое решение позволяет получать значения магнитных азимутов без дополнительных измерений. Перемещение зонда по скважине осуществляется с помощью геофизического кабеля, через который предаются данные обследования на каротажный блок и управляющие сигналы на аппаратную часть зонда. Каротажный блок предназначен для ретрансляции видеосигнала с камер, показаний электронного компаса и данных о глубине погружения зонда на экран полевого ноутбука. С помощью каротажного блока также производится управление режимами получения данных с видеокамер - фронтальной и боковой, работой электрической лебёдки.

Данные о глубине нахождения зонда считываются каротажным блоком с колёсного счётчика, вращаемого геофизическим кабелем. Счётчик глубины 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.

Технические характеристики разработанного зонда:

- диаметр корпуса – 48 мм, с центрирующими приспособлениями – 54 мм;
- напряжение питания – 12 В, встроенный в корпус аккумулятор – 9,9 А/ч;
- 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 АHD, модель

DMCF131, 1,3 Мп, 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.

Для обработки получаемых в ходе видеообследований данных сформирован пакет программного обеспечения (ПО). В состав данного пакета включены:

- модуль для проведения полевых исследований. Является серийным ПО и предназначен для записи изображений с фронтальной и боковой камер в цифровом формате и формирования видеофайлов с результатами исследований;

- модуль подготовки полевой информации к камеральной обработке. Представляет собой совокупность специально разработанных программных кодов для преобразования видеофайлов в панорамные снимки с наложением на них масштабной сетки и назначением каждому снимку координатной привязки;

- модуль камеральной обработки, систематизации и визуализации результатов полевых исследований. В основе модуля задействовано серийное ПО («QGIS»). Алгоритм обработки панорамных снимков в QGIS представлен на рис. 2.



Рисунок 2 – Алгоритм обработки панорамных снимков скважин

Разработанный каротажный программно-аппаратный комплекс прошёл лабораторные и полевые испытания. Лабораторные исследования проводились в НИТУ МИСИС на макете, позволяющем имитировать поверхность стенок ствола скважины и мелкие элементы текстуры горных пород скального массива. Была проверена работоспособность и корректность информации, получаемой с блока камер, счетчика глубины погружения, электронного компаса и программных модулей. Полевые испытания производились на исследовательском полигоне

МГУ им. М.В. Ломоносова в незакреплённой водонаполненной скважине. Результаты лабораторных и полевых испытаний позволили сделать вывод о пригодности разработанного исследовательского оборудования, подготовить алгоритм выполнения видеокаротажных обследований и определить перечень требований к пригодности скважин для исследований.

Третья глава посвящена проведению исследований параметров сети трещин на участке планируемого создания ПГЗРО (участок Енисейский).

Участок сложен осадочными, вулканогенно-осадочными отложениями архейского возраста, метаморфизованными в условиях гранулитовой или высоких ступеней амфиболитовой фаций регионального метаморфизма. Дизъюнктивные структуры представлены зонами дробления и разрывами без смещения – трещинами, зонами повышенной трещиноватости и выщелачивания. Морфология систем трещин свидетельствует об их тектоническом происхождении и принадлежности к трещинам скалывания. Все они характеризуются прямолинейной или слабо извилистой формой, пересекают гнейсы и прорывающие их дайковые тела. Зоны повышенной трещиноватости тесно связаны с зонами дробления, как правило, приурочены к их крыльям и развиты по всему разрезу.

В массиве выделяется три гидрогеологических элемента: горизонт четвертичных элювиально-делювиальных отложений; трещинные воды зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильные воды условно водонепроницаемой толщи скального массива на глубинах более 400 м. Питание трещинно-жильных подземных вод осуществляется за счет перетока из зоны экзогенной трещиноватости; уровни устанавливаются на глубинах от 0,5 до 90 м и отличаются между собой иногда весьма значительно (до 80 м) на коротких расстояниях.

Исследования параметров сети трещин в разведочных скважинах, пробуренных на участке, выполнялись с применением разработанного каротажного программно-аппаратного комплекса. Для подбора оптимальных настроек зонда при подготовке к исследованиям, а также определения пригодных для проведения исследований интервалов глубин учитывались актуальные конструктивные исполнения скважин.

В качестве исходных данных для планирования видеокаротажных обследований были использованы материалы отчётов по итогам геологоразведочных работ поисковой (2003—2010 гг.) и оценочной (2010—2014 гг.) стадий, выполненных на участке Енисейский, включая данные анализа кернового материала и построенные по материалам бурения геологические колонки скважин (рис. 3). Т.к. бурение скважин производилось без ориентирования керна в пространстве, оставались нерешёнными вопросы о действительном пространственном положении зон нарушений и систем трещиноватости. В период полевого сезона 2020 года на участке Енисейский были обследованы скважины Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, Р-8, 1-Е. Схема их расположения представлена на рис. 4.

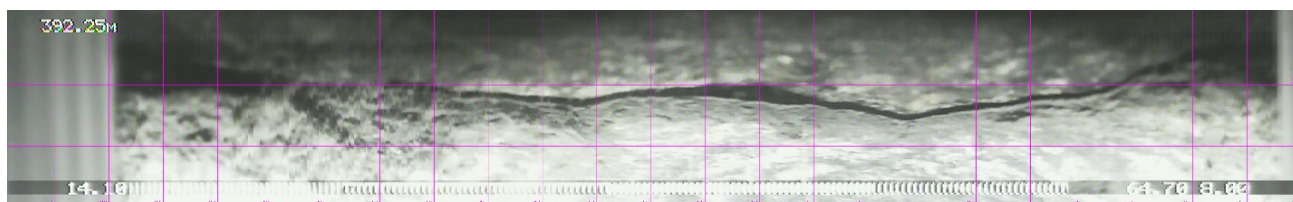


Рисунок 5 – Субгоризонтальная открытая трещина на глубине 392,25 м (скважина 1Е)

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 местоположении интервалов развития трещиноватости. В результате обработки панорамных изображений получены статистические данные о количественных характеристиках и пространственном положении трещиноватых зон в массиве на разных глубинах (рис. 6). По итогам анализа статистического распределения трещин в обследованных скважинах было установлено, что в зависимости от положения трещин относительно оси скважины можно выделить три основных типа систем трещин:

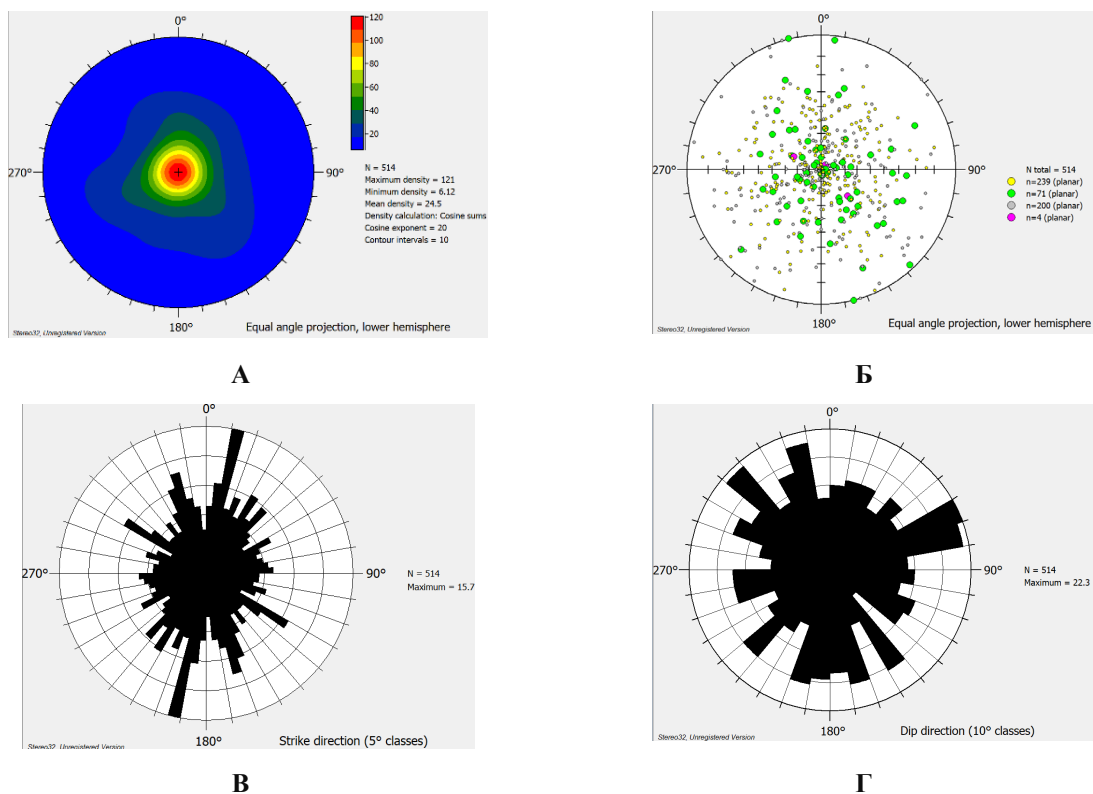
- угол к оси скважины $0^{\circ} - 30^{\circ}$, т.е. крутопадающие трещины;
- угол к оси скважины $30^{\circ} - 60^{\circ}$ – трещины среднего падения;
- угол к оси скважины $60^{\circ} - 90^{\circ}$ – пологозалегающие трещины.

Также были установлены величины раскрытия трещин в их естественном состоянии (в массиве) и их пространственная ориентировка относительно сторон света. При определении параметров залегания трещин были учтены данные инклинометрии, полученные по факту их проходки.

Положение границ трещинных зон в т.ч. их протяженность и параметры распределения трещин выявленных видеокаротажным методом были сопоставлены с результатами оценки трещиноватости по керну. Определено, что выполненная ранее оценка трещиноватости по керну, представляющая собой подсчёт количества трещин на погонный метр керна (модуль трещиноватости, $M_{тр}$), является завышенной в сравнении с результатами видеокаротажных обследований. Разница в значениях модуля трещиноватости может достигать порядка 10 – 60% в одних и тех же интервалах.

Возможными причинами завышенных по сравнению с данными видеокаротажных обследований значений $M_{тр}$ могут быть:

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



Раскрытие трещин:

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

Maximum density - максимальной плотность, Minimum density - минимальная плотность, Mean density - средняя плотность, Density calculation (метод вычисления плотности) = Cosine sums (суммы косинусов). N – общее количество трещин, Maximum – максимальное количество трещин в одной группе.

Рисунок 6 – А – Диаграмма плотности трещинной сети (по падению), Б – круговая точечная диаграмма (по падению), розы диаграммы по простираию (В) и падению (Г). Скважина Р-1, интервал: 113,1 – 604,0 м

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 $M_{тр}$ установлено, что определение положения потенциально водопрводящих трещиноватых зон в массиве, а также их границ с задействованием результатов видеокаротажных обследований скважин является предпочтительным вариантом.

Четвёртая глава посвящена установлению комплекса скважинных методов для выделения и оценки зон возможной водопрводимости.

Результаты выполненных с помощью разработанного каротажного комплекса видеообследований не могут быть единственным основанием для вывода о задействовании выявленных трещин в водообменных процессах. За пределами границ видимой зоны трещины

могут иметь минеральный заполнитель, кроме того, с учетом имеющихся представлений о слоистой структуре вмещающих пород, взаимные пересечения между трещинами могут отсутствовать. Это определяет необходимость применения комплекса дополнительных методов, верифицирующих результаты видеокаротажных обследований и формирующих дополнительные аргументы для отнесения трещиноватых участков к водопроводящим зонам.

С целью установления комплекса скважинных методов, позволяющих выполнять количественную оценку показателей структуры и водопроводящих свойств трещиноватых зон в скальных горных породах, был проведен совместный анализ результатов видеокаротажных и скважинных геофизических исследований (ГИС), а также поинтервальных опытно-фильтрационных работ, выполненных на участке Енисейский. Для выявления взаимосвязи между количественными значениями, получаемыми в результате применения прямых (видеокаротажные обследования) и косвенных методов (скважинные геофизические исследования) выделения потенциально водопроводящих интервалов был выполнен корреляционный анализ. Значения коэффициентов корреляции (r) представлены в таблице 1. 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.

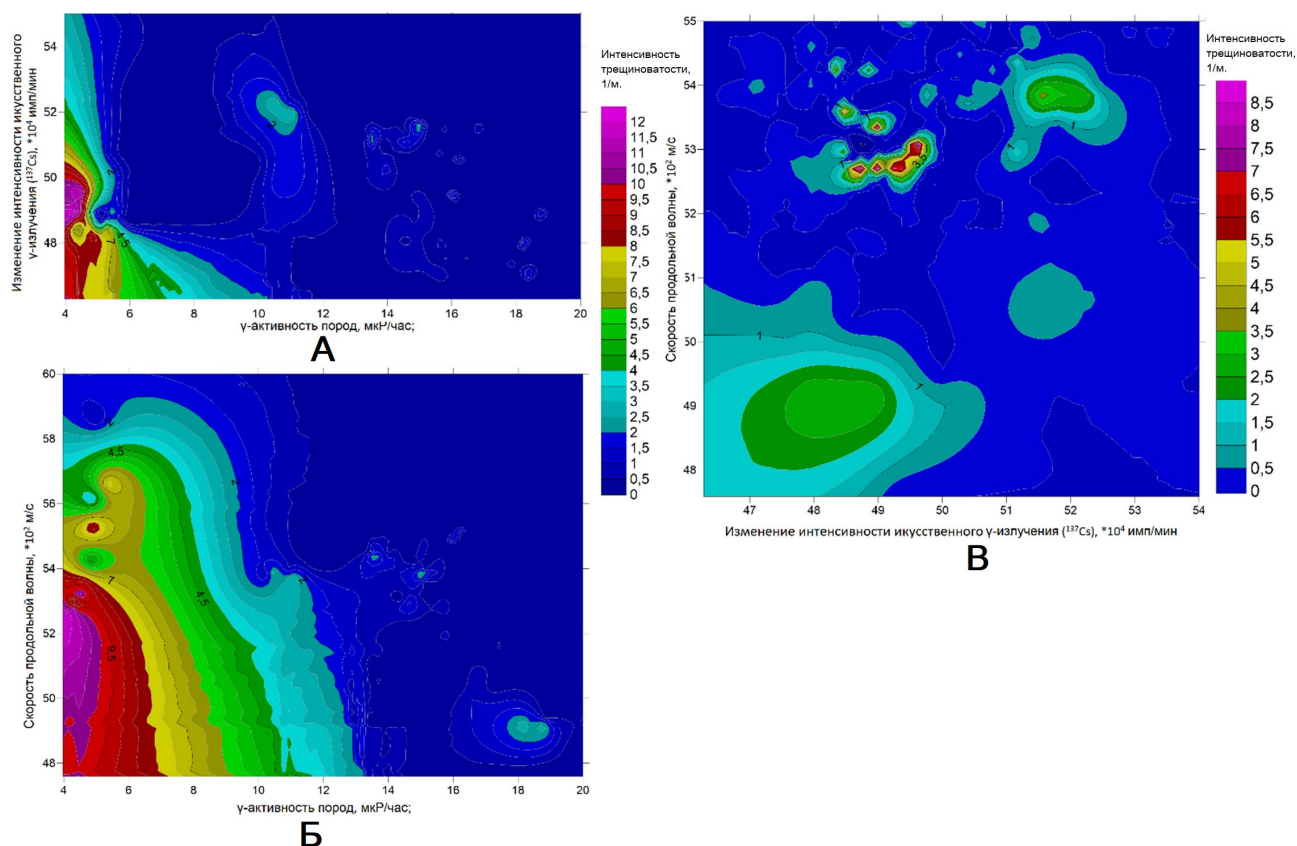
Таблица 1 – Значения коэффициентов корреляции, отражающие согласованность изменения геофизических параметров горных пород на глубинах трещиноватых участков массива в скважине Р-8

	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.

По итогам сравнительного анализа первичной документации по результатам ГИС, выполненных в скважинах на исследуемом участке, установлена приемлемая сходимость по

совокупному объему 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 водопроводящие зоны в открытых стволах скважин. На рис. 7 представлены диаграммы, отражающие чувствительность методов ГИС по отношению к различным значениям интенсивности трещиноватости.



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

Отмечено, что наилучшая сходимость положения открытых трещин, определённых в ходе видеокаротажных обследований, отмечается на участках горных пород с пониженными значениями скоростей продольных волн (АК). 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. 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.

– 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.

В ходе анализа первичных/полевых данных ГИС также отмечено, что ГК менее результативен для выделения потенциально водопроводящих 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.

С целью определения скоростных и амплитудных характеристик распространения упругих волн в монолитных интервалах и минимизации ошибки выделения трещиноватых участков в массиве выполнена лабораторная оценка значений скоростей продольных волн на образцах горных пород участка Енисейский. Для лабораторных исследований были использованы образцы основных типов горных пород, слагающих массив: плагиогнейсы биотитовые, трахидолериты и метадолериты.

Лабораторные исследования выполнены на лазерном ультразвуковом дефектоскопе УДЛ-2М, работающем в режиме эхо-скопии при одностороннем доступе к исследуемому образцу. Для повышения достоверности результатов лабораторных исследований по каждому образцу были определены значения коэффициента открытой пористости с применением методики насыщения водой (таблица 2). Результаты лабораторных определений скоростей

продольных волн были использованы в качестве количественных критериев выделения монолитных участков горных пород по результатам АК.

Отталкиваясь от полученных на образцах горных пород в лабораторных условиях значений скоростей продольных волн, были определены диапазоны значений скоростей, амплитуд и коэффициентов эффективного затухания продольных и поперечных волн (Р-волн и S- волн) в монолитных интервалах скважины Р-8. Также на соответствующих глубинах были определены диапазоны величин параметров физических свойств горных пород, регистрируемых ГГК-П, свойственные монолитным интервалам.

Таблица 2 – Результаты лабораторных исследований образцов горных пород участка Енисейский

№	Глубина отбора образца, м / измерение	Скорость Р-волн, м/с	Коэфф. пористости, %	Наименование породы
1	424,0 / 1	5659	0,1	Плагинейсы биотитовые
	424,0 / 2	5598		
2	538,0 / 1	5214	0,3	Плагинейсы 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

С целью верификации результатов исследований, полученных косвенными методами, и определения количественных параметров водопроницаемости пород в выделенных по итогам каротажных исследований интервалах скважины Р-8 были проведены опытно-фильтрационные работы (ОФР). Для данной скважины были отмечены повышенные значения показателей трещиноватости; более 15% протяженности ее ствола пересекают нарушенные зоны. В составе ОФР выполнены экспресс-откачки и нагнетания в изолированные резиновыми водозаполненными манжетами (пакерами) интервалы открытого ствола скважины (рис. 9).

По результатам ОФР было уточнено положение водопроводящих интервалов в стволе и количественно оценены их водопроводящие характеристики. Отмечено, что к водопроводящим интервалам отнесена часть трещиноватых зон, выделенных по результатам каротажных исследований, что подтверждает необходимость верификации результатов комплекса каротажных обследований методом поинтервальных ОФР.

В подтверждённых результатами ОФР водопроводящих интервалах с задействованием параметров геофизических полей, свойственных для монолитных интервалов скважины Р-8 были сформированы критерии выделения водопроводящих интервалов трещиноватых горных

пород. В частности, количественно оценены изменения скоростей, амплитуд, коэффициентов эффективного затухания Р и S- волн, а также интенсивности поглощения искусственного γ -излучения (^{137}Cs) (Таблица 3).

Таблица 3 – Количественные характеристики значений геофизических параметров горных пород на водопродводящих и монолитных интервалах в скважине Р-8

№	Глубинные интервалы (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
	Типы пород Параметры	Трещиноватые водопродводящие				Монолитные породы			
		Платиогнейсы биотитовые	Платиогнейсы биотитовые	Метадолериты/трахидолериты	Гнейсы биотитовые/метадолериты/трахидолериты	Платиогнейсы биотитовые	Платиогнейсы 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 Р - фиксируемые приёмником №1 амплитуды (уе)	288-282	206-187	350-344	315-141	355	260	350	344
3	A2 Р - фиксируемые приёмником №2 амплитуды (уе)	222-206	204-134	280-274	176-141	240	209	299	188
4	α Р - 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 (уе)	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 ($\cdot 10^4$ 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

Таким образом, по результатам сравнения данных ГИС на водопродводящих интервалах ствола скважины Р-8 установлен необходимый комплекс скважинных методов, в состав которого должны быть включены видео-, гамма-гамма плотностной и акустический каротаж. Установлено, что критерием для надежного выявления потенциально водопродводящих интервалов является: 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 искусственного γ -излучения (^{137}Cs) в среднем, на 6%. Установлено, что наличие водопроницаемости в выделенных трещиноватых интервалах должно быть подтверждено по итогам выполнения поинтервальных ОФР.

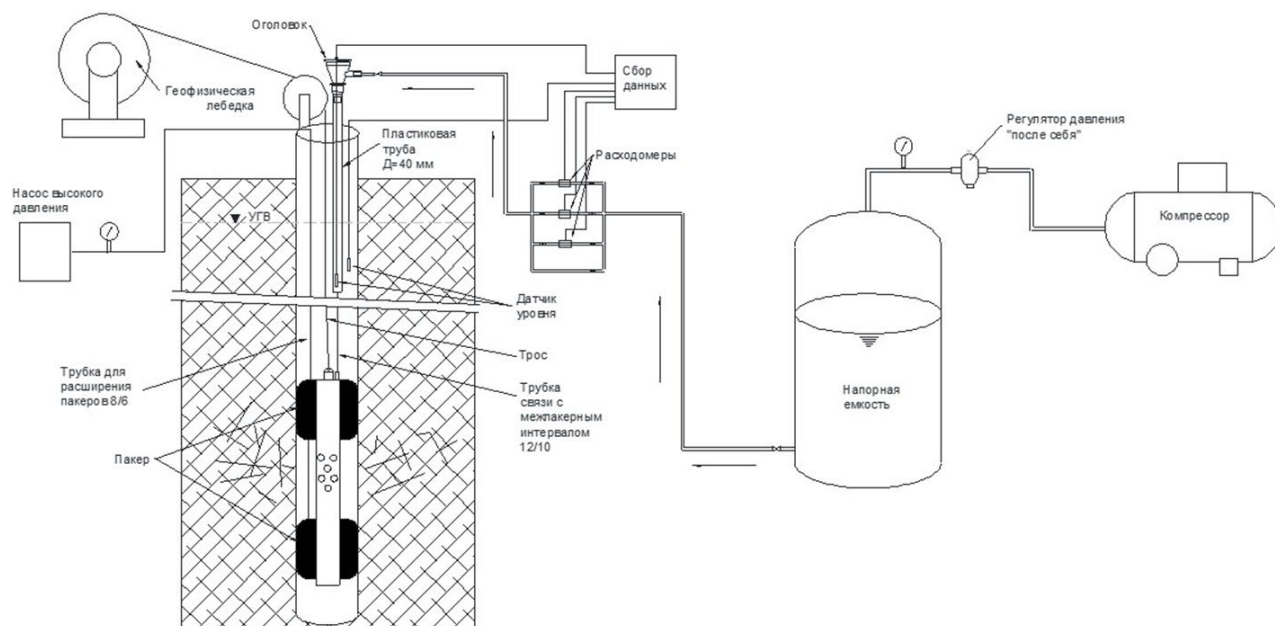


Рисунок 8 – Схема оборудования для поинтервальных исследований и конфигурация пакерного снаряда, используемые в ходе ОФР на скважине Р-8

Пятая глава посвящена вопросам изучения анизотропии фильтрационных свойств трещиноватых водопрводящих интервалов с применением расчётных методов.

Для составления прогнозных гидрогеологических расчётов в настоящее время наиболее широко применяются модели пористых и трещиноватых сред. При этом трещиноватые скальные массивы характеризуются существенно большей степенью анизотропии водопрводящих свойств, чем пористые среды, что осложняет проведение модельных расчётов. Подходы к вычислению тензора проницаемости описаны в ряде научных публикаций, изданных в течении последних нескольких десятилетий.

Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости на трещиноватом водопрводящем интервале горных пород, вскрытом разведочной скважины, является совокупность количественных характеристик трещин (азимуты падения и простирания, угол падения, раскрытие трещин и интенсивность трещиноватости). Для вычисления тензора трещинной проницаемости в трещиноватых интервалах скважин был применен подход, предложенный Е.С. Роммом, согласно которому модель трещиноватой горной породы представляет собой непроницаемый материал, рассеченный единичными трещинами или их системами, каждая из которых характеризуется количественными

значениями раскрытия и пространственной ориентировкой. С использованием параметров трещин и данных по их пространственному положению можно количественно охарактеризовать анизотропию фильтрационных свойств трещиноватого водопрводящего интервала через величины коэффициента трещинной проницаемости (k_n) в направлении вектора градиента давлений. Коэффициент трещинной проницаемости в любом совпадающем с градиентом давления направлении оценивается выражением (1) [Ромм, 1985].

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

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).

Неравномерность распределения значений k_n , полученная с помощью выражения (1), может быть визуализирована как в виде диаграмм, так и эллипсоидов трещинной проницаемости. Для каждого потенциально водопрводящего интервала скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е, выявленного по совокупности результатов видеокаротажных обследований и результатов комплекса ГИС (АК, ГГК-П), определены с использованием выражения (1) значения k_n . Количественные характеристики трещин, включая их пространственное положение – используемые как исходные данные для расчётов значений k_n – были получены по итогам обработки результатов видеокаротажных обследований с использованием разработанного в рамках данной диссертационной работы каротажного программно-аппаратного комплекса. При проведении расчётов было принято допущение, что потенциально водопрводящими являются трещины, не имеющие минерального заполнителя на интервалах глубин в которых наблюдались соответствующие снижения значений параметров акустического каротажа, а также снижение интенсивности поглощения искусственного γ -излучения – идентичные тем, что были получены на подтверждённых ОФР водопрводящих участках ствола скважины Р-8. Расчёт значений k_n производился для каждой потенциально водопрводящей трещины в интервале, а не системы трещин в целом.

Представленные на рис. 10 диаграммы отражают зависимость значений k_n от пространственного положения трещин и различных направлений градиента давлений относительно сторон света в горизонтальной плоскости. В свою очередь, диаграммы являются проекцией на горизонтальную плоскость эллипсоида трещинной проницаемости k_n . Для более полного представления о неоднородности k_n , являющегося одним из показателей водопрводящих свойств трещиноватого скального массива, на рис. 11 представлены эллипсоиды трещинной проницаемости k_n в выделенных трещиноватых интервалах. По

результатам анализа приведенных на рис. 10-11 анизотропии значений k_n и статистических параметров положения трещин отмечено, что во всех выделенных водопрводящих интервалах скважин распределение значений k_n коррелирует с положением трещин. Пространственное положение трещины и ее раскрытие способно оказать существенное влияние на расчётное значение k_n , измеряемое в направлении, совпадающем с градиентом давлений, что отчётливо заметно при сопоставлении данных, представленных на рис. 12.



Рисунок 9 – Диаграммы трещинной проницаемости (k_n , м²) на потенциально водопрводящих интервалах стволов скважин Р-1, интервал 568,0-604,0 (А) м и Р-4, интервал 556,7-557,0 м (Б)

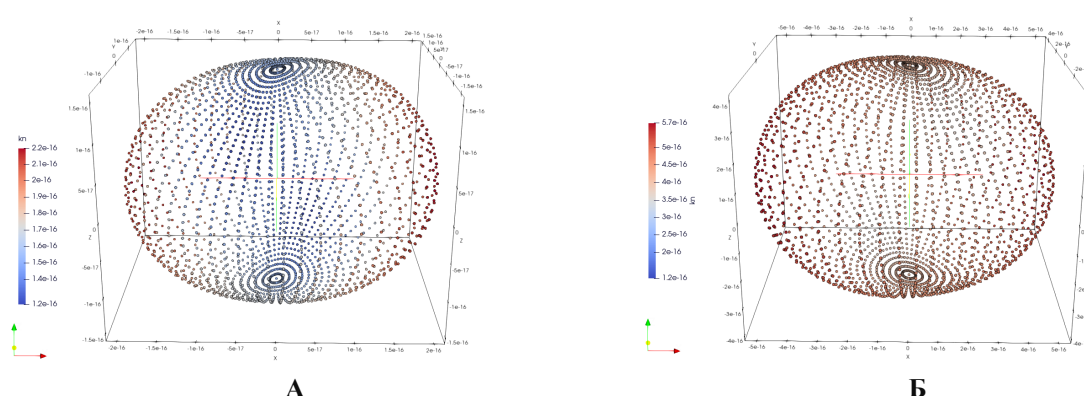
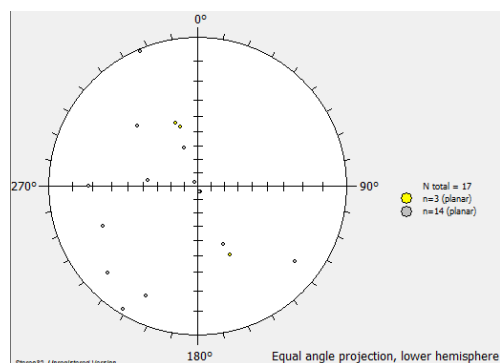
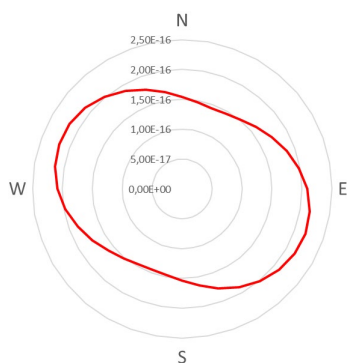


Рисунок 10 – Эллипсоиды значений трещинной проницаемости (k_n , м²) для потенциально водопрводящих интервалов: А – скважина Р-1, инт.: 568,0-604,0 м; Б – скважина Р-4, интервал 556,7-557,0 м

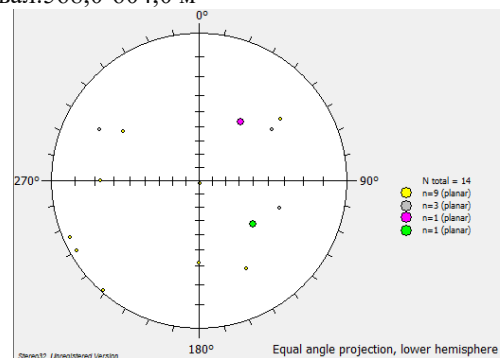
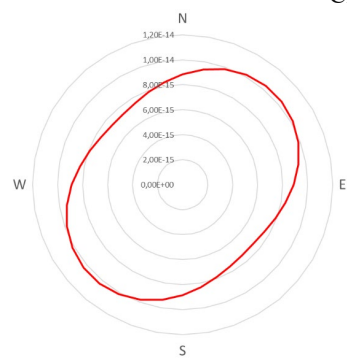
Отмечено, что с увеличением протяженности интервала и плотности трещинной сети возрастает анизотропия значений k_n . Но вне зависимости от плотности трещинной сети и протяженности потенциально водопрводящих интервалов сохраняется возможность определения преобладающих направлений минимальных и максимальных значений k_n .

Параметры трещинной сети в стволах скважин не являются исчерпывающими данными для формулирования выводов о структурной неоднородности в целом по массиву, при этом неравномерность значений k_n в потенциально водопрводящих интервалах позволяет оценить значения коэффициента фильтрации k_f (2), а также других характеристик проницаемости трещиноватых участков скальных пород, в частности, водопрводимости T (3) и, при наличии

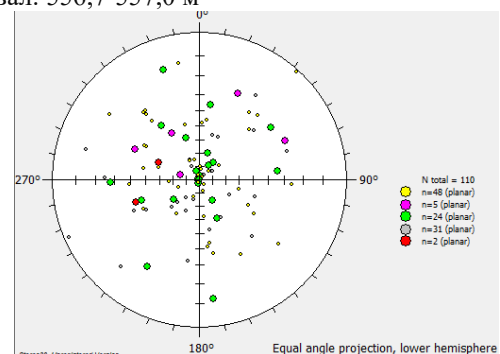
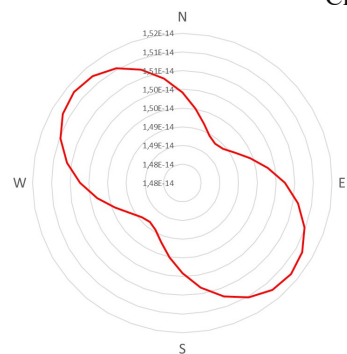
дополнительных исходных данных, расхода воды $Q(4)$ в водопрводящем интервале ствола скважины относительно направлений осей X, Y, Z.



Скважина P-1, интервал: 568,0-604,0 м



Скважина P-4, интервал: 556,7-557,0 м



Скважина 1-E, интервал: 408,35 – 435,5 м

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

Рисунок 11 – Зависимость значений трещинной проницаемости k_n от пространственного положения трещин и их раскрытия в потенциально водопрводящих интервалах скважин P-1, P-4, 1-E

$$k_\phi = k_n \frac{\gamma \cdot g}{\mu}, \quad (2)$$

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

$$T = k_\phi \cdot m, \quad (3)$$

где m – мощность водопрводящего трещиноватого интервала (м).

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

где $\Delta p / l$ – градиент давления, F – площадь фильтрации.

Для определения закономерности распределения значений k_n в потенциально водопрводящих трещиноватых интервалах стволов скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е были заданы вероятные направления движения подземных вод от оси скважин до возможных зон разгрузки (рис. 13) – русел р. Енисей (LE) и р. Шумиха (LSh).

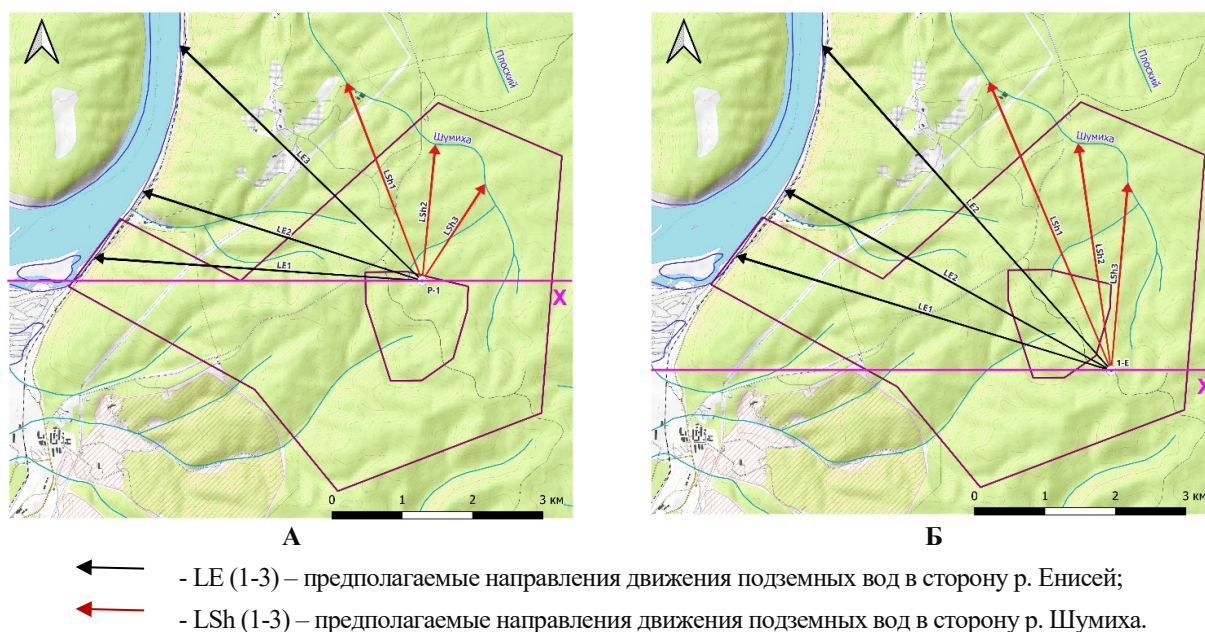


Рисунок 12 – Расчётные направления движений подземных вод в пределах участка Енисейский от скважины Р-1 (А) и 1-Е (Б) к расчётным зонам разгрузки

Длины векторов, определенные как кратчайшее расстояние между глубиной залегания потенциально водопрводящих интервалов в стволах скважин Р-1, Р-3, Р-4, Р-5, 1-Е и вероятными зонами разгрузки подземных вод, послужили основой для вычисления углов векторов градиентов давлений с координатными осями X, Y, Z (α, β, γ). С применением выражения (1) были вычислены значения k_n по каждому потенциально водопрводящему интервалу в направлениях к возможным зонам разгрузки (рис. 13). Пример графической иллюстрации неравномерности распределения значений k_n в потенциально водопрводящем интервале ствола скважины представлен на рис. 14. Установлено, что в скважинах Р-1 и 1-Е с ростом глубины положения водопрводящих интервалов наблюдается смена положения максимальных и минимальных значений трещинной проницаемости относительно вероятных направлений движения подземных вод от оси скважин до возможных зон разгрузки подземных вод (р. Шумиха и р. Енисей).

Вычисленные с помощью выражения (2) значения коэффициента фильтрации k_{ϕ} для потенциально водопрводящих интервалов находятся в диапазоне $6,3 \cdot 10^{-3} - 1,24 \cdot 10^{-4}$ м/сут, что

в целом совпадает с диапазоном значений k_f , определённых по итогам обработки результатов скважинных опытно-фильтрационных исследований, выполненных в скважине Р-8.

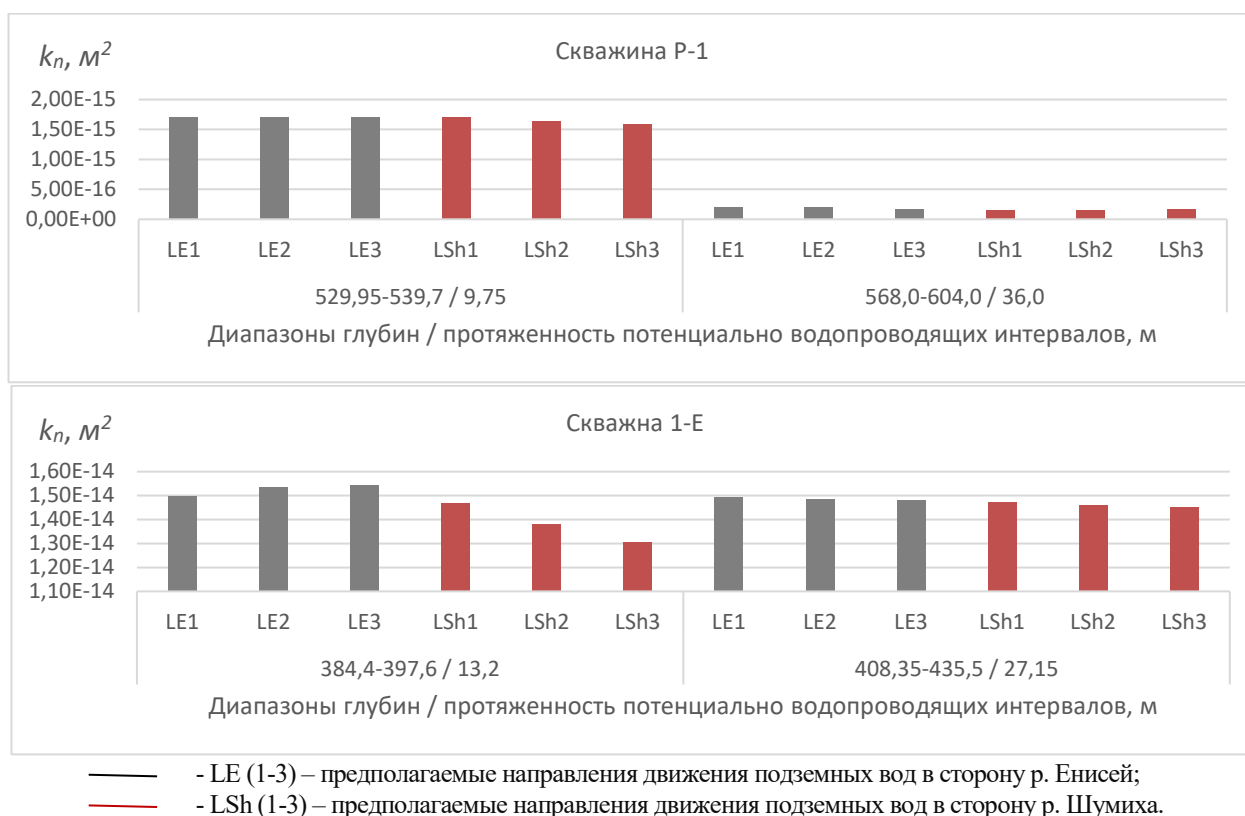


Рисунок 13 – Результаты оценки неравномерности распределения максимальных значений k_n на потенциально водопрводящих интервалах стволов скважин Р-1, 1-Е в зависимости от направлений векторов градиентов давлений, совпадающих с предполагаемыми направлениями движения подземных вод

Таким образом с применением сформированного в ходе диссертационного исследования метода определения водопрводящих интервалов массива скальных горных пород с задействованием количественных параметров и пространственного положения трещин представляется возможным оценить фильтрационную анизотропию фильтрационных свойств данных интервалов. Оценка анизотропии осуществляется с применением метода определения тензора трещинной проницаемости. Исходными данными для вычисления тензора трещинной проницаемости являются получаемые по итогам видеокаротажных обследований незакреплённых стволов разведочных скважин с задействованием разработанного в ходе диссертационного исследования оборудования количественные параметры трещин: азимуты падения и залегания, а также углы падения, величины раскрытия и интенсивность трещиноватости. Отмечено, что расчётные оценки фильтрационных параметров трещиноватых скальных пород в целом соответствуют результатам скважинных ОФР. Необходимые для вычисления тензора трещинной проницаемости исходные данные могут быть получены как по итогам обработки результатов видеокаротажных обследований

стволов скважин, так и по итогам обработки результатов исследований ориентированного керна, так и замеров на породных обнажениях в горных выработках.

Отмечено, что, имея в распоряжении данные о пространственном положении векторов градиентов давлений, представляется возможным выполнить сравнение связанных с коэффициентом трещинной проницаемости параметров водопроводящих свойств горных пород в различных направлениях. Вычисление тензора трещинной проницаемости на основе количественных параметров трещинной сети, характерной для водопроводящего блока скальных горных пород, позволяет оценить неравномерность трещинной проницаемости и оценить анизотропию значений коэффициента фильтрации и водопроводимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научная задача выделения водопроводящих 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 натурных 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 водопроводящих свойств трещиноватых участков.

2. Определен перечень количественных параметров трещин, оказывающих наибольшее влияние на водопроводящие 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 водопроводящих 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 водопроводящих 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 водопроводящих интервалов необходимо одновременное 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 водопроводящих 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»

- (Красноярский 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), С. 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.