

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



НЕУВАЖАЕВ ГЕОРГИЙ ДМИТРИЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ  
ДОЛГОВРЕМЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУНКТА ГЛУБИННОГО  
ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (УЧАСТОК  
«ЕНИСЕЙСКИЙ»)**

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

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

МОСКВА, 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Особенности обоснования долговременной безопасности ПГЗРО	11
1.1 Особенности моделирования в связи с разными геологическими условиями размещения ПГЗРО .....	13
1.2 Основные процессы нормальной эволюции ПГЗРО.....	15
1.3 Модели фильтрации и миграции в трещиноватых средах .....	18
1.3.1 Региональный масштаб.....	19
1.3.2 Масштаб горного отвода пункта захоронения .....	20
1.3.3 Масштаб промышленной площадки ПГЗРО .....	20
1.4 Постановка цели и задачи исследования.....	21
2 Формирование исходных данных для оценки влияния структурных элементов на поток подземных вод .....	21
2.1 Геологические и гидрогеологические условия.....	21
2.2 Схематизация гидрогеологических условий и реализация плановой задачи фильтрации методом аналитических элементов.....	42
2.3 Разработка профильной модели переноса радионуклидов в трещиноватой среде учитывающей основные структурные элементы горного отвода.....	51
2.3.1 Обоснование модели распространения радионуклидов в профильной постановке .....	54
2.3.2 Результаты миграционных расчетов .....	57
3 Обработка и интерпретация результатов кустовой откачки из несовершенных скважин с использованием трехмерного моделирования .....	61
3.1 Описание участка проведения опытно-фильтрационных работ.....	62
3.2 Аналитическая обработка результатов опытно-фильтрационных работ	64
3.3 Разработка трехмерной модели и расчетных результатов .....	67
3.4 Анализ результатов опытно-фильтрационных работ .....	72

4	Исследование фильтрационных параметров в кристаллических породах.....	76
4.1	Полевые исследования на участке Енисейский.....	76
4.1.1	Предшествующие работы по изучению фильтрационных характеристик скважины Р-8 .....	76
4.1.2	Учет зарубежного опыта исследования фильтрационных характеристик на объектах аналогах.....	78
4.1.3	Оборудование и методика поинтервальных исследований на участке Енисейский.....	82
4.2	Интерпретация поинтервальных исследований .....	86
4.2.1	Анализ первичных результатов полевых работ .....	86
4.2.2	Постановка задачи и интерпретация результатов исследований .....	88
5	Разработка и обоснование трехмерной модели.....	92
5.1	Ограничения предшествующих работ по моделированию ПГЗРО участка Енисейский.....	92
5.2	Разработка трехмерных моделей в пределах участка Енисейский ...	94
5.2.1	Разработка и калибровка геофильтрационной и геомиграционной моделей дальней зоны на основе концепции сплошной среды .....	94
5.2.2	Разработка и калибровка моделей дальней зоны на основе концепций дискретной среды .....	107
5.3	Анализ чувствительности трехмерной модели.....	112
	Заключение .....	116
	Список сокращений .....	118
	Список использованных источников.....	119
	Основные публикации по теме диссертации .....	126

## Введение

Окончательная изоляция высокоактивных и среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов (а также отработанного ядерного топлива, если оно не перерабатывается) является актуальным вопросом для всех государств, использующих атомную энергию. На сегодняшний день международным научно-техническим сообществом признано, что наиболее эффективным и безопасным решением этой задачи является захоронение в глубоких геологических формациях с соблюдением принципа многобарьерной защиты. Такой подход позволяет обеспечить пассивную долгосрочную изоляцию радионуклидов от биосферы. Многочисленные проекты создания пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) разрабатываются в том или ином виде большинством стран с развитой ядерной энергетикой. В России также ведется проектирование подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), исследования в которой лягут в основу оценок безопасности будущего ПГЗРО. В 2002–2005 годах под руководством АО «ВНИПИпромтехнологии» были проведены комплексные исследования на участке «Енисейский», расположенном в пределах ЗАТО г. Железногорска в Красноярском крае.

Процессы проектирования, сооружения, эксплуатации и закрытия ПГЗРО сопровождаются обязательными итерационными обоснованиями эксплуатационной и долговременной безопасности – сложными мультидисциплинарными процедурами систематического анализа всех возможных факторов, которые могут повлиять на безопасность системы захоронения. Для осуществления этого анализа необходимо – выполнение прогнозных расчетов на период потенциальной опасности радиоактивных отходов (РАО), что невозможно без разработки и верификации соответствующих моделей.

Важнейшими для подтверждения способности системы захоронения РАО ограничивать радиационное воздействие на население и окружающую среду являются модели переноса радионуклидов, которые должны формироваться с возможностью учета процессов на разных пространственных и временных масштабах. Обычно выделяются: дальняя зона – участок от сотен метров до десятков километров до потенциальной зоны разгрузки подземных вод, ближняя зона – участок от нескольких метров до сотен метров в пределах ПГЗРО, и биосфера – поверхностные воды, атмосфера, почва, биота. Один из основных инструментов прогнозирования экологической приемлемости ПГЗРО – геофильтрационно-геомиграционное моделирование, так как именно оно дает представление о переносе радионуклидов в ближней и дальней зоне, а также предоставляет исходные данные для оценки их поступления в биосферу.

На настоящий момент существуют разные подходы гидрогеологического моделирования, позволяющие рассматривать различные варианты описания процессов и среды. Практика разработки конкретных моделей для отдельных объектов показывает, что основная сложность заключается в неоднозначности их параметризации, которая связана с конечной точностью измерений или пространственной вариабельностью значений необходимых параметров.

Таким образом, качество прогнозов в значительной степени определяется параметрическим обеспечением моделей, которое, в свою очередь, обусловлено не только количеством и качеством исходной релевантной информации, но и собственно методиками параметризации.

Вопрос параметризации возникает и с другой стороны. Важный аспект в обосновании безопасности, который появился на повестке сравнительно недавно (около 15 лет назад) – «проблема доверия» к значениям тех индикаторов безопасности, которые будут получены в результате численного моделирования на долгосрочный период после закрытия пункта захоронения. Поэтому сооружению непосредственно ПГЗРО предшествует строительство подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ), где проводятся натурные исследования, результаты которых позволяют сформировать основу для обеспечения достоверности оценок безопасности. Наряду с демонстрацией реализуемости технологических процессов в реальных геологических условиях и с соблюдением реальных пространственных масштабов, обширный класс практических исследований в ПИЛ нацелен на изучение характеристик и свойств геологических пород и гидрогеологических характеристик на глубине и в условиях предполагаемого размещения ПГЗРО, которые являются исходными данными для создания гидрогеологических моделей.

В концептуальную основу гидрогеологических моделей закладывается как аргументированный выбор набора характеристик для математического описания среды (параметры, граничные и начальные условия), так и состав учитываемых процессов. Результаты, полученные в период выполнения поисковой и оценочной стадии работ по выбору участка размещения ПЗРО, позволяют выполнить и обосновать параметризацию гидрогеологических моделей.

Корректность концептуальной гидрогеологической модели и ее параметризация во многом определяют обоснованность результатов выполнения прогнозных модельных расчетов в целом и, соответственно, степень доверия к ним.

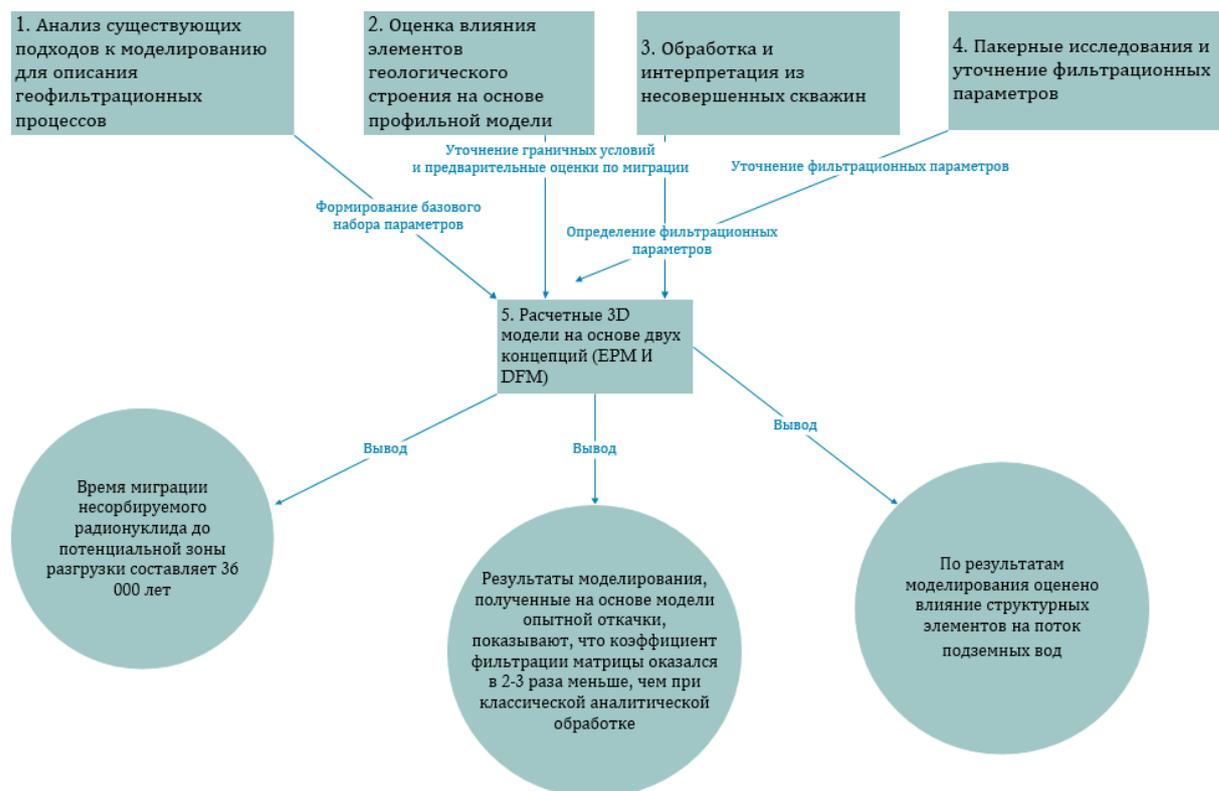
### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей обоснования безопасности ПГЗРО в части оценки динамики переноса радионуклидов до зоны разгрузки на примере участка «Енисейский».

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

1. анализ существующих подходов к моделированию для описания геофильтрационных и геомиграционных процессов в различных типах вмещающих пород;
2. оценка влияния элементов геологического строения как части параметрического обеспечения модели на поток подземных вод на основе плановой геофильтрационной модели, реализованной методом аналитических элементов, и на основе профильной модели, выполненной в пределах участка «Енисейский»;
3. обработка и интерпретация результатов кустовой откачки из несовершенных скважин, разработка трехмерной модели, включающая обоснование таких аспектов параметрического обеспечения, как пространственная неоднородность фильтрационных свойств; воспроизведение фактического хода откачки и определение фильтрационных параметров по результатам калибровки модели;
4. проведение опытно-фильтрационных исследований (ОФР) для определения фильтрационных параметров с использованием современных пневматических пакеров, позволяющих надежно изолировать проницаемые интервалы;
5. разработка вариантов трехмерной геофильтрационной-геомиграционной модели на основе различных подходов: с использованием блоковой структуры массива в рамках концепции пористой среды EPM (Equivalent Porous Medium) и DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода, а также сопоставление полученных в различных вариантах геофильтрационных параметров.

На рисунке 1.1.1 приведена взаимосвязь решаемых задач и итоговых результатов, полученных в ходе диссертационного исследования.



### Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые при разработке геофильтрационной модели использована детальная геологическая модель с использованием элементов геологического строения, установленных на основании анализа результатов бурения скважин на участке «Енисейский». По результатам калибровки модели определены фильтрационные параметры основных элементов геологического строения.

2. Разработан алгоритм, предусматривающий оценку влияния структуры разрывных нарушений на направление потока подземных вод.

3. Предложена новая методика по определению геофильтрационных параметров с помощью численного моделирования, которая позволяет улучшить их качество и достоверность получаемых результатов.

4. Впервые проведен анализ поинтервальных исследований, по результатам которых определены фильтрационные характеристики, в том числе для каждого интервала, выделенные на основании анализа результатов геофизических исследований.

5. Впервые выполнены расчеты долговременной миграции радионуклидов в пределах участка «Енисейский» с учетом различных вариантов размещения разрывных нарушений, позволившие оценить влияние их местоположения на безопасность ПГЗРО. При

выполнении расчетов использовались 3D модели на основе различных концепции описания геологической среды: дискретной среды (DFM – Discrete Fracture Matrix) и пористой среды (EPM – Equivalent Porous Medium).

**Практическая значимость работы:**

В рамках диссертационного исследования разработаны и обоснованы расчетными, аналитическим и экспериментальными методами трехмерные модели, обеспечивающие возможность дальнейшего развития обоснования долговременной безопасности первого в России пункта глубинного захоронения РАО на примере участка «Енисейский».

Разработана методика по определению геофильтрационных параметров массива горных пород, позволяющая повысить степень их обоснованности при решении задач оценки безопасности ПГЗРО.

Результаты, полученные на специально разработанных моделях, уже используются для текущих версий обоснования долговременной безопасности (ОДБ) ПГЗРО на участке «Енисейский».

**Положения, выносимые на защиту:**

Модели для обработки и интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (откачек и опытных нагнетаний в скважинах, пакерных поинтервальных исследований).

Алгоритм анализа гидрогеологических условий с применением численного моделирования для определения значимых для обоснования долговременной безопасности характеристик потока подземных вод, учитывающий особенности параметризации для различных элементов геологического строения.

Перечень гидрогеологических параметров кристаллической среды, наиболее значимых для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

**Степень достоверности:**

Достоверность полученных результатов и выводов диссертации подтверждается:

Применением стандартных современных методов расчета для геофильтрационных и геомиграционных задач, а также общепризнанных международных программных средств при создании гидрогеологических моделей (Groundwater Modeling System, Modflow 6);

Использованием при проведении миграционного моделирования расчетного средства GeRa/V1, успешно прошедшего процедуру аттестации для использования при обосновании безопасности ОИАЭ;

Публикациями в реферируемых изданиях и рассмотрением на российских и международных научных конференциях;

Результатами проведения анализа чувствительности разрабатываемых моделей к их параметрам.

**Личный вклад автора заключается в:**

- Разработке профильной геофильтрационной и геомиграционной модели в пределах участка «Енисейский»;
- Разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе блоковой структуры массива в рамках EPM (Equivalent Porous Medium) подхода;
- Разработке трехмерной геофильтрационной модели на основе DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода;
- Разработке трехмерной модели в пределах двух кустов скважин 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2 для несовершенных скважин и моделировании кустовой откачки в трещиноватой среде;
- Планировании и отладке оборудования, поиску корректных эксплуатационных режимов пакерной установки, поддающихся корректному анализу, выполненным на участке «Енисейский» и анализу, отбраковке и коррекции полученных результатов;

**Апробация работы**

Материалы диссертации докладывались на следующих научных семинарах и конференциях:

European Geosince Union (EGU) 2020 на сессии ERE 4.2 (Towards a safe nuclear waste repository – assessment of barrier integrity, geoscientific, technological, societal and regulatory challenges and approaches) с докладом 3D hydrogeological modeling of Deep Geological Disposal in the Nizhnekansky Rock massif. 2020.

XVI–XXI научные школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, 2017–2022 гг.;

Международная научная конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2018», «Ломоносов – 2019», «Ломоносов – 2020».

V научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск -, 2016.

VI научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск -, 2017.

16th International Symposium on Water-Rock Interaction and to 13th International Symposium on Applied Isotope Geochemistry (1st IAGC International Conference), Томск, Россия.

Школа-семинар «Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач», МГУ, Москва.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 24 научные работы, из них 11 статей в специализированных изданиях, включая 7 статей в научных журналах, включенных в перечень ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и 13 докладов на российских и международных конференциях и семинарах.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 68 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 127 страниц основного текста, включая 17 таблиц и 76 рисунков, в том числе графики.

## 1 Особенности обоснования долговременной безопасности ПГЗРО

Обеспечение безопасности при обращении с РАО является одной из важных составляющих национальной безопасности и обязательным условием использования атомной энергии в настоящее время и в будущем.

На сегодняшний день в соответствии с [1] способы захоронения РАО подразделяются на:

- пункты приповерхностного захоронения РАО (ППЗРО);
- пункты глубинного захоронения РАО (ПГЗРО);
- пункты глубинного захоронения ЖРО (ПГЗ ЖРО);

Для оценки и обоснования долговременной безопасности захоронения РАО для ПЗРО необходимо рассматривать единую систему, которая включает в себя следующие элементы:

- источник потенциального загрязнения – упаковка РАО, которая содержит матрицу отходов;
- зона пункта захоронения (хранилища) (ближняя зона), в которой были произведены экскавационные работы, находящаяся рядом или в контакте с упаковками отходов, включая материалы засыпки или изолирующие материалы, и те участки вмещающей среды/породы, характеристики которых были или могли быть изменены в результате воздействия, которое оказали на них пункт захоронения (хранилища) или его содержимое [2];
- дальняя зона (геосфера) – за пределами пункта захоронения (хранилища), состоящая из окружающих геологических слоев и располагающаяся на удалении от пункта захоронения (хранилища) таким образом, что для целей моделирования пункт захоронения (хранилища) может рассматриваться в качестве единого целого без вычленения индивидуального воздействия упаковок отходов [2];
- биосфера – оболочка Земли, заселённая живыми организмами и преобразованная ими.

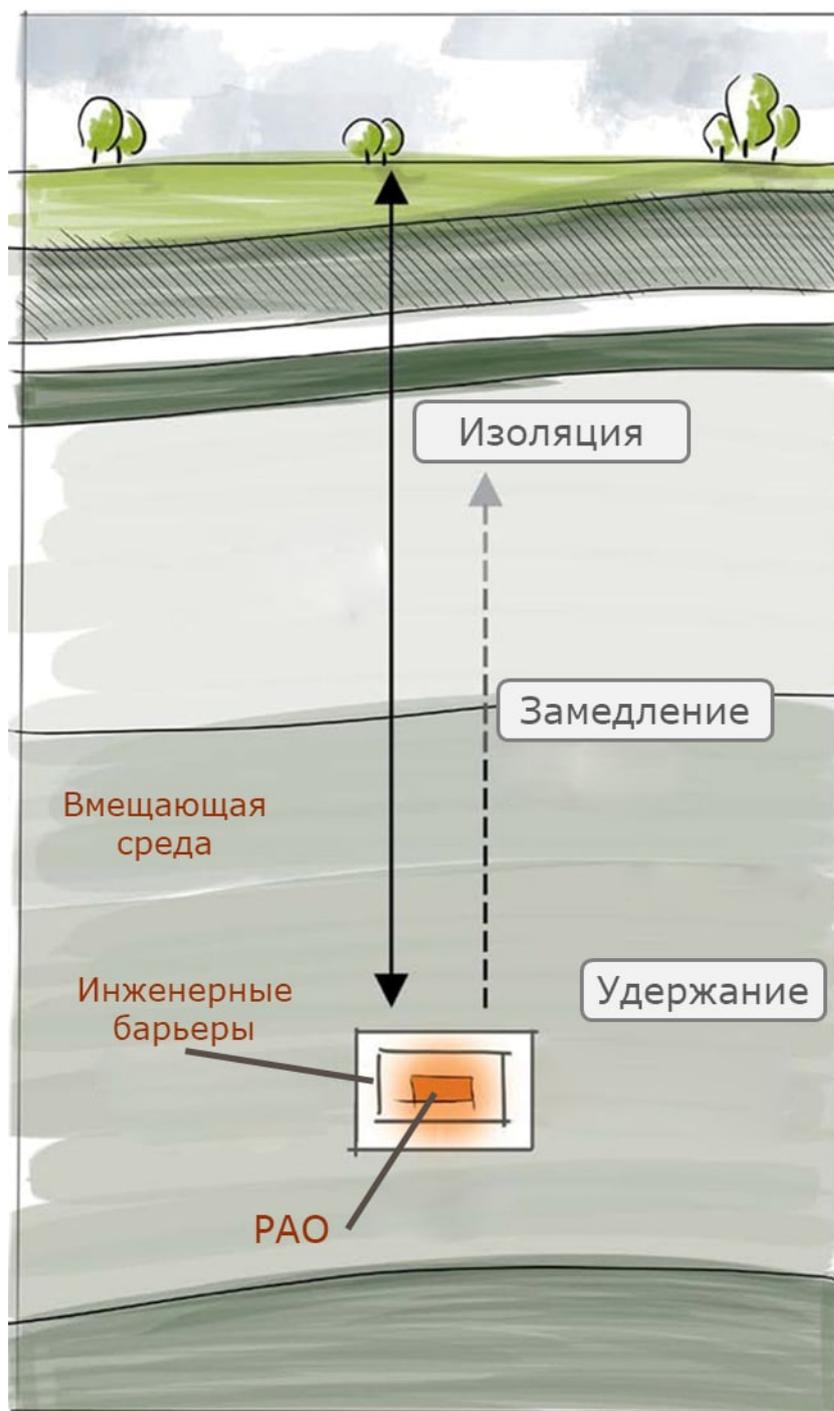


Рисунок 1.1.1 – Схематическое изображение элементов системы барьеров безопасности ПЗРО [3]

В такой системе долгосрочная изоляция радионуклидов от биосферы обеспечивается за счет множественных природных и инженерных барьеров. Роль существующих барьеров для различных ПЗРО является разной. Так, для ППЗРО (пункты приповерхностного захоронения РАО) перенос загрязнения возможен как с подземными водами, так и по наземной поверхности, где скорость распространения гораздо выше, чем под землей. Наибольшую опасность будет представлять тот объект, у которого время движения

радионуклидов до зоны разгрузки (участка рельефа, где подземные воды выходят на поверхность или в поверхностные водотоки и водоемы) будет минимальным. Поэтому для таких объектов преобладает значимость инженерных барьеров, которые необходимо рассматривать как единую систему: матрица, контейнер, буферный наполнитель и пр. Для ПГЗРО возникновение аварийной ситуации или нарушение целостности одного или нескольких барьеров безопасности в ближней зоне в результате техногенного или природного события не должно приводить к критическому уменьшению уровня безопасности.

Для ПГЗРО геологическая среда является одним из основных барьеров безопасности. в связи с тем, что период потенциальной опасности является огромным (миллионы лет) [1, 4]. Для тех радионуклидов, которые имеют относительно небольшой период полураспада (до 100 лет), удельная активность значительно уменьшается еще в период действия инженерных барьеров безопасности, а основные процессы по миграции долгоживущих радионуклидов будут происходить в геологической среде. Соответственно, чтобы обосновать безопасность функционирования ПГЗРО, необходимы оценки на основе детальных гидрогеологических и геомиграционных моделей, так как основные процессы по миграции долгоживущих радионуклидов будут происходить в геологической среде.

#### 1.1 Особенности моделирования в связи с разными геологическими условиями размещения ПГЗРО

На сегодняшний день в мире существуют различные проекты захоронений [5, 6, 7]. Для отходов высокой и средней активности в основном используются 3 различных вида вмещающих пород. Так, например, в Швейцарии (Mont Terri Project), Франции (Meuse/Haute-Maine), Бельгии (NRC Mol/Dessel) и некоторых других странах, разрабатываются проекты по захоронению в глинистых формациях. В Германии до последнего времени рассматривались соляные формации (Gorleben). В Швеции (Forsmark), Финляндии (Olkiluoto), Швейцарии (Grimsel), России («Енисейский») исследуются кристаллические формации [8]. У каждого типа вмещающих пород есть свои особенности, которые могут быть и преимуществами, и недостатками с точки зрения долговременной безопасности. Детальные модели помогают оценить баланс этих достоинств и недостатков численно.

##### *Соляные формации*

Каменная соль имеет весьма низкую проницаемость и содержание воды. Эти породы хорошо подвергаются проходке горных выработок. Их высокая теплопроводность обеспечивает рассеивание тепла, выделяющегося отходами в окружающий массив пород.

Пластические свойства солей способствуют заплыванию выработок, что обеспечивает герметизацию выработок и ликвидацию трещин в породе.

Сложности, возникающие при создании геомиграционных моделей для соляных вмещающих пород, заключаются в том, что необходимо учитывать перенос радиоактивных веществ не только в жидкой фазе с переменной минерализацией, но и в газовой, т. к. в результате коррозии контейнеров происходит выделение газообразного  $^{14}\text{C}$ .

В работах [9, 10] приведен обзор гидрогеологического моделирования соляного купола Горлебен, где планировалось захоронение отходов высокой и средней активности. Отличительные особенности гидрогеологического моделирования в кристаллических породах заключаются в необходимости проводить расчеты как в рамках моделей сплошной среды, так и на основе концепции дискретной среды. С 2000 по 2010 правительство Германии объявило мораторий на работы по изучению хранилища, но научная работа продолжалась и нашла свое отражение в работах [11-13].

За период времени более чем в 30 лет были предприняты различные попытки по созданию гидрогеологических моделей, позволяющих провести оценку долговременной безопасности. Но, в отсутствие вычислительной техники или ее ограниченных возможностей, модели не соответствовали реальному представлению о структуре потока подземных вод или не учитывали основные миграционные процессы, которые могли бы дать характерное представление о миграции загрязнения с течением времени. Сначала в силу ограниченного количества данных [14-17] создавались модели в двухмерной постановке, что позволяло получить предварительные расчеты. По мере исследований и появления новых данных об объекте происходил переход к более детальным трехмерным моделям [18].

#### *Глинистые формации*

Отложения глин являются наиболее распространенными осадочными породами и весьма разнообразны по своим параметрам, однородности, минеральному составу, геотехническим, гидравлическим и геохимическим свойствам. При достаточной мощности и однородности эти породы могут быть приемлемыми для изоляции отходов, содержащих долгоживущие нуклиды. Положительными качествами глинистых формаций является их низкая проницаемость, высокая сорбционная способность по отношению ко многим нуклидам и высокая пластичность. Все это способствует достижению долговременной изоляции отходов [19, 20].

В работе [21] приведены результаты исследований в вендских глинах Сосновоборского городского округа Ленинградской области, в районе расположения

ППЗРО. Результаты исследования показывают, что котлинские глины имеют низкие фильтрационные характеристики и сильную анизотропию. Также анализ сорбционных исследований [21] показывает, что вендские глины обладают высокими сорбционными свойствами, что также является важной характеристикой при захоронении радиоактивных отходов.

Важной особенностью моделирования пунктов захоронения в глиняных формациях является потребность в данных об эффективных коэффициентах молекулярной диффузии. Основная миграция радионуклидов происходит за счет диффузионных процессов в случае отсутствия потока воды вокруг захоронения.

Еще одна отличительная особенность моделирования в глинистых формациях заключается в учете пространственной изменчивости проводимости. Неоднородностью других параметров течения и переноса обычно пренебрегают. Такой подход зачастую оправдан, однако бывают случаи, когда игнорирование неоднородности других параметров течения и переноса может быть сомнительным. Например, в средах с низкой проницаемостью диффузия часто является доминирующим механизмом переноса. Поэтому представляется логичным включить пространственную изменчивость параметров диффузии в миграционную модель. Так, в работе [22] выполнялось исследование по анализу и моделированию пространственной изменчивости эффективного коэффициента диффузии и пористости с помощью геостатистических методов.

#### *Кристаллические породы*

Отличительные особенности гидрогеологического моделирования в кристаллических породах заключаются в необходимости проводить расчеты как в рамках моделей сплошной среды, так и на основе концепции дискретной среды. Наиболее оптимальными методами расчета течения в трещиновато-пористой среде является модель единого континуума и модель сети дискретных трещин (Discrete Fracture Network, DFN) и матрицы (Discrete Fracture Matrix, DFM). Данная диссертация посвящена моделям в кристаллических породах применительно к участку «Енисейский», поэтому особенности моделирования в кристаллических породах рассматриваются подробно на протяжении всей работы.

## 1.2 Основные процессы нормальной эволюции ППЗРО

Для получения численных оценок радиационного воздействия ППЗРО на окружающую среду необходимо: (1) определение зон потенциального выхода радиоактивности в биосферу, (2) прогнозирование миграции радионуклидов в растворенной и газовой фазах, и (3) экспериментальное обоснование параметров, контролирующих эти процессы. Здесь следует уточнить, что, например, тепловое или

механическое воздействие ПГЗРО на окружающую среду выходят за рамки данной работы и не рассматриваются.

Факторы, определяющие долговременную безопасность, можно разделить на две большие группы: природные и техногенные [23]. Для систематизации разнообразия потенциально влияющих факторов применяются сценарии – постулируемые альтернативные варианты эволюции системы, каждый из которых затем может быть декомпозирован на набор моделей (рисунок 1.2.1). Как правило, формулируется один основной сценарий (сценарий нормальной эволюции), плюс набор альтернативных – вариантов развития событий в предположении, что какой-то из элементов системы инженерных барьеров перестал выполнять свои функции. Также часто дополнительно рассматриваются сценарии «что-если» [6, 7, 24], но они уже, как правило, не охватывают эволюцию всего ПГЗРО от начала и до конца, а только демонстрируют робастность какой-то из подсистем [25]. Здесь следует отметить, что в данной работе сценарий нормальной эволюции анализируется исключительно с точки зрения определения процессов, которые могут повлиять на прогнозные оценки, получаемые при помощи гидрогеологического моделирования. Обзор соответствующих направлений исследований можно найти в отчете [26], в котором рассматриваются подходы, используемые при гидрологическом и гидрогеологическом исследовании хранилищ, на основе опыта, накопленного в странах-членах МАГАТЭ.

В ходе нормальной эволюции ПГЗРО изменяются гидрогеологические условия объекта, и вероятно, будут меняться параметры среды. Данный факт можно рассматривать как сценарную неопределенность (рисунок 1.2.1). В рамках каждого сценарного варианта также присутствует неопределенность параметров, потребность формализации обращения с которой и стало импульсом настоящего диссертационного исследования. Для описания возможных сценариев используется терминология особенностей, событий и процессов (ОСП, или англ. FER, features, events, processes) [5].

Это исчерпывающий перечень факторов, которые способны оказать влияние на систему захоронения. В рамках обоснования долговременной безопасности, необходимо указать, какие факторы и каким образом учтены, а какие и по каким причинам исключены из рассмотрения.

В идеологии ОСП все факторы классифицированы как:

- Особенность – структура, условие или характеристика, которые могут влиять на эволюцию систему захоронения РАО, и описывается качественным или количественным значением.

- Событие – природное или техногенное воздействие, кратковременное по сравнению с периодом существования системы, которое способно воздействовать на эволюцию системы захоронения РАО.
- Процесс – природное или техногенное явление, которое способно воздействовать на эволюцию системы захоронения РАО и проявляющее свое действие в течение существенного периода ее существования.

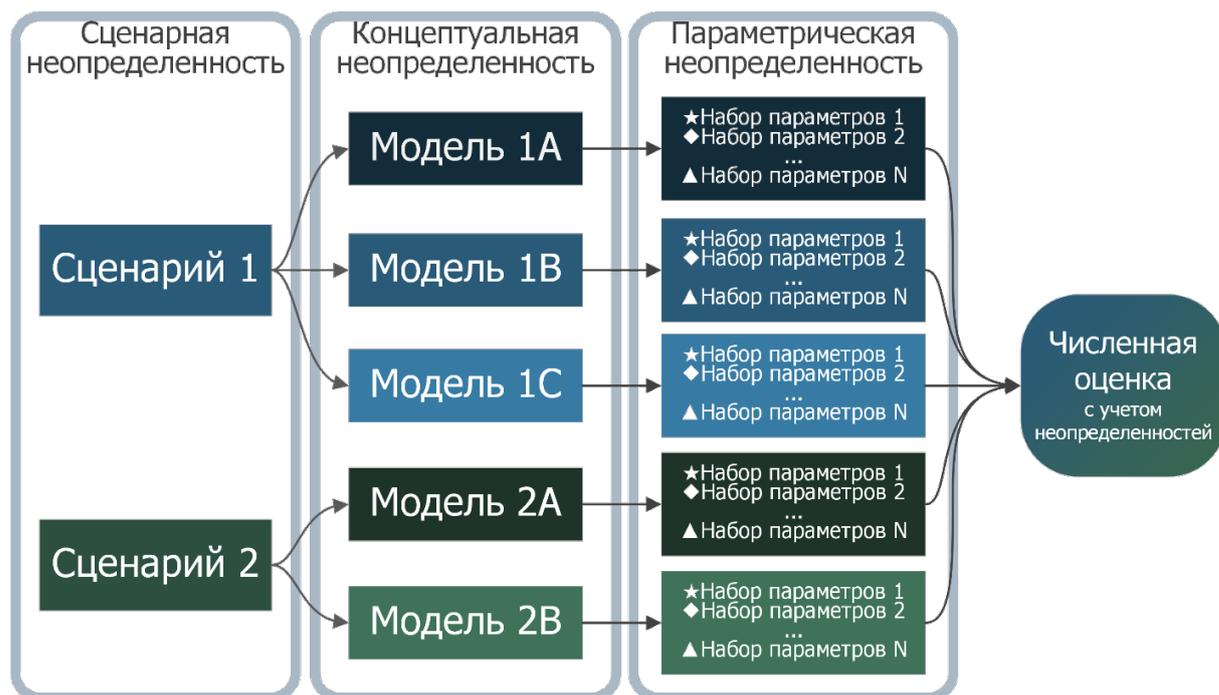


Рисунок 1.2.1 – Декомпозиция сценариев на модели

К факторам, связанным с долгосрочными процессами и событиями, влияющим на безопасность системы захоронения, можно отнести геологические и гидрогеологические.

В рамках обоснования долговременной безопасности необходимо продемонстрировать, какие факторы и каким образом учтены, а какие и по каким причинам исключены из рассмотрения. В рамках данной диссертационной работы большой интерес представляет категория 1.2 международного перечня [26] «Geological factors» («Геологические факторы»), и особенно пункт 1.2.12. «Hydrological/hydrogeological response to geological changes» («Гидрологический/гидрогеологический отклик на геологические изменения»).

В рамках рассмотрения данной группы факторов [26] необходимо проанализировать возможное влияние крупномасштабных геологических изменений на региональный поток подземных вод, что может приводить к перераспределению напоров по глубине, а также к

изменению структуры потока подземных вод. В кристаллических слабопроницаемых породах гидрогеологические изменения могут влиять и на направление потока непосредственно через хранилище и вокруг него.

Для того чтобы учесть влияние данного фактора на долговременную безопасность, необходимо выполнить прогнозные модельные расчеты дозовых нагрузок в биосфере на период потенциальной опасности объекта размещения радиоактивных отходов (РАО) с учетом их возможных изменений.

### 1.3 Модели фильтрации и миграции в трещиноватых средах

Хорошим примером анализа влияния гидрогеологических факторов на долговременную безопасность при помощи моделирования течения и переноса являются исследования в рамках обоснования безопасности захоронения в Форшмарке, Швеция [27]. В работе стояла задача смоделировать эволюцию течения подземных вод в трещиноватой пористой среде в нескольких масштабах: от региональной картины (масштаб порядка 10 км) до деталей течения вокруг скважин захоронения (масштабы порядка метров). Было предложено проводить расчеты в рамках моделей для трех масштабов: регионального, масштаба площадки и масштаба пункта захоронения. На рисунке 1.3.1 проиллюстрированы модели в различных масштабах.

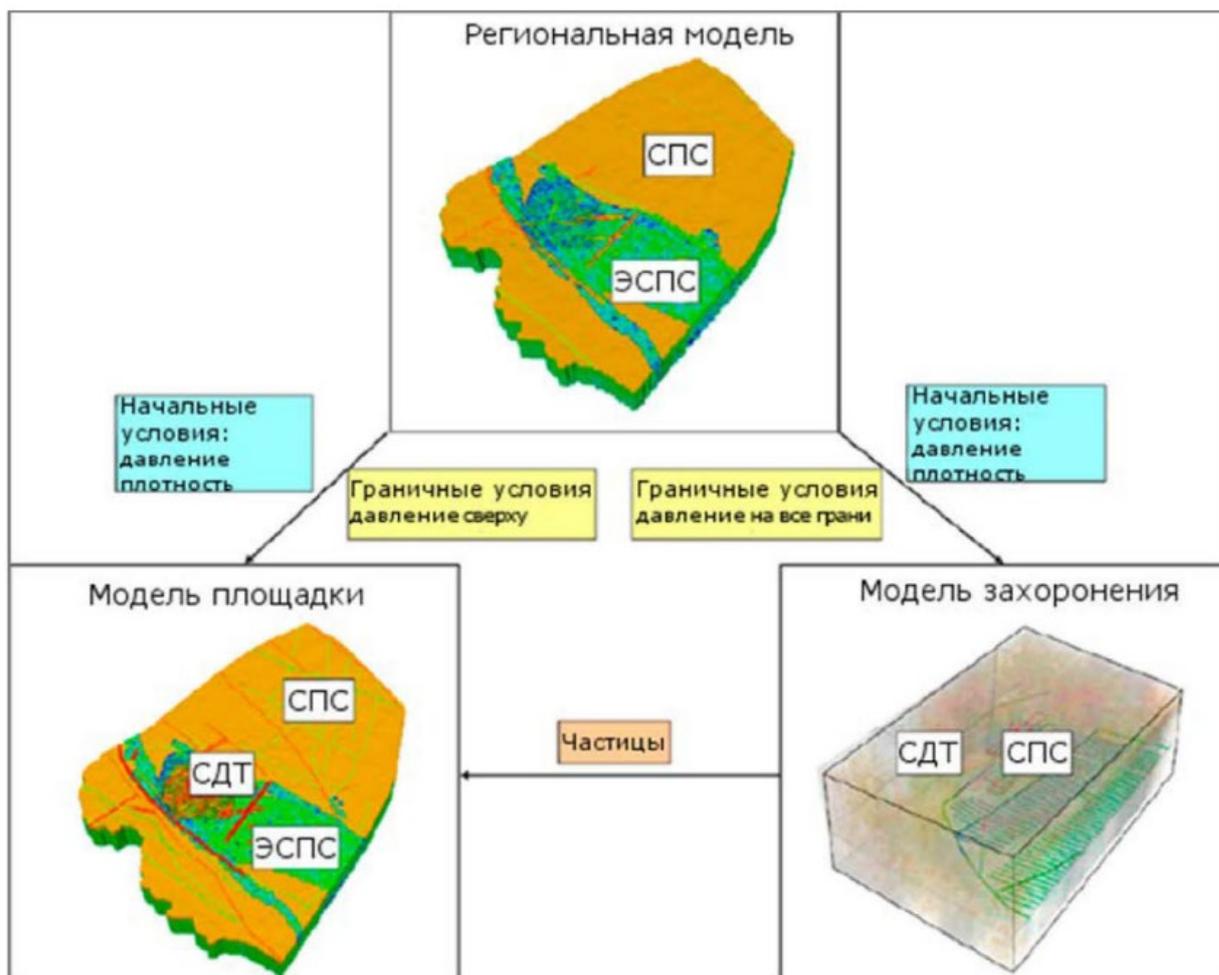


Рисунок 1.3.1 – Концепция моделей на различных масштабах: связи между моделями (Швеция). СПС – модель сплошной пористой среды; ЭСПС – модель эквивалентной сплошной пористой среды; СДТ – модель системы дискретных трещин) [28].

### 1.3.1 Региональный масштаб

Для шведского объекта рассчитывалось нестационарное течение подземных вод и перенос на территории размером 15 км на 10 км и до глубины 1200 м. Среда описывается континуальной пористой моделью (англ.: Continuous porous medium, CPM). В региональных масштабах различия между коэффициентами трещиноватости и пористости блоков различаются, в минимальном случае в пределах порядка. Статистический характер распределения трещин и породных блоков в элементарном объеме породы создает предпосылки для обращения к осредненным квазиоднородным моделям [29]. В случае моделирования в рамках концепции пористой среды необходимо рассматривать систему в виде двух вложенных друг в друга систем, в первом случае – свойства трещины, во втором – блоков. Область, непосредственно примыкающая к хранилищу, разбивается относительно мелкой сеткой (размер элемента 20 м). Данные о пористой среде такой сетки получаются

масштабированием модели с дискретными трещинами. Внешняя область разбивается грубой сеткой (размер элемента 100 м).

При моделировании учитывается зависимость плотности жидкости от температуры и концентрации растворенных веществ, а также изменение вязкости в связи с вариациями температуры, которые вызваны геотермальным градиентом.

Результаты расчетов на модели регионального масштаба используются в качестве граничных условий для стационарных расчетов в рамках моделей масштаба площадки и хранилища.

### 1.3.2 Масштаб горного отвода пункта захоронения

Модель масштаба пункта захоронения предназначена для детальных расчетов потока внутри захоронения. Главные тоннели, транспортные проходки и тоннели для размещения отходов моделируются с помощью СРМ-модели. В качестве параметров берутся гидравлические свойства материала для засыпки тоннелей. Другие структуры хранилища и зона, нарушенная при проходке, (excavation damage zone – EDZ) могут быть представлены дискретными сетями трещин со свойствами, гидравлически эквивалентными материалу засыпки.

Течение жидкости в такой модели считается стационарным. Данные о плотности жидкости и граничные условия по давлению интерполируются из модели регионального масштаба.

Перенос моделируется просчетом путей движения загрязнителя от места размещения отходов до границы модели. Особое внимание необходимо уделять при сопряжении двух подходов (DFN и СРМ) с сохранением непрерывности давления и потока на границе.

### 1.3.3 Масштаб промышленной площадки ПГЗРО

В модели масштаба площадки локальная область размером 3 км × 3 км, непосредственно примыкающая к ПГЗРО, в модели регионального масштаба заменяется моделью DFN-типа, чтобы лучше описать течение и пути переноса внутри ПГЗРО. В отличие от модели масштаба пункта захоронения здесь инженерные структуры ПГЗРО (тоннели) смоделированы трещинами со свойствами, эквивалентными свойствам материала засыпки.

На модели проводится расчет стационарного течения подземных вод с плотностью и граничными условиями, полученными интерполяцией с модели регионального масштаба.

Основная же задача модели площадки – продолжить расчет путей переноса частиц от места, где они покидают модель масштаба хранилища, до границ региональной модели.

#### 1.4 Постановка цели и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и параметрическое обеспечение расчетных моделей обоснования безопасности ПГЗРО в части оценки динамики переноса радионуклидов до зоны разгрузки на примере участка «Енисейский». Краткий анализ материала данной главы показывает, что для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать оценку по влиянию элементов геологического строения как части параметрического обеспечения модели на поток подземных вод на основе плановой геофильтрационной модели, реализованной методом аналитических элементов, и на основе профильной модели, выполненной в пределах участка «Енисейский»;
- выполнить обработку и интерпретацию результатов кустовой откачки из несовершенных скважин, разработать трехмерную модель, включающую обоснование таких аспектов параметрического обеспечения, как пространственная неоднородность фильтрационных свойств; воспроизведение фактического хода откачки и определение фильтрационных параметров по результатам калибровки модели;
- провести опытно-фильтрационные исследования (ОФР) для определения фильтрационных параметров с использованием современных пневматических пакеров, позволяющих надежно изолировать проницаемые интервалы;
- разработать различные варианты трехмерных геофильтрационных-геомиграционных моделей на основе различных подходов: с использованием блоковой структуры массива в рамках концепции пористой среды EPM (Equivalent Porous Medium) и DFM (Discrete Fracture Matrix) подхода, а также провести сопоставление полученных в различных вариантах геофильтрационных параметров.

## 2 Формирование исходных данных для оценки влияния структурных элементов на поток подземных вод

Участок «Енисейский» располагается в Сибирском федеральном округе Российской Федерации, в пределах листа О-46-XXXIV. Он находится в Красноярском крае, в 50 км к северо-востоку от краевого центра – г. Красноярска с населением более 1 млн чел., на правом берегу р. Енисей, ниже по течению. [Equation Chapter 2 Section 1](#)

### 2.1 Геологические и гидрогеологические условия

Геологическое изучение зоны потенциального влияния осуществлялось в ходе проведения региональных геологосъемочных работ, специализированных исследований на

прилегающих территориях ГХК и полигона Северный, а также ГРР (геолгоразведочные работы) поисковой и оценочной стадий на площади участка «Енисейский» (рис. 2.1.1).

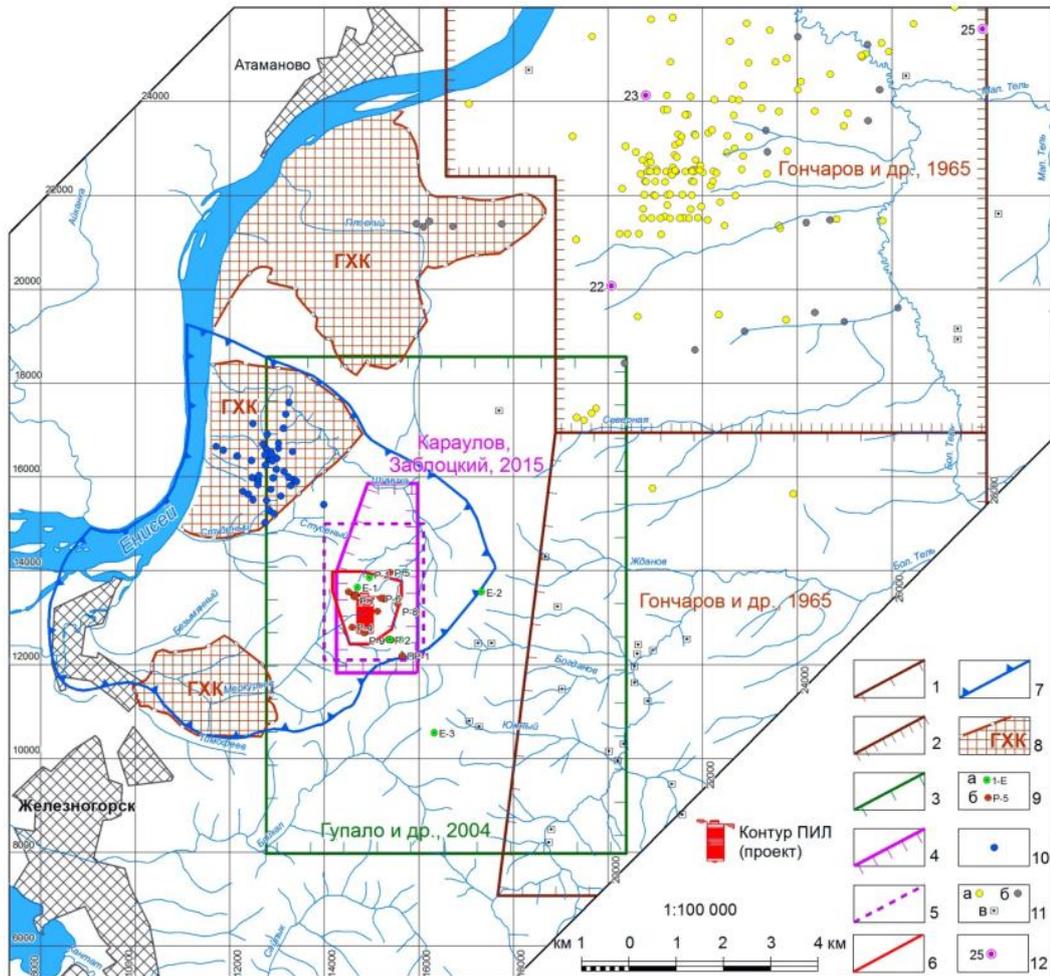


Рисунок 2.1.1 – Схема геологической изученности зоны потенциального влияния проектируемого ПГЗРО

1-2 – геолого-гидрогеологическая съемка масштаба 1:50 000 (1) и 1:25 000 (2); 3-5 – схематические геологические карты участка «Енисейский»: 3 – масштаба 1:50 000 [30]; 4 – масштаба 1:10 000 [31]; 5 – масштаба 1:10 000 [32]; 6 – контур лицензионной площади КРР 16117 ЗД (горный отвод); 7 – граница зоны потенциального влияния проектируемого ПГЗРО; 8 – контур и площадь горного отвода ГХК; 9-12 – буровые скважины: 9 – поисковые (а) и оценочные (б) на участке «Енисейский»; 10 – на территории ГХК; 11 – глубокие (а) и мелкие ручного бурения (б), а также обнажения (в) на площади полигона Северный, 12 – геолого-съёмочные. Вся площадь покрыта геологической съемкой масштаба 1:200 000

На участке «Енисейский» были проведены ГРП поисковой (2002–2010 гг.) и оценочной (2011–2015 гг.) стадий. Они начались с выполнения в 2002–2005 гг. среднемасштабных профильных геофизических работ по сети 1000 х (1500–1800 м), дешифрирования космических снимков среднего уровня пространственного разрешения, маршрутных наблюдений, проведения площадной гелиевой и профильной эманационной съемок. В это же время были пробурены первые поисковые скважины Е-1 – Е-3 глубиной по 100 м, глубина последней в 2005 г. была увеличена до 600 м.

*Характеристика метаморфических пород канской серии (AR<sub>1kn</sub>).* Метаморфические породы (гнейсы и кристаллические сланцы) занимают примерно  $\frac{4}{5}$  массива. Основная масса массива участка Енисейского сложена переслаивающимися светло-серыми, серыми (до темно-серых с зеленоватым и голубоватым оттенком) мигматизированными плагиогнейсами, биотитовыми, гранат-биотитовыми, силлиманит-кордиерит-биотитовыми и биотит-гиперстеновыми гнейсами, биотит-кварц-плагиоклаз-кордиеритовыми и, существенно реже, плагиоклаз-биотит-кварцевыми кристаллическими сланцами. На рисунке 2.1.2 приведена геологическая карта Енисейского участка по материалам геологических исследований 2009–2014 гг.

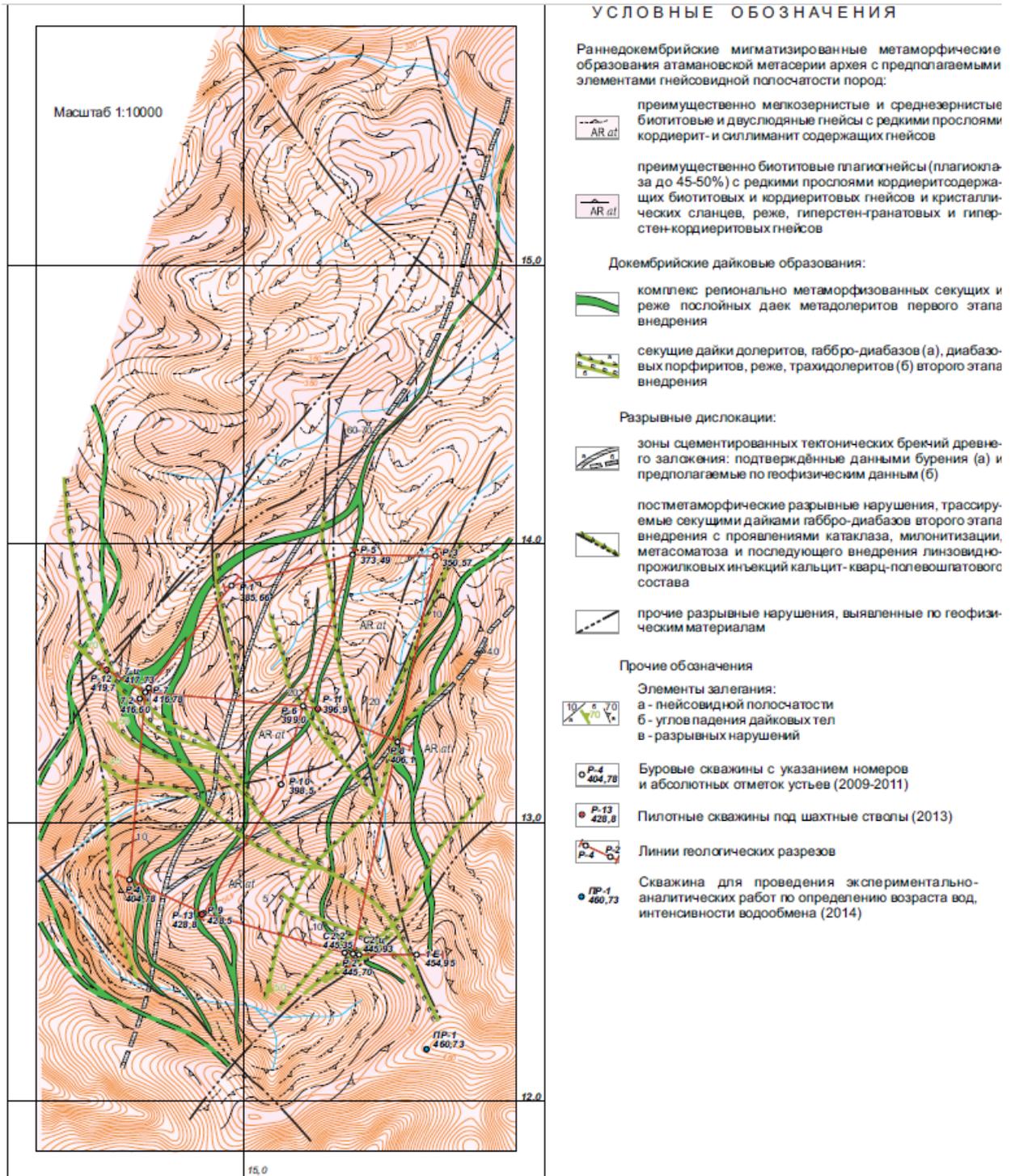


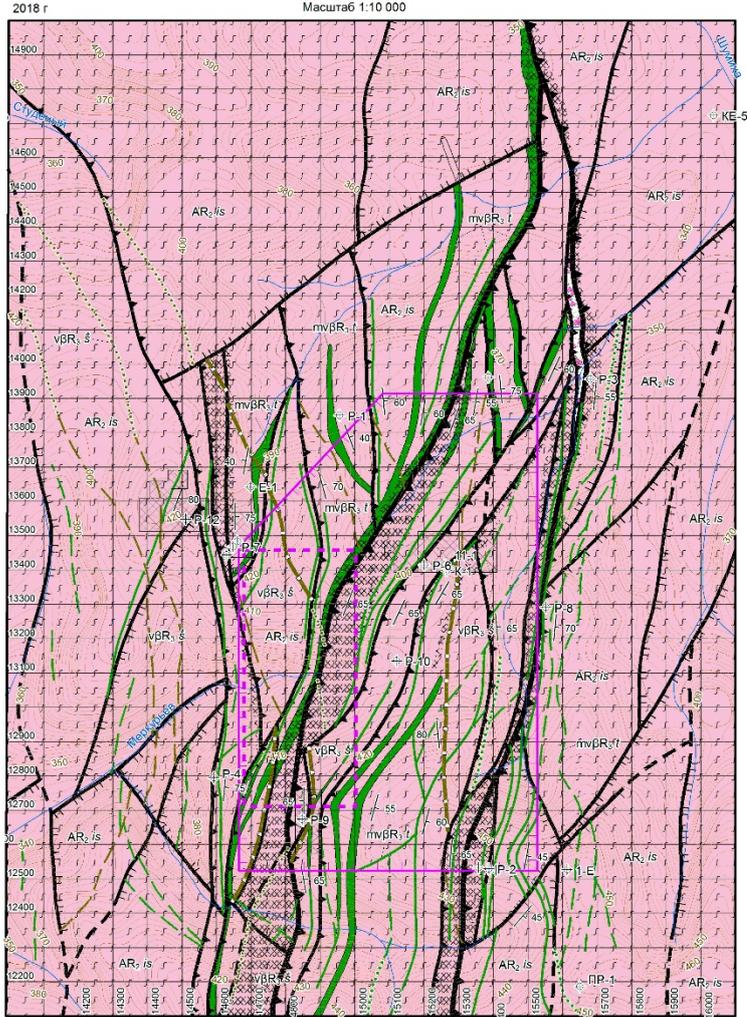
Рисунок 2.1.2 – Геологическая карта Енисейского участка по материалам геологических исследований 2009–2014 гг. [33]

В этот же период времени был сделан вывод, что в глубоких частях разреза динамика подземных вод в значительной мере определяется гидростатическими напорами в разрывных нарушениях II-IV порядков и их фильтрационными характеристиками. Была показана необходимость выявления пространственной ориентировки и картирования разрывных нарушений.

Геологоразведочные работы оценочной стадии на площади участка «Енисейский» проводились в 2011–2014 гг. В ходе оценочных работ выполнено изучение напряженного состояния пород на глубине 450–600 м, сорбционных и теплофизических свойств пород, составлены геологические колонки буровых скважин.

В результате проведенных работ в пределах участка выявлена высокая концентрация дайковых тел метадолеритов, имеющих субмеридиональное простирание, и секущих их маломощных даек долеритов и трахидолеритов. Сеть разрывных нарушений, напротив, оказалась проявлена менее интенсивно по сравнению с результатами поисковых работ. Выделена одна субмеридиональная структура с восточным направлением падения в центральной части площади, сложенная сцементированными тектоническими брекчиями, а также оперяющий ее разрыв СВ (северо-восточного) простирания. Кроме них отмечены разрывные нарушения СЗ (северо-западного) и субмеридионального направлений, трассируемые дайками долеритов и трахидолеритов. На рисунке 2.1.3 представлена схематическая геологическая карта района размещения ПГЗРО (участок «Енисейский»). На ней также отмечаются разрывные нарушения СЗ (северо-западного) и субмеридионального направления.

СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА  
РАЙОНА РАЗМЕЩЕНИЯ ПГЗРО (УЧАСТОК ЕНИСЕЙСКИЙ)



Составил О.А. Морозов по материалам ОАО «Красноярскгеология» Система координат местная  
Использована топооснова масштаба 1:10 000



1-3 - позднерифейский шошский дайковый комплекс [Никитов, 2003]. Дайки долеритов, трахидолеритов, установленные по данным бурения (1), по геофизическим данным (2), предполагаемые (3); 4-6 - позднерифейский токийский дайковый комплекс [Парфенов, 1967]. Дайки метадолеритов, установленные по данным бурения (4), по геофизическим данным (5), предполагаемые (6); 7 - позднеархейская (лолийская) исаевская метаморфическая серия. Плагитогнейсы, гнейсы биотитовые с прослоями гнейсов кордиерит-биотитовых, кристаллических сланцев силлиманит- или кордиеритсодержащих; 8 - границы геологические установленные (а) и предполагаемые (б); 9-12 - разрывные нарушения: взбросы главные (9) и второстепенные (10), обросы (11), разрывные нарушения, установленные по геофизическим данным (12) и предполагаемые (13); 14 - тектонические брекчи; 15 - зоны повышенной трещиноватости; 16 - элементы залегания; 17 - буровые скважины и их номера; 18-19 - контуры ПГЗРО (18) и его первой очереди (19), 20 - площадки стволов буровых скважин

Рисунок 2.1.3 – Геологическая карта Енисейского участка по материалам АО

«Красноярскгеология». Автор Морозов О.А. [32]

Гидрогеологическое изучение зоны потенциального влияния ПГЗРО осуществлялось в ходе региональных исследований, в процессе специализированных работ на смежных территориях – ПГЗ ЖРО Полигон «Северный», ГХК, а также на площадке проектируемого ПГЗРО на участке «Енисейский».

*Региональные представления* были получены по результатам комплексных исследований северной части Нижнеканского массива и отражены на гидрогеологической карте района работ масштаба 1:10000 (рис. 2.1.4).

В региональном отношении зона потенциального влияния ПГЗРО расположена в пределах Ангаро-Канского гидрогеологического массива Енисейской складчатой области, сложенного докембрийскими метаморфическими породами. Массив характеризуется преимущественным распространением трещинно-грунтовых вод (до глубин 50–90 м) и локальным распространением трещинно-жильных вод тектонических нарушений (до глубин в несколько сотен метров).

Трещинно-грунтовые воды образуют бассейны стока, в которых направление движения подземных вод определяется рельефом.

Трещинно-жильные воды гидравлически связаны с трещинно-грунтовыми и приурочены к зонам дробления и расщепления горных пород. До глубин 150–250 м трещинно-жильные воды по составу и физическим свойствам практически не отличаются от трещинно-грунтовых вод регионального распространения. Гидродинамические параметры зон распространения трещинно-жильных вод определяются, в том числе, и степенью тектонической активности на неотектоническом и современном этапах развития территории. Региональной областью разгрузки трещинно-жильных вод является р. Енисей. Мощность зоны активного водообмена составляет в среднем 250 м.

По условиям обводненности, распространения и движения подземных вод в районе работ выделяется три гидрогеологических подразделения: горизонт четвертичных элювиально-делювиальных отложений, трещинно-грунтовые воды зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильные воды условно водонепроницаемой толщи кристаллических пород.

*Горизонт четвертичных элювиально-делювиальных отложений* залегает на глубине 0,3–30 м; не выдержан по площади; средняя мощность водовмещающих пород 10 м. По типу вод горизонт относится к пластовому безнапорному. Он подстилается относительно водонепроницаемой толщей суглинков и/или архейских метаморфических пород. Водовмещающие породы представлены супесями и суглинками с подчинённым количеством песчано-гравийного материала. Наибольшее обводнение элювиально-делювиальные отложения имеют в периоды снеготаяния и затяжных дождей. Коэффициенты фильтрации пород горизонта четвертичных элювиально-делювиальных отложений изменяются от десятых долей до 20 м/сут. Питание горизонта происходит за

счет атмосферных осадков. Разгрузка осуществляется за счет транспирации, испарения, перетекания в нижележащие водоносные горизонты и в поверхностные водотоки.

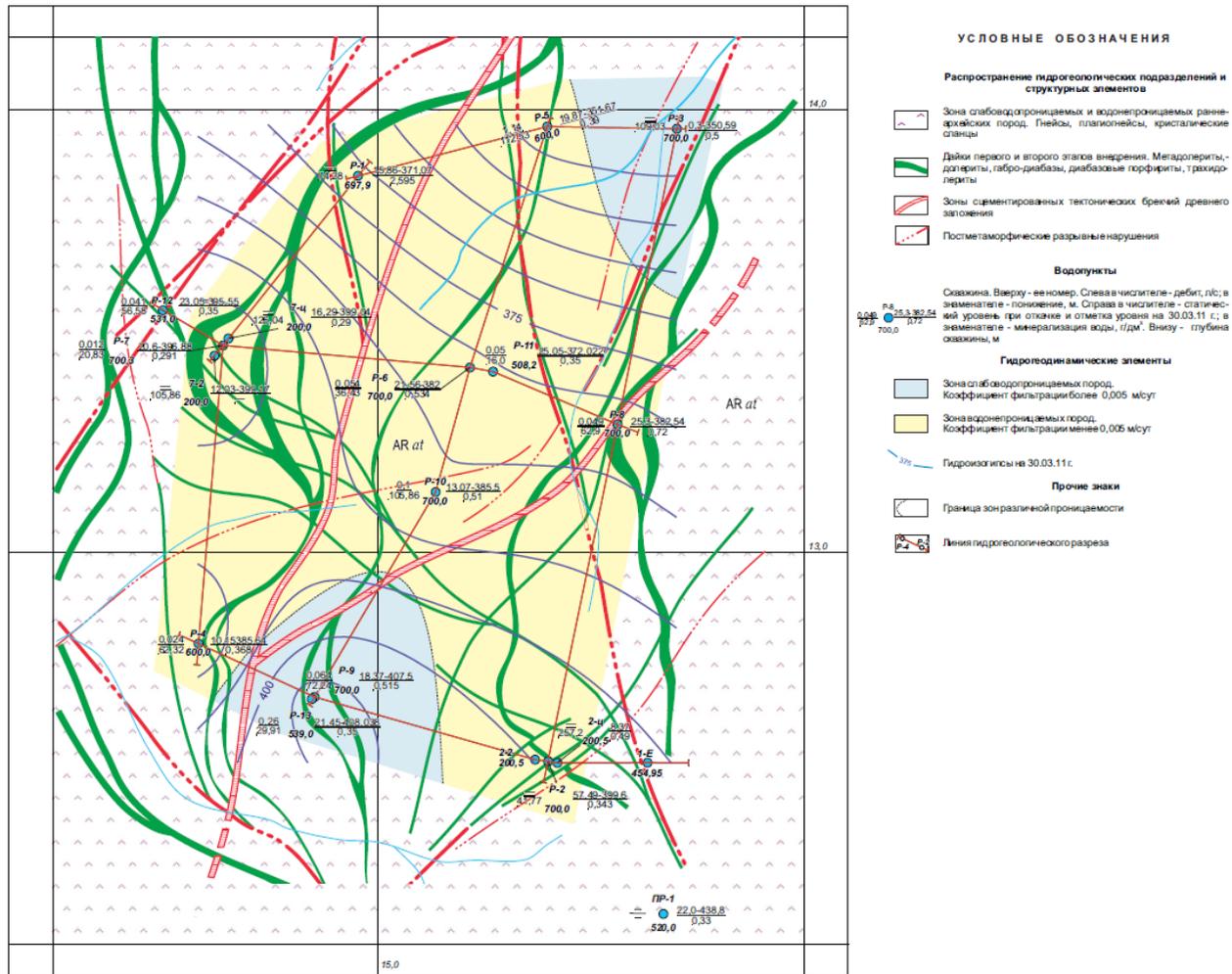


Рисунок 2.1.4 – Гидрогеологическая карта района работ (по [31])

*Трещинно-грунтовые воды зоны экзогенной трещиноватости архейских пород* напорно-безнапорные; глубина циркуляции – до 250 м; в зависимости от рельефа уровень грунтовых вод вскрывается на глубинах от 10 до 150 м. Фильтрационные свойства водовмещающих пород низкие: коэффициенты фильтрации изменяются в диапазоне от 0,0002 до 0,3 м/сут. Питание горизонта происходит за счет атмосферных осадков и перетока из вышележащего горизонта. Основное направление транзита – горизонтальное. Вертикальное (нисходящее и восходящее) движение подземных вод имеет подчиненное значение. Разгрузка осуществляется в долины рек, ручьев и временных водотоков.

В зоне трещинно-грунтовых вод распространены гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией 0,27–0,5 г/л; средний водородный показатель (рН) достигает 8,1; общая жесткость не превышает 6,25°Ж; содержание нитрат-иона не превышает 3,76 мг/л; содержание хлоридов находится в пределах 0,9–7,5 мг/л; общее содержание железа достигает 6 мг/л, аммония -1,2 мг/л, свободной углекислоты - 4,5–7,8 мг/л.

*Трещинно-жильные воды* условно водонепроницаемой толщи кристаллических пород образуют линейно вытянутые водоносные зоны, которые за пределами участка работ могут проследиваться на значительные глубины и расстояния.

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. Наблюдения за уровнями подземных вод, выполненные геологической службой ФГУП «ГХК» в 2010–2011 гг., указывают на наличие сложной гидравлической связи между отдельными трещинными зонами на участке работ.

Коэффициенты фильтрации основного объема зон трещиноватости, вскрытых скважинами, не превышают 0,0005 м/сут, но в отдельных интервалах коэффициент фильтрации может повышаться до сотых долей м/сут. Значения активной пористости - 0,0025–0,0035.

***Гидрогеологические исследования на площадке ПГЗРО участке «Енисейский»*** в последнее десятилетие активно проводятся силами АО «Красноярскгеология» [33]. В результате на изученную площадь была составлена схематическая гидрогеологическая карта масштаба 1:5000 (рис. 2.1.5).

Показанные на карте гидроизогипсы получены на основе режимных наблюдений, которые проводились на объекте в течение несколько лет и соответствуют уровням подземных вод (свободной поверхности), замеренным в скважинах в межень 30.03.2011 г.

Они согласуются с геологическим строением – разрывными нарушениями и дайками, простирающимися преимущественно в северо-северо-восточном направлении.

Специалистами АО «Красноярскгеология» были проведены опытно-фильтрационные работы со средним шагом 50 м по стволу скважин, позволившие измерить изменение напоров по вертикали. В результате этих исследований получены карты гидроизопьез для горизонтов с абсолютными отметками +100 и -100 м (рис. 2.1.6). Структура потока на этих горизонтах близка и соответствует конфигурации гидроизогипс.

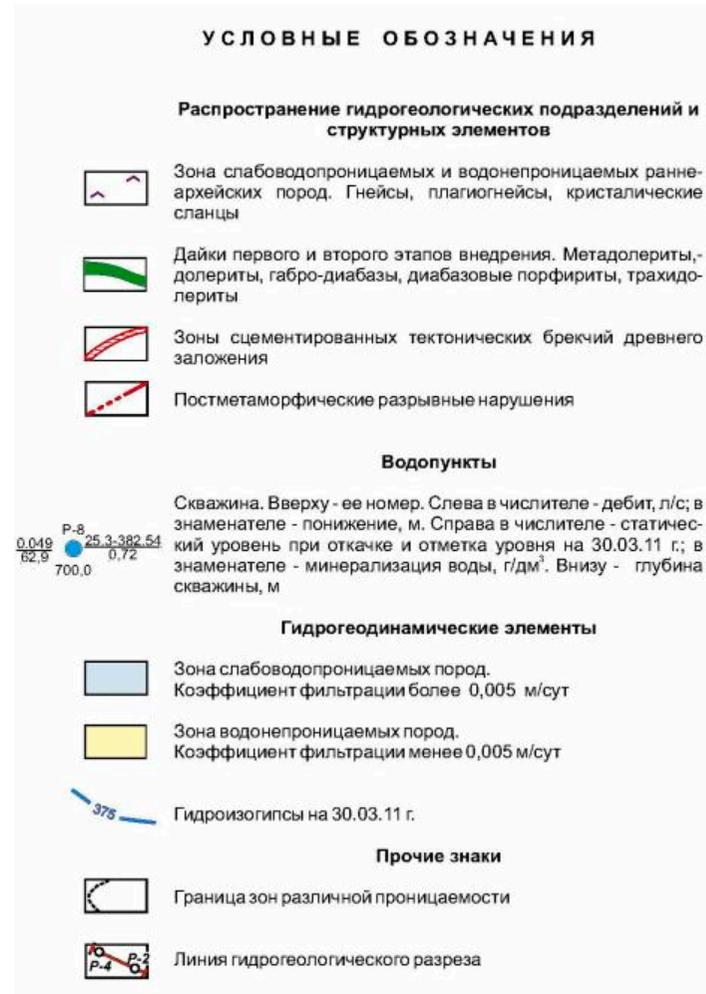
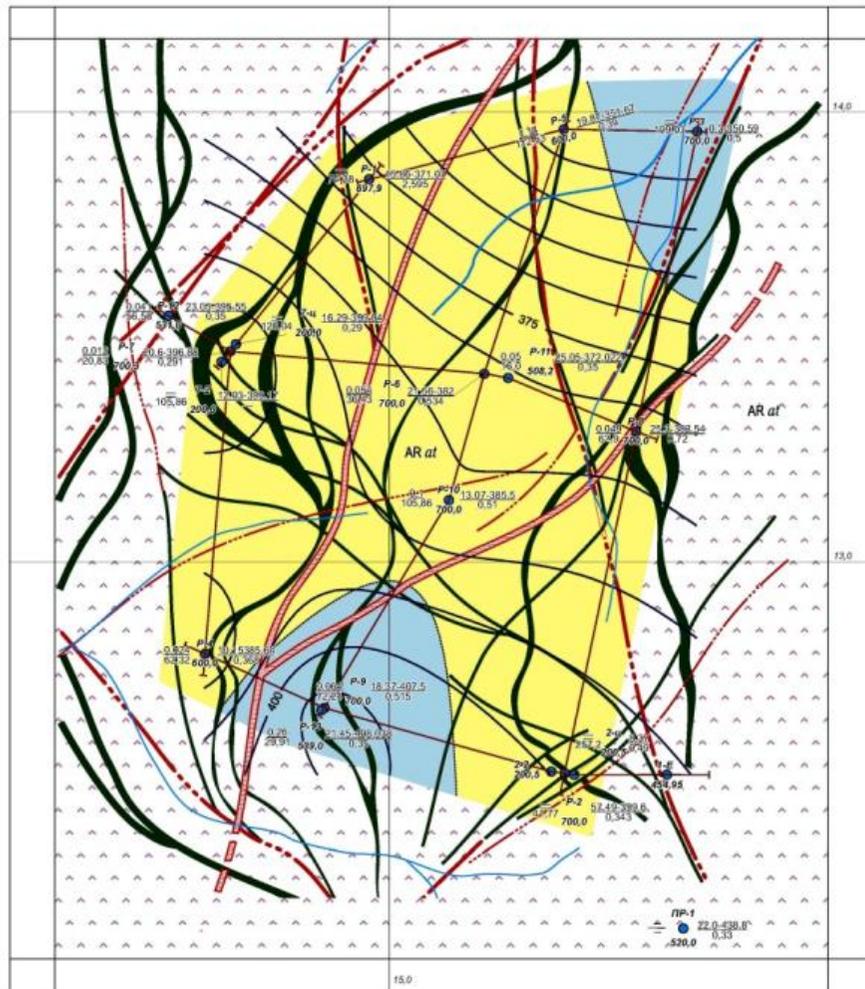


Рисунок 2.1.5 – Схематическая гидрогеологическая карта участка «Енисейский» [33]

В ходе опытно-фильтрационных работ выполнялись опытные откачки с целью оценки фильтрационных свойств. Это приводило к тому, что при откачке забирали воду не только из выделенного пакерами интервала, но и возможно, что и из водоподъемной колонны. В результате не удалось точно определить дебит откачки, связанный с притоком из трещиноватых зон, а после откачки возникал длительный период по восстановлению уровня, что позволило получить лишь приближенную оценку параметров. Опыт этих исследований показал, что при поинтервальных исследованиях в слабопроницаемых скальных породах целесообразно использовать поинтервальные нагнетания.

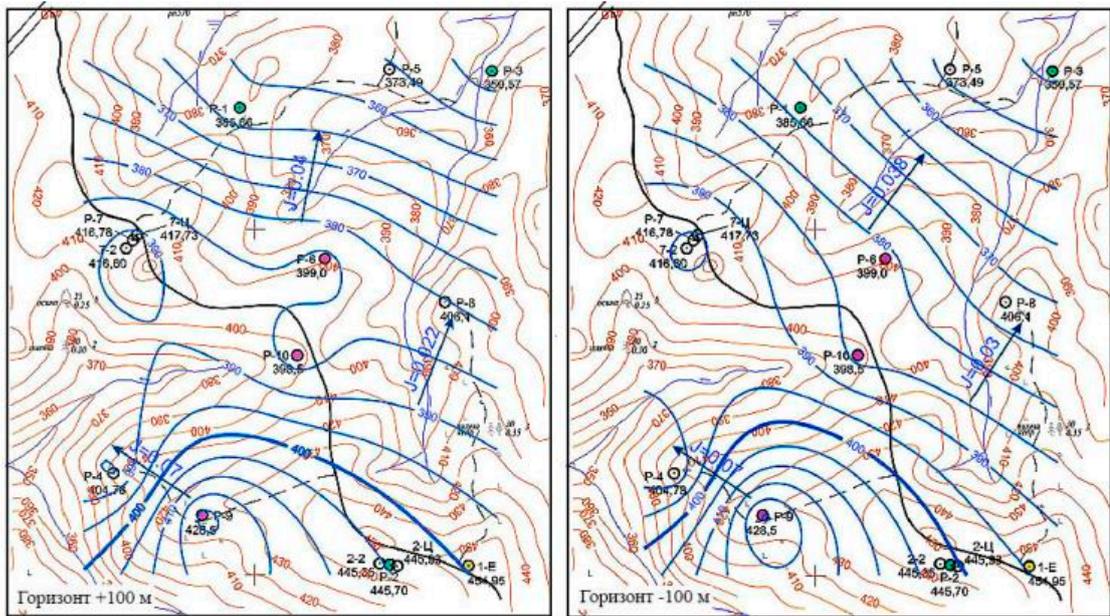


Рисунок 2.1.6 – Схематическая карта гидроизопьез площадки ПГЗРО для горизонтов +100 и -100 м [33, 31]

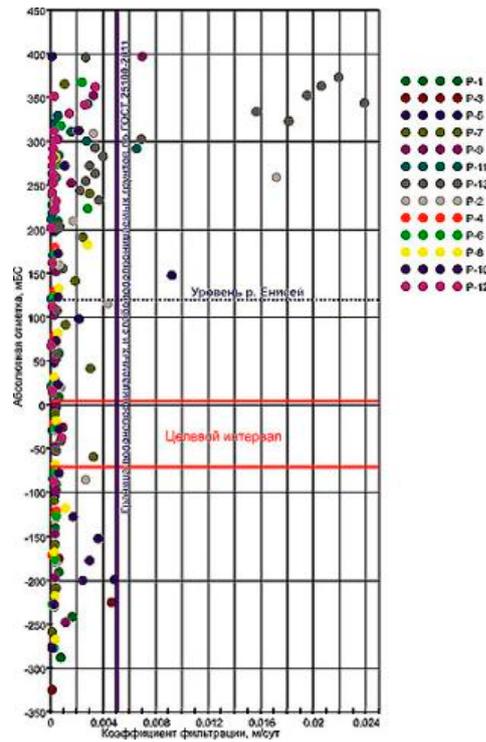


Рисунок 2.1.7 – Значения коэффициента фильтрации по данным поинтервальных откачек [33]

В 2013–2014 гг. АО «Красноярскгеология» были выполнены экспериментально-аналитические работы по определению возраста подземных вод и интенсивности водообмена, а также по уточнению гидрогеологической модели участка. Для решения поставленных задач была сооружена специальная скважина ПР-1 в юго-восточной части участка на водораздельном хребте, расположенная на удалении от имеющихся скважин. В скважине ПР-1 проведено опробование подземных вод для определения их расчетного абсолютного возраста, а также темпов естественной циркуляции, на основании датирования по  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  и соотношению  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ . Дополнительно было выполнено определение изотопного состава воды (содержаний дейтерия и кислорода-18), изучены фоновые концентрации трития, используемого в качестве трассера для индикаторного эксперимента.

Результаты этих работ показали, что средний абсолютный возраст подземных вод равен 11,4 тыс. лет. Осреднение проводилось по 12 определениям  $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$  возраста подземных вод.

Представление о структуре потока подземных вод дают замеры напоров в отдельных интервалах, отделенных пакерами. Такие замеры, согласно [33], проводились перед проведением опытно-фильтрационных работ.

Достоверность поинтервальных данных можно увидеть, сопоставляя замеры напоров в скважинах, пробуренных рядом. На рисунке 2.1.8 показано распределение напоров в

скважинах, пробуренных в 2011 г. (Р-6 и Р-9) и 2013 г. (Р-11 и Р-13). Этот рисунок показывает хорошее совпадение замеров напоров до абсолютных отметок 200 м. Ниже наблюдается расхождение, которое можно объяснить различием в геологических условиях и разновременностью замеров, но многие тенденции повторяются. График вертикального распределения напоров в скважинах Р-6 и Р-9 скорее соответствует растущим напорам с глубиной, а значит - восходящему потоку.

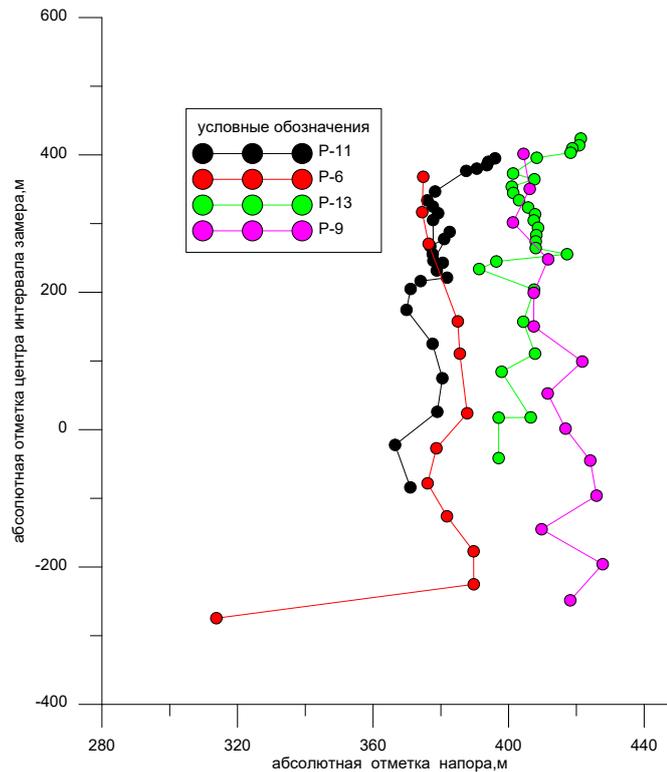


Рисунок 2.1.8 – Распределение напоров по вертикали в соседних скважинах

Увеличение напоров с глубиной, соответствующее восходящему потоку, можно увидеть в шести скважинах (см. рисунок 2.1.9).

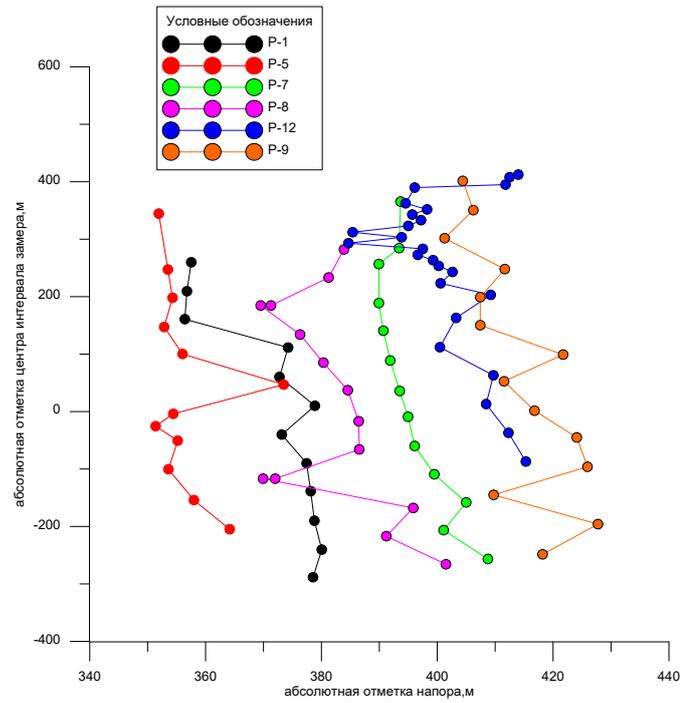


Рисунок 2.1.9 – Графики поинтервальных замеров напоров для скважин P-1, P-5, P-6, P-7, P-8, P-9 и P-12, показывающие преимущественный рост напоров с глубиной

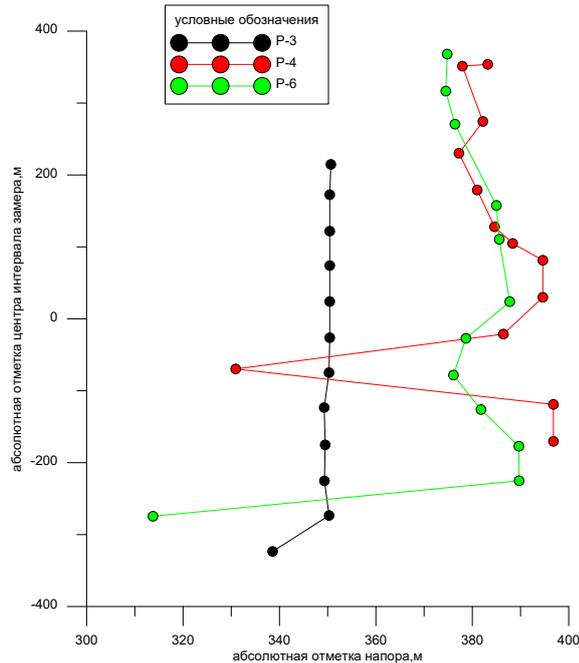


Рисунок 2.1.10 – Графики, показывающие преимущественно рост напора с глубиной

В ряде скважин ярко выраженной тенденции изменений напоров по вертикали не прослеживается, но имеются в отдельных интервалах общие черты, возможно связанные с геологическим строением (см. рисунок 2.1.10). В скважинах P-2 и P-10 (см. рисунок 2.1.11) отмечаются как восходящие, так и нисходящие потоки.

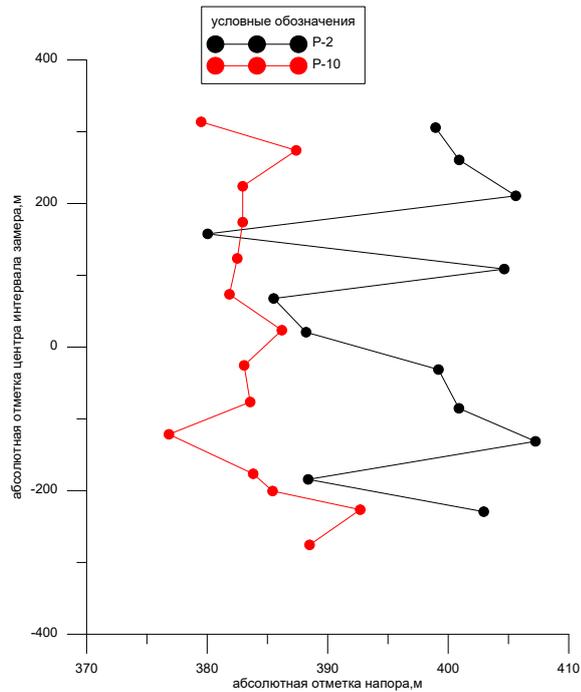


Рисунок 2.1.11 – Графики, показывающие изменяющиеся по вертикали направления движения подземных вод в скважинах Р-2 и Р-10

Приведенные графики изменения напоров объясняются сложным геологическим строением массива. Трехмерное представление распределения напоров приведено на рисунке 2.1.12 и свидетельствует об общем направлении движения потока на северо-северо-восток вдоль основных разрывных нарушений в сторону р. Шумиха. Приведенная выше информация о направлении потока часто отвергается. Это аргументируют ошибками при поинтервальных замерах. Возможно такие ошибки, связанные с недостаточной изоляцией интервалов и другими причинами, и были, но, однако, как следует из рисунка 2.1.5, 2.1.6, северо-северо-восточное направление потока подземных вод сохраняется для всего массива и подтверждается всеми скважинами. В случае значимых ошибок измерения поле напоров фильтрационного потока было бы хаотическим, не выдержано, без основного направления.

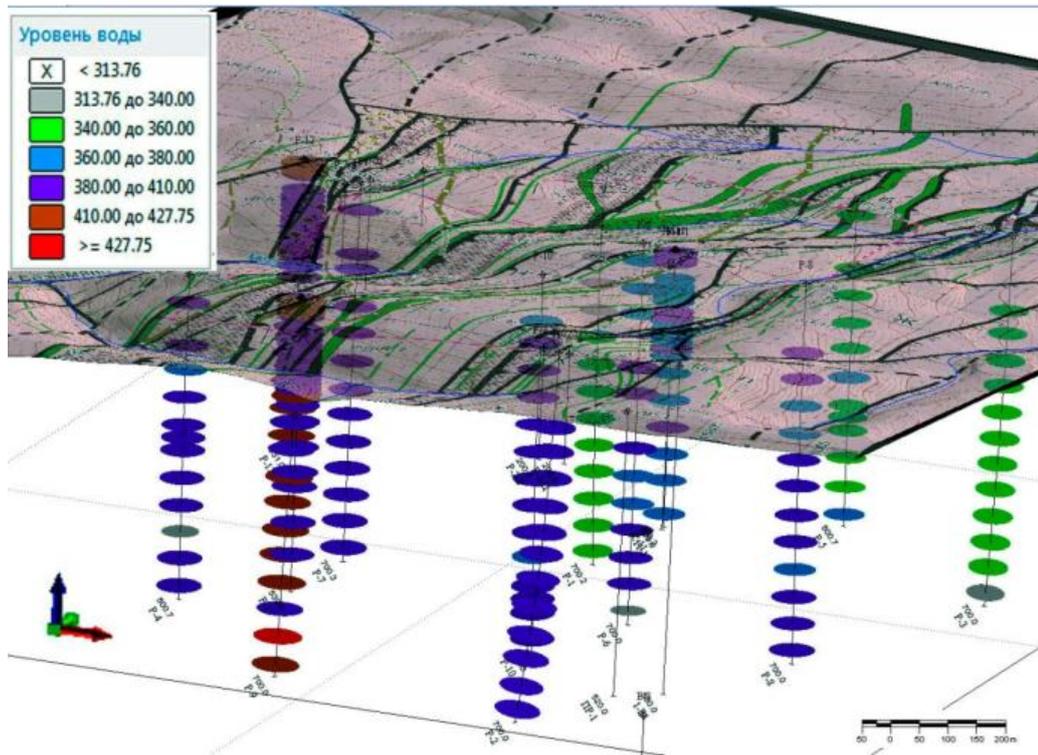


Рисунок 2.1.12 – Трехмерное представление распределения напоров в районе ПИЛ (в левом верхнем углу указаны абсолютные отметки уровня)

Достоверность поинтервально измеренных напоров можно также оценить на основе сопоставления с данными регулярных режимных наблюдений (см. рисунок 2.1.13). Такие наблюдения проводили с перерывами с 2010 года [33].

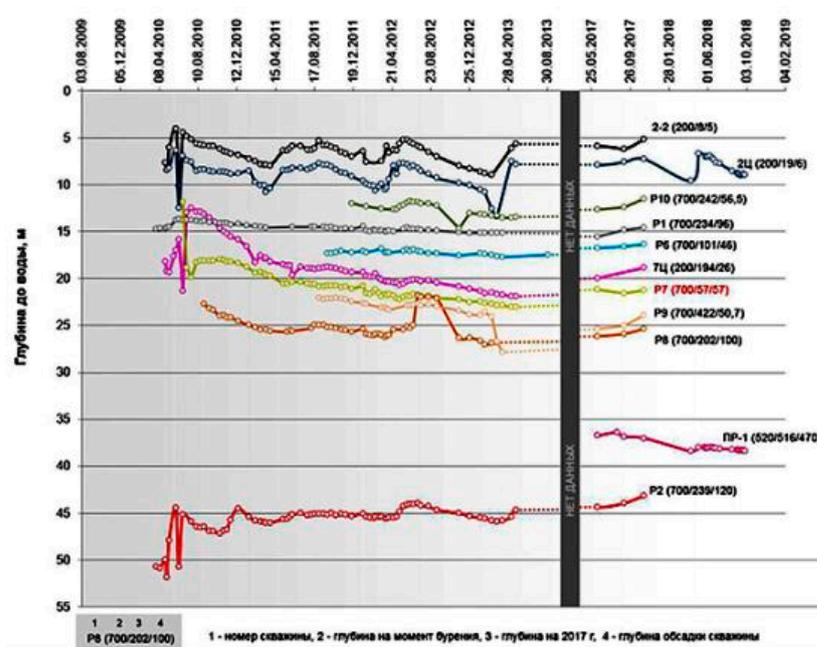


Рисунок 2.1.13 – Графики изменения уровней подземных вод в период с 2010–2013 и 2017–2018 гг. [34]

Как видно из рисунка 2.1.13, в начальный период наблюдений отмечались значительные изменения уровня с амплитудой до 10 м. Эти колебания вызваны тем, что в этот период на участке проводились опытно-фильтрационные работы. После завершения опытно-фильтрационных работ на участке (с сентября 2010 г.) резких колебаний уровня подземных вод не наблюдалось. Данные мониторинга были получены для скважин с открытым интервалом  $L$ , длина которого достигает сотен метров (см. таблицу 2.1). Поэтому абсолютные отметки уровней  $H$ , измеряемых в скважинах, являются средними напорами для открытого интервала и связаны с поинтервальными замерами напоров  $h(z)$  следующим образом:

$$H = h_{cp} = \frac{1}{L} \int_0^L h(z) dz \quad (2.1)$$

В таблице 2.1 показано, что абсолютные значения уровней в скважинах  $H$  на межень 2013 г. хорошо совпадают со средними значениями напоров  $h_{cp}$ , полученных при пакерных исследованиях. Хорошее совпадение уровней в скважинах  $H$  со средними напорами  $h_{cp}$  приведено также на графике разброса (рисунок 2.1.14). Это позволяет считать данные о замерах напоров, полученные при пакерных исследованиях, вполне удовлетворительными.

Таблица 2.1 – Коэффициенты фильтрации элементов геологического строения по результатам решения оптимизационной задачи.

Номер скважины	Открытый интервал, глубины от – до, м $L$	Абсолютная отметка уровня в скважине, м $H$ на 29.01.2013	Средний абсолютный напор по данным поинтервальных исследований, м $h_{cp}$
P-1	96-700	371.04	371.89
P-2	120-700	400.68	396.88
P-4	101.8-700	384.9	382.68
P-5	100-600	351.76	356.57
P-6	27.4-600	381.98	376.12
P-7	46-314, 2	394.39	396.03
P-8	56.6-700	381.64	382.19
P-9	100-700	405.67	413.87
P-10	50.7-700	385.51	384.09

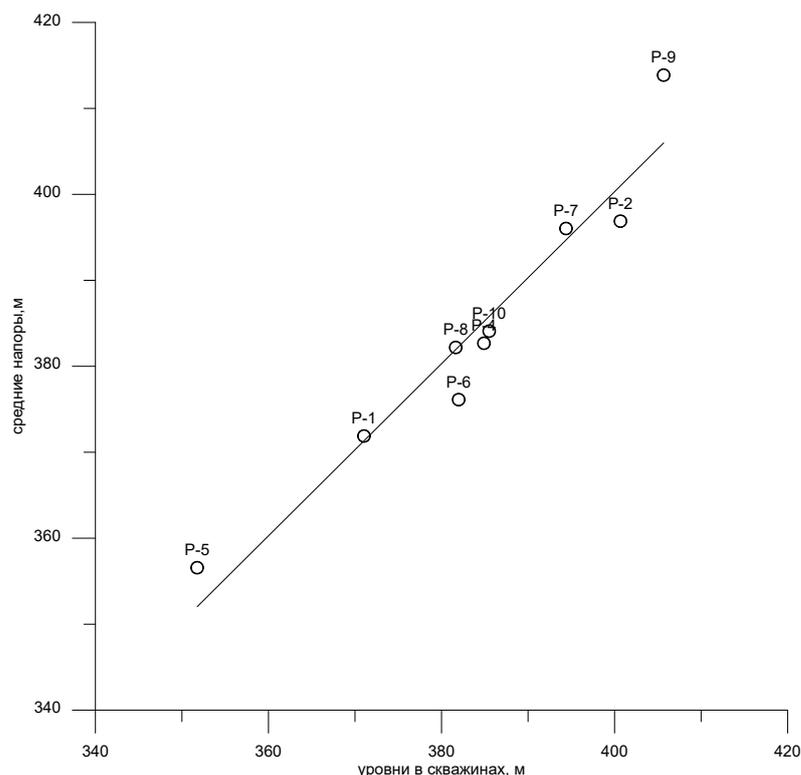


Рисунок 2.1.14 – Сопоставление абсолютных значений уровней в скважинах на 29.01.2013 со средними значениями напоров  $h_{cp}$ , полученных при проведении опытно-фильтрационных работ

Таким образом, результаты поинтервальных замеров напоров находят подтверждение в следующем:

- повторяемости результатов замеров напоров в соседних скважинах;
- едином для всего 3D-массива направлении потока на северо-северо-восток (рисунок 2.1.5, 2.1.6, 2.1.12);
- соответствии средних напоров данным режимных наблюдений (рисунок 2.1.14).

Анализ распределения напоров при поинтервальных исследованиях позволил построить гидрогеологическую карту для горизонта - 70 м и отразить распределение напоров на продольном геолого-гидрогеологическом разрезе (рисунок. 2.1.15). Полученные результаты соответствуют пространственному распределению напоров (см. рисунок 2.1.12) и показывают, что направление потока подземных вод коррелирует с простиранием основных тектонических структур участка, ориентировано в плане на северо-северо-восток, а его разгрузка приурочена к локальной дрене — р. Шумиха. От общего направления потока зафиксировано одно отклонение на северо-запад, в направлении

разлома Безымянный. Это связано со структурной неоднородностью фильтрационных свойств пород, которую необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований.

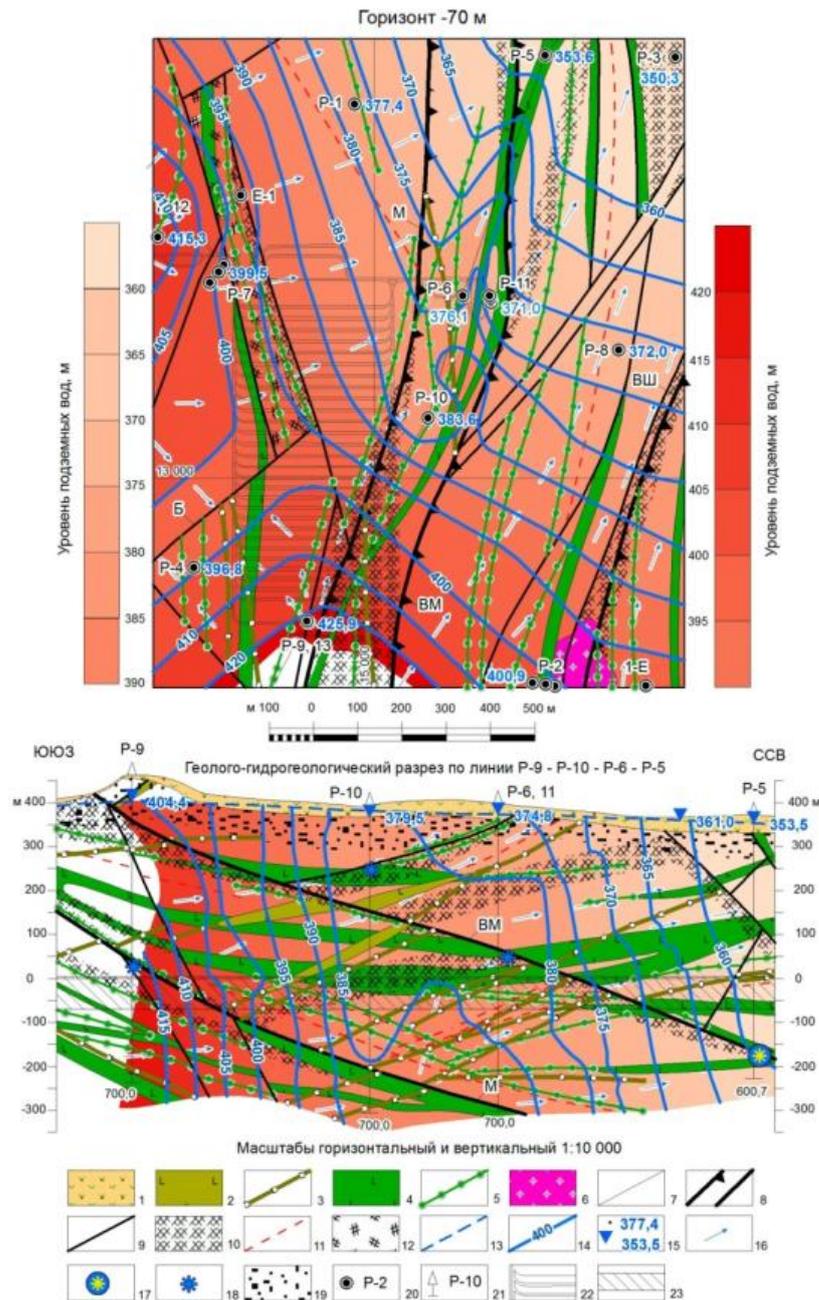


Рисунок 2.1.15 – Геолого-гидрогеологическая карта для горизонта - 70 м и геолого-гидрогеологический разрез по линии скв. P-9 – P-10 – P-6 – P-5 [32]

1–12 — основные элементы геологического строения: 1 — плиоцен четвертичные отложения нерасчлененные, 2–6 — интрузивные образования в толще гнейсов: 2 — дайки трахидолеритов, 3 — то же вне масштаба, 4 — метадолериты, 5 — то же вне масштаба, 6 — гнейсо-граниты, 7 — геологические границы и линия разреза, 8 — разрывные нарушения главные, 9 — разрывные нарушения второстепенные, 10 — зоны повышенной трещиноватости, 11 — то же внемасштабные, 12 — зоны смятия; 13 — уровень подземных

вод; 14 — гидроизопъезы, м; 15 — абсолютные отметки уровня подземных и поверхностных вод, м; 16 — направление потока подземных вод; 17–18 — участки водопритока установленного (17) и предполагаемого (18); 19 — зона приповерхностного окисления пород; 20–21 — буровые скважины на схеме (20) и на разрезе (21); цифры на забое — глубина скважины, м; 22 — контур проектируемого ПГЗРО; 23 — целевой горизонт. Буквами обозначены разломы: Б — Безымянный, ВМ — Верхнемеркурьевский, М — Меркурьевский.

## 2.2 Схематизация гидрогеологических условий и реализация плановой задачи фильтрации методом аналитических элементов

Ниже приведены предварительные результаты расчетов геофильтрации и геомиграции. В главе 5 приведены расчеты для трехмерных 3D-моделей. В данной главе приведены расчеты, выполненные на двумерных моделях – плановой и профильной.

Изучение гидрогеологических условий в районе ПИЛ, которые представлены на гидрогеологической карте и разрезе (см. рисунок 2.1.15), позволяет считать, что основные структурные элементы имеют северное простирание и крутое падение (около 70°) на восток. Это дает возможность приближенно реализовать их на двумерной плановой фильтрационной модели. В плановом приближении принимается, что падение структурных элементов вертикальное. Другое приближение, которое приходится принять при создании плановой модели, связано с тем, что для характеристики движения подземных вод берется единый по вертикали уровень и средний коэффициент фильтрации. Чтобы проверить такую модель, необходимы замеры уровней в полевых условиях. Для верификации модели были выбраны значения уровней, измеренные в межень 29.01.2013 г. в 9 скважинах. Все они имели открытый интервал более 500 м и промерялись в течение нескольких лет. Данные, по которым была проведена верификация, приведены в таблице 2.1.

Разработка плановой модели проводилась на основе метода аналитических элементов (МАЭ) – самого гибкого метода для решения задач двумерной стационарной фильтрации [35]. В 80-е годы прошлого века за рубежом усилиями профессора О. Страка [37] и его учеников [35] начал развиваться метод аналитических элементов (МАЭ). В основе МАЭ – реализация гидрогеологической обстановки на основе распределённых источников-стоков, интенсивность которых может быть заранее известна (скважины) или найдена (водотоки). МАЭ может также рассматриваться как вариант метода граничных элементов [38]. Судя по публикациям, наиболее интересный круг задач, решаемых МАЭ, соответствует модели плановой стационарной геофильтрации:

$$\frac{\partial}{\partial x}(km \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(km \frac{\partial h}{\partial y}) + W + Q + \alpha(H - h) = 0 \quad (2.2)$$

где  $x, y$  – плановые координаты,  $Q$  – производительность откачивающих скважин,  $W$  – инфильтрационное питание,  $k$  – коэффициент фильтрации,  $m$  – мощность водоносного горизонта,  $h$  – напор подземных вод,  $\alpha$  – проводимость ложа реки,  $H$  – абсолютная отметка уровня в реке. При решении МАЭ принимается, что параметры постоянны в границах выделенных зон. Решение проводится в потенциалах, которые соответствуют напорным и безнапорным условиям:

$$\begin{aligned} \Phi &= kmh - 0.5km (h \geq m) \\ \Phi &= 0.5kh^2 \quad (h < m) \end{aligned} \quad (2.3)$$

В МАЭ часть источников-стоков известна заранее, часть должна быть найдена в результате решения системы уравнений, которая получается для зависимостей в потенциалах в контрольных точках  $i=1$ , расположенных в середине аналитических элементов:

$$\Phi_i = Q_1 R_{i,1} + Q_2 R_{i,2} + Q_3 R_{i,3} + \dots + Q_n R_{i,n} + C \quad (2.4)$$

Где  $Q_n$  – расход источника-стока, связанного с аналитическим элементом с номером  $n$ ,  $R_{i,n}$  функция влияния аналитического элемента – с номером  $n$  в контрольной точке  $i$ ,  $C$  – постоянная интегрирования, для нахождения которой нужно значение потенциала в референтной точке  $i=m$ . Функции влияния – это решения для точечных, линейных и площадных стоков, известные из теории фильтрации и приведенные. Для аналитического элемента скважина, функция влияния равна:

$$R_{i,n} = \frac{1}{2\pi} \ln r_{i,n} \quad (2.5)$$

Совместное действие нескольких скважин реализуется методом суперпозиции. Для моделирования рек в методе реализован специальный тип аналитических элементов – Линейный сток. Он получен суперпозицией решений для точечных стоков таким образом, чтобы расходы отдельного стока и притока к реке в целом, зависели от уровней, заданных в узловых точках отрезков, аппроксимирующих реку (см. 2.2.1). Для того, чтобы смоделировать сложную речную сеть – используют суперпозицию нескольких линейных стоков.

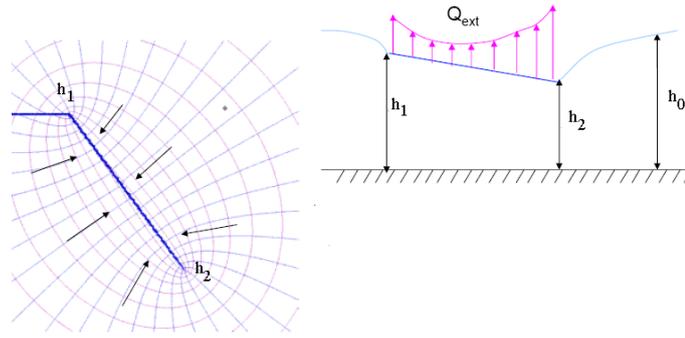


Рисунок 2.2.1 – Аналитический элемент “Линейный сток”

Важной составляющей метода являются аналитические элементы «неоднородность» (см. рисунок 2.2.2). Данные элементы реализуются заданием двух линейных источников-стоков, заданных с разных сторон зоны неоднородности. При этом положительный знак имеют источники, расположенные в области с наибольшими фильтрационными свойствами. Суммарный расход такой системы равен нулю. Следует отметить, что такой подход соответствует условию 4 рода на границе зон неоднородностей, которое используется при аналитическом решении фильтрационных задач.

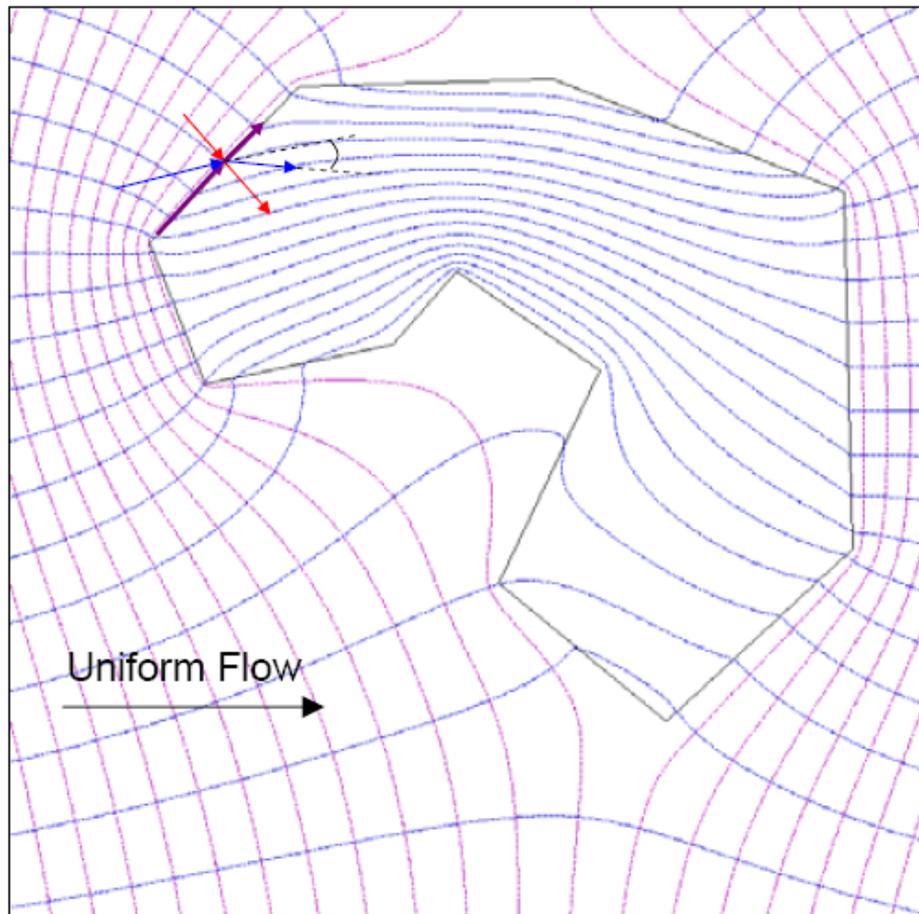


Рисунок 2.2.2 – Аналитический элемент неоднородность

На основе МАЭ была подготовлена региональная модель (рисунок 2.2.3). Частью ее, в пределах которой более детально были учтены варианты неоднородности, является площадка ПИЛ.

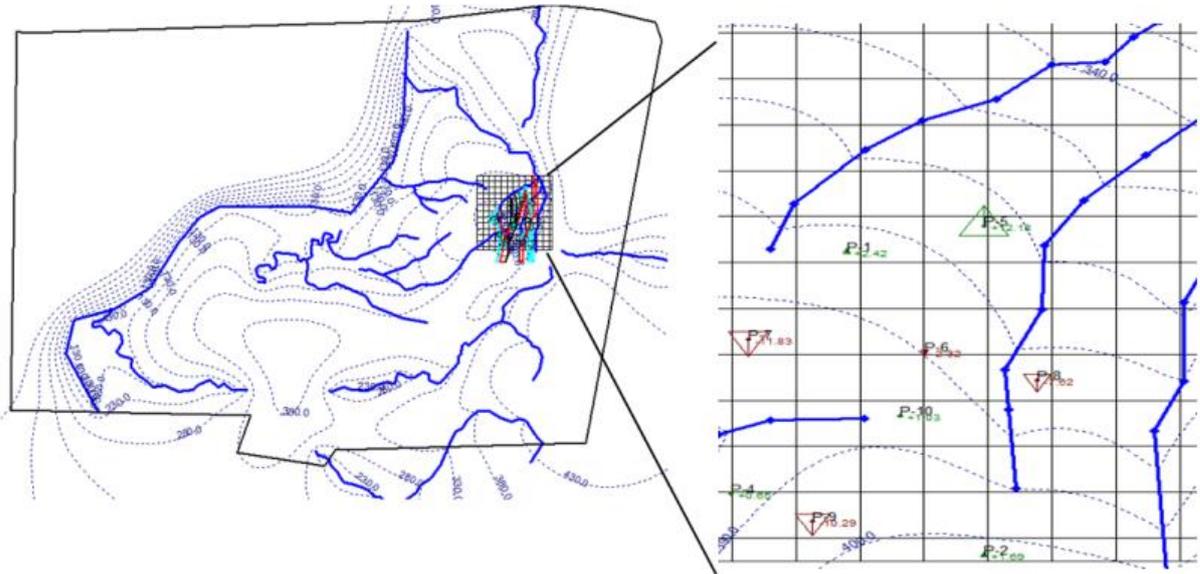


Рисунок 2.2.3 – Региональная модель с детализацией вблизи площадки ПИЛ

Дискретизация в МАЭ позволяет задать: полилиниями – водотоки и полигонами – структурные элементы (зоны неоднородности). Дискретизация расчетной области, выполненная с помощью методов аналитических элементов в пределах площадки ПИЛ, показана на рисунке 2.2.4. Общее количество элементов составило 845. Для задания структурных элементов, представленных на этом рисунке, была использована геологическая карта для горизонта -70 м (см. рисунок 2.1.15).

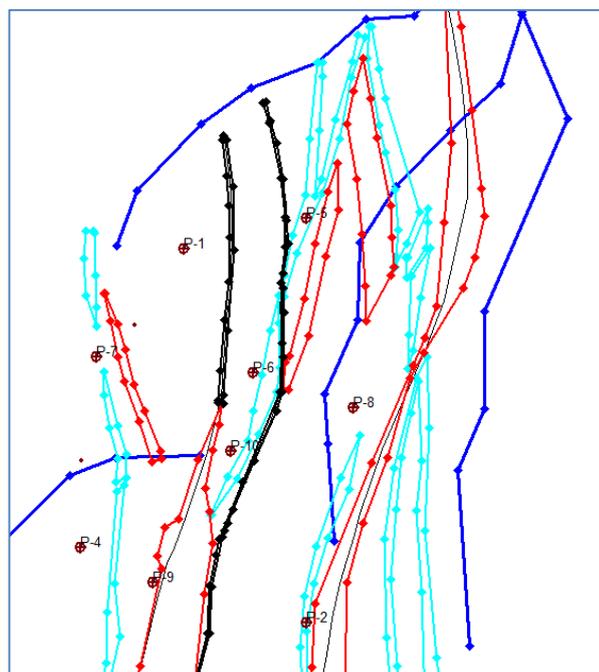


Рисунок 2.2.4 – Дискретизация линейных стоков и структурных элементов аналитическими элементами. Дайки (зеленые линии), зоны повышенной трещиноватости (красные линии) и разломы (черные линии). Синие линии – водотоки.

На первом этапе расчетов были заданы только водотоки, однородные фильтрационные свойства и инфильтрационное питание. В процессе перебора вариантов было найдено удовлетворительное соответствие фактических и модельных данных (рисунок 2.2.5) при отношении инфильтрационного питания  $W$  к коэффициенту фильтрации  $K_{\phi}$ , равному  $W/K_{\phi}=0,055$ .

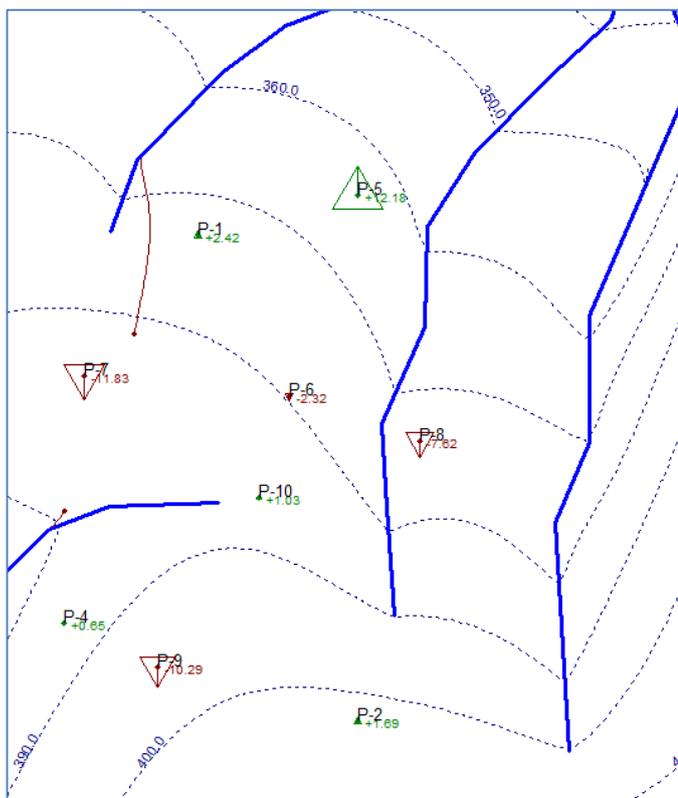


Рисунок 2.2.5 – Вариант 1. Модельная карта гидроизогипис для однородного строения.

Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

Далее, как показано в таблице 2.2, были выполнены еще 6 вариантов расчетов, при которых последовательно добавлялись структурные элементы: дайки, зоны повышенной трещиноватости и разрывные нарушения. Дайки задавались с коэффициентами фильтрации на порядок ниже окружающих пород, а зоны повышенной трещиноватости и разрывные нарушения - в 2 раза выше. При проведении расчетов фиксировали, насколько новый вариант приближает модель к фактическим данным, приведенным в таблице 2.1. В качестве критерия сопоставления была выбрана сумма квадратов отклонений:

$$\sum_{i=1}^N (H_{i,m} - H_{i,\phi})^2$$

Где  $i$  и  $N$  – номер скважины и количество скважин соответственно,

$H_{i,m}$  и  $H_{i,\phi}$  – модельный и фактический уровень для скважины  $i$  соответственно.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.2 и на рисунках 2.2.5–2.2.11. Проведенные расчеты показали, что добавление структурных элементов (в большей степени даек и зон, повышенной трещиноватости) ведет к большему соответствию фактических и модельных напоров. Отсюда следует необходимость учета структурных элементов в более точных модельных построениях. Проведенные расчеты позволяют считать, что основное направление подземных вод – на северо-северо-восток в сторону р. Шумиха. Это направление можно выбрать для расчетов на профильной модели, ориентированной вдоль геологического разреза. В пункте 2.3. приведены результаты расчетов с использованием профильной модели.

Таблица 2.2 – Сопоставление различных вариантов задания структурных элементов к отношениям коэффициента фильтрации структурного элемента к коэффициенту фильтрации окружающих пород (матрицы).

№№ варианта	Задание структурных элементов	Отношение коэффициента фильтрации структурного элемента к коэффициенту фильтрации окружающих пород (матрицы)	Сумма квадратов отклонений фактических и модельных уровней
1	Однородное строение		467,8
2	Дайки	0,1	448,5
3	Зоны повышенной трещиноватости	2	446
4	Дайки Зоны повышенной трещиноватости	0,1 2	424
5	Разломы	2	473,4
6	Дайки Разломы	0,1 2	448
7	Дайки Разломы Зоны повышенной трещиноватости	0,1 2 2	425,3

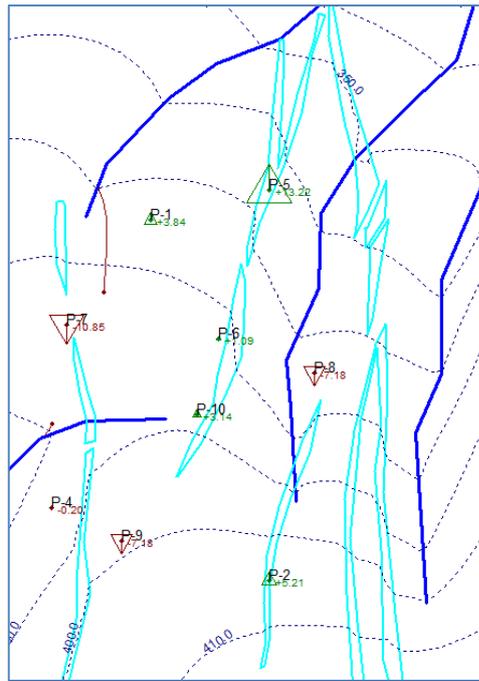


Рисунок 2.2.6 – Вариант 2. Модельная карта гидроизоги́пс при задании даек (зеленые линии). Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

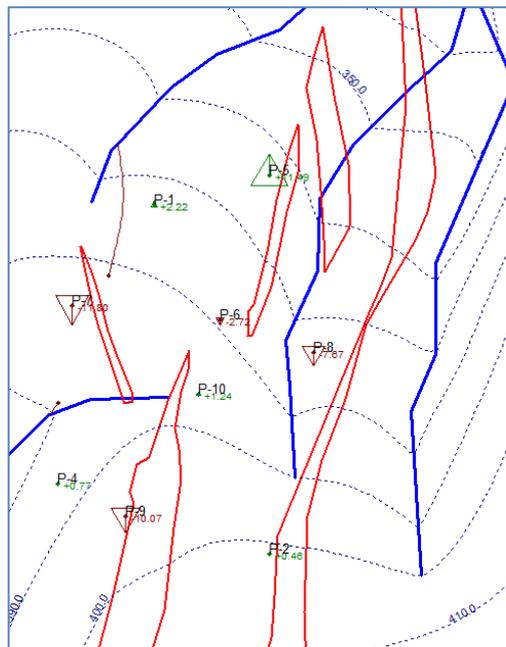


Рисунок 2.2.7 – Вариант 3. Модельная карта гидроизоги́пс при задании зон повышенной трещиноватости (красные линии). Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

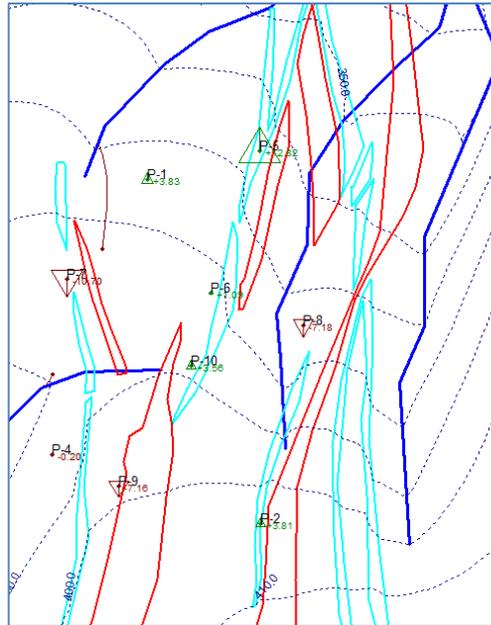


Рисунок 2.2.8 – Вариант 4. Модельная карта гидроизогипс при задании даек (зеленые линии) и зон повышенной трещиноватости (красные линии). Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

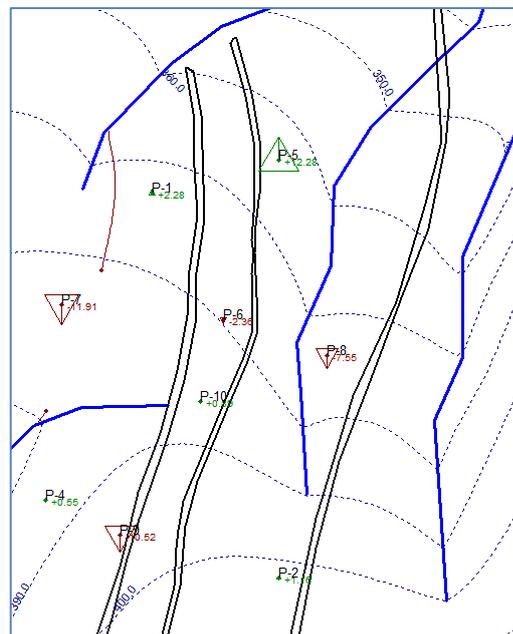


Рисунок 2.2.9 – Вариант 5. Модельная карта гидроизогипс при задании разломов (черные линии). Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

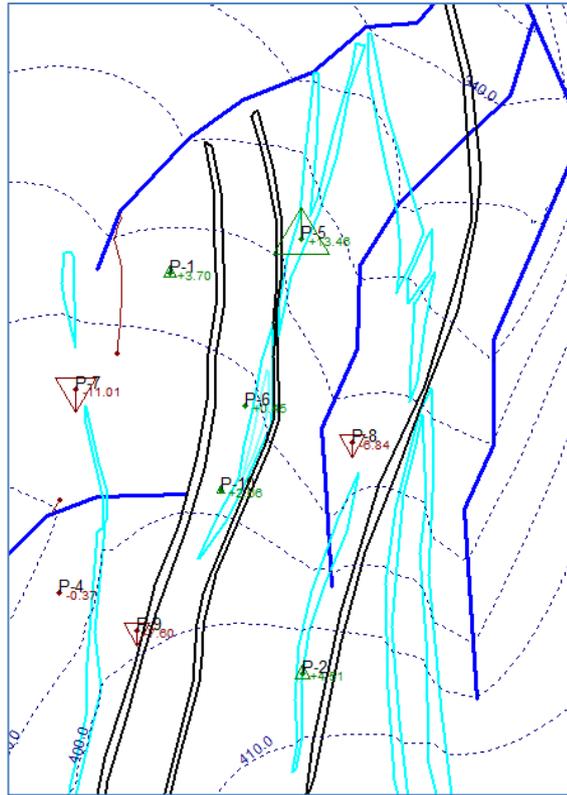


Рисунок 2.2.10 – Вариант 6. Модельная карта гидроизогипс при задании даек (зеленые линии) и разломов (черные линии). Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

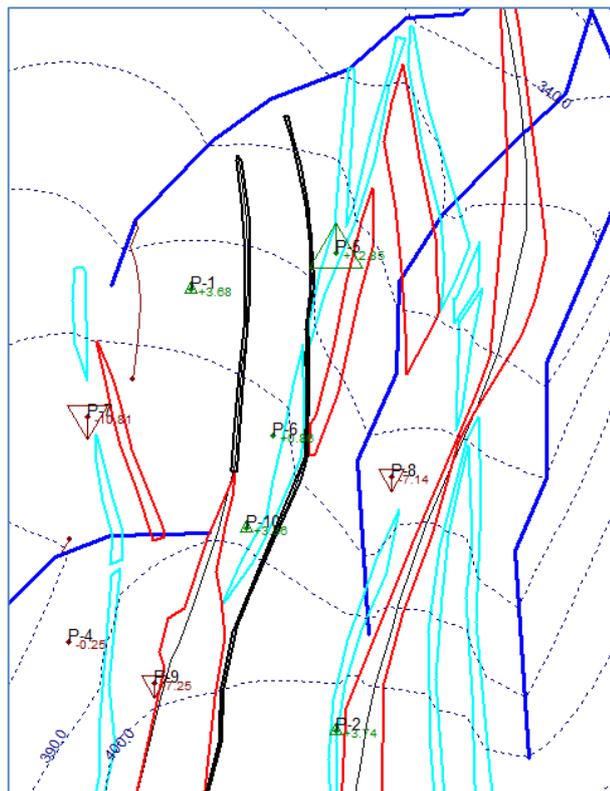


Рисунок 2.2.11 – Вариант 7. Модельная карта гидроизогипс при задании даек (зеленые линии), зон повышенной трещиноватости (красные линии) и разломов (черные линии).

Синие линии – водотоки. Треугольниками показано соответствие фактических и модельных данных

### 2.3 Разработка профильной модели переноса радионуклидов в трещиноватой среде учитывающей основные структурные элементы горного отвода

Описание гидрогеологических условий дано на основании выполненных гидрогеологических изысканий [39, 33, 31]. Гидрогеологические условия проектируемого ПГЗРО характеризуются отсутствием регионально выдержанных структур относительно водоносных горизонтов. На основании ранее выполненных работ, можно выделить основные гидрогеологические подразделения:

- Обводненный горизонт четвертичных отложений;
- Трещинные грунтовые воды коренных пород;
- Нижнеархейская водонепроницаемая зона.

Четвертичные отложения представлены песками, супесями и суглинками, средняя мощность которых около 10 м. Питание горизонта происходит в основном за счет атмосферных осадков. Разгрузка происходит в реки и небольшие ручьи в виде поверхностного и подземного стока, а также в подстилающие отложения. Коэффициенты фильтрации обводненного горизонта четвертичных отложений характеризуются как слабоводопроницаемые грунты.

Породы, приуроченные к трещинно-грунтовым водам, можно охарактеризовать большим количеством трещин. По опытно-фильтрационным работам коэффициенты фильтрации могут изменяться на несколько порядков, в основном это зависит от степени трещиноватости горных пород.

Нижнеархейская водонепроницаемая зона представляет собой переслаивание плагиогнейсов, гнейсов, кристаллических сланцев. Коэффициенты фильтрации имеют большой разброс по всему участку, где происходило изучение, но в целом породы можно классифицировать как водонепроницаемые. В основном породы обладают низким значением активной пористости, которое составляет в среднем 0.33%.

Стоит отметить, что на участке предполагаемого ПГЗРО были проведены поинтервальные с шагом 50 м опробования. В пределах участка «Енисейский» обнаруживается сложное знакопеременное распределение скоростей фильтрации в

вертикальном направлении, что вызывает большие вопросы о структуре потока подземных вод.

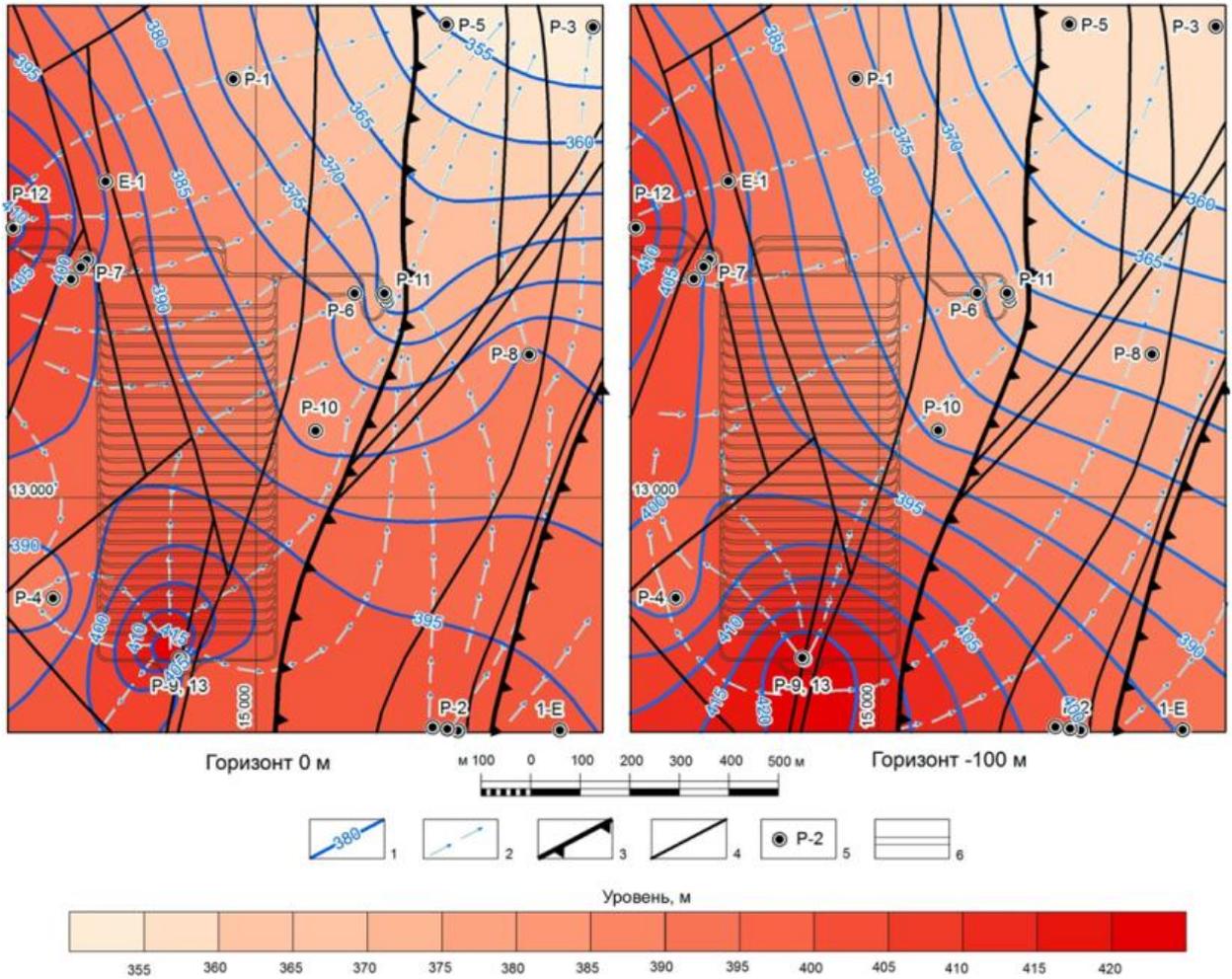
В районе площадки ПИЛ на водотоках Шумиха, Безымянный, Меркурьев и Байкал оборудованы гидрологические посты, на которых проводятся регулярные замеры расходов и уровней. Там же производят отбор проб на химический анализ.

Структура геофильтрационного потока на участке «Енисейский» в основном определяется наличием разрывных нарушений. Они могут быть заполнены различным минеральным составом, с разной апертурой, положением, мощностью, интенсивностью дробления, что приводит к очень сложному распределению напоров по глубине, а также интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ.

На основании ранее выполненных исследований по участку «Енисейский» можно выделить основные закономерности, которые сформировались на сегодня. С точки зрения региональной гидродинамики одной из зон разгрузки может являться р. Енисей. С другой стороны, существуют локальные места разгрузки. Наиболее точно ответить на этот вопрос помогут дополнительные исследования участка «Енисейский». Однако на сегодня общее направление движения подземных вод для различных абсолютных отметок просматривается на северо-восток к реке Шумиха, на рисунке 2.3.1 приведена схема гидроизопьез для целевого горизонта. Изолинии напоров были построены по данным замеров, полученных при поинтервальных испытаниях. На рисунке 2.3.3 можно наблюдать наличие восходящего потока. Фильтрационный поток подземных вод в пределах гидрогеологического массива связан в основном с течением по трещинам, а их латеральное движение на горизонте 0 м осуществляется в направлении на северо-северо-восток, в сторону местной дрены р. Шумиха.

В целом, с гидрогеологической точки зрения, массив кристаллических пород участка «Енисейский» можно охарактеризовать небольшими значениями градиента напора как по горизонтали, так и по вертикали. Существование на сегодня различных предпосылок относительно действительного направления движения подземных вод в пространстве вызывает некоторые неопределенности. Это обусловлено, в первую очередь, качеством данных, полученных в ходе опытно-фильтрационных работ, методикой проведения данных исследований и другими причинами, которые, так или иначе, повлияли на полученный результат. В целом результаты ОФР говорят об отсутствии гидравлической связи предполагаемого уровня размещения РАО с дневной поверхностью. Однако такая связь может проявиться по какой-либо отдельной системе трещин в процессе эксплуатации подземного сооружения, поэтому стоит запланировать фильтрационные эксперименты для тех крупных трещинных систем, которые могут иметь связь с дневной поверхностью. На

больших глубинах были обнаружены участки гидроксидов железа, что требует внимательного изучения фильтрационного потока на участке «Енисейский» [32].



1 – гидроизопъезы, м; 2 – линии тока подземных вод; 3-4 – разрывные нарушения на горизонте -70 м главные (3) и второстепенные (4); 5 – буровые скважины и их номера; 6 – контур проектируемого сооружения ПГЗРО на горизонтах +5 и -70 м

Рисунок 2.3.1 – Схема гидроизопъез на горизонтах 0 и -100 м

Сложная гидродинамическая структура потока подземных вод не может быть описана единой моделью, содержащей стандартный набор фильтрационных параметров. Для обоснования границ трехмерной модели и правильной схематизации необходимым условием является учет области питания в районе участка «Енисейский», а также область разгрузки. Учитывая тот факт, что массив относится к зоне интенсивного водообмена, и разделён на систему отдельных бассейнов, совпадающих с водосборными площадями рек и ручьёв, а питание, транзит и разгрузка подземных вод осуществляются в пределах этих отдельных бассейнов, необходимо проводить гидрологические исследования, в том числе и за пределами участка «Енисейский», для составления наиболее корректной трехмерной модели. Учитывая тот факт, что подземные воды разгружаются в речные долины,

необходимо учитывать их геометрические и фильтрационные характеристики, литологический состав донных отложений для каждой из потенциальных зон разгрузки. На сегодня такие данные существуют не в полном объеме, что вызывает затруднения для корректного построения трехмерной геофильтрационной модели.

Единый непрерывный поток подземных вод в недрах массива, по-видимому, отсутствует. То есть, инфильтрационные воды, поступающие на глубинный интервал по относительно раскрытой трещинной системе, перераспределяются в соседние интервалы по другим трещинам.

### 2.3.1 Обоснование модели распространения радионуклидов в профильной постановке

В данном разделе рассматривается задача параметризации профильной модели фильтрации в неоднородной геологической среде на основе данных геологических исследований потенциального участка размещения пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Для калибровки этой модели применен гибридный эвристический алгоритм, реализованный в программном комплексе MOUSE [40, 41]. Данный алгоритм был выбран потому, что он сочетает преимущества двух хорошо зарекомендовавших себя в различных областях эвристических оптимизационных методов – Cuckoo search [42] и Harmony search [43].

Рассматриваемая в данной работе геофильтрационная схематизация была основана на геологическом разрезе (рисунки 2.3.2, 2.3.3), построенном по данным паспортов скважин [33]. В моделируемой среде было выделено несколько элементов геологического строения, обладающих различными фильтрационными свойствами. В процессе калибровки модели коэффициенты фильтрации варьировались в заранее заданных диапазонах. Диапазоны были выбраны в соответствии с данными, которые были получены в ходе опытно-фильтрационных работ.

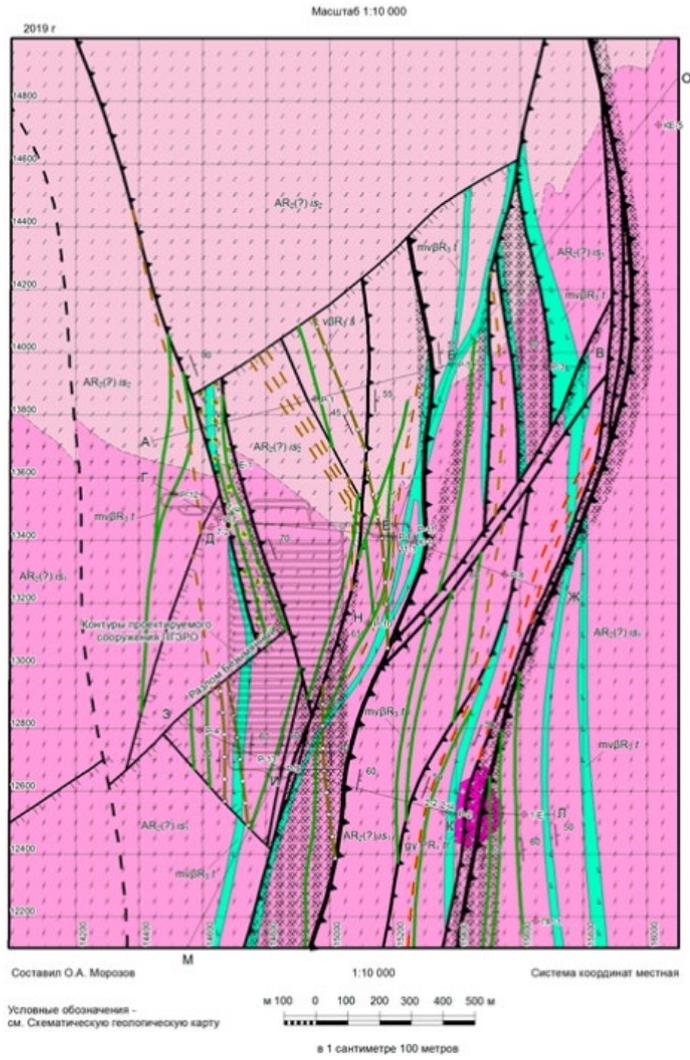


Рисунок 2.3.2 – Схема геологического строения площадки размещения ПГЗРО на участке «Енисейский на горизонте -70 м. Условные обозначения см. рисунок 2.1.3.

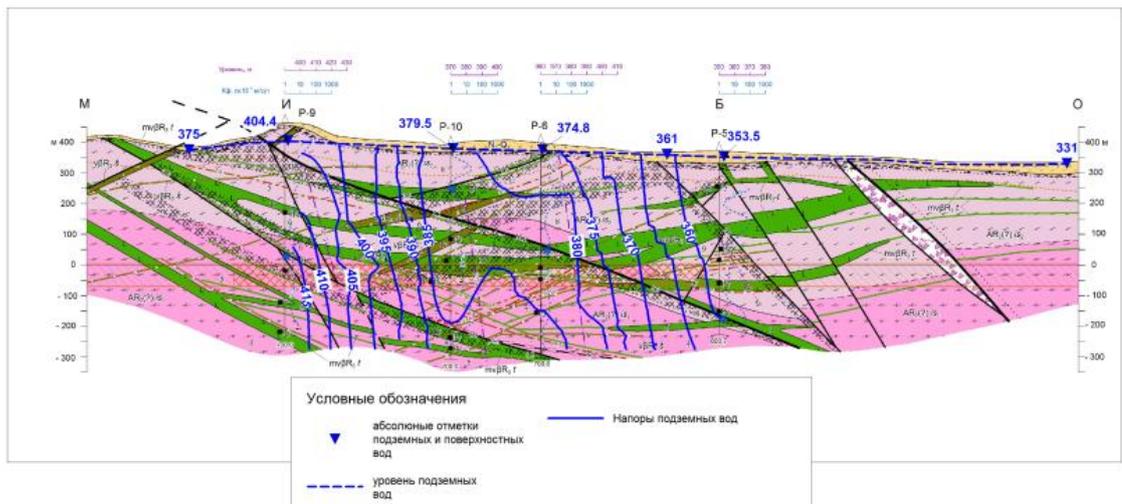


Рисунок 2.3.3 – Гидрогеологический разрез по линии М-О. Условные обозначения см. рисунок 2.1.3.

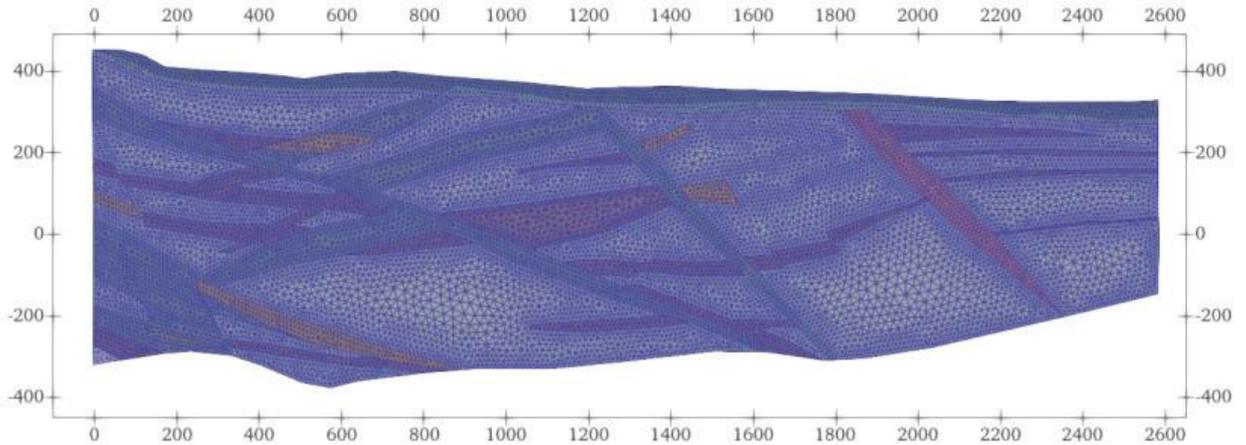


Рисунок 2.3.4 – Сетка расчетной области для профильной модели дальней зоны

В ходе моделирования численно решалась стационарная задача напорной фильтрации. Уравнение напорной фильтрации описывается законом сохранения массы (уравнением неразрывности):

$$\nabla \cdot \vec{u} = Q,$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости фильтрационного потока, определяемый законом Дарси:

$$\vec{u} = -K \nabla h.$$

Здесь  $h$  – напор;  $Q$  – источники и стоки;  $K$  – коэффициент фильтрации.

Для решения фильтрационной задачи использовалась схема метода конечных объемов с двухточечной аппроксимацией потока, расчеты выполнялись при помощи кода для геофильтрационного и геомиграционного моделирования GeRa [44].

В качестве наблюдений для калибровки геофильтрационной модели использовались данные поинтервальных откачек по четырем скважинам (35 значений напоров – уровней подземных вод [м]).

Граничные условия для модели задавались следующим образом:

- правая граница была проведена по линиям тока, замыкающимся на водотоке первого порядка р. Шумиха, линии тока с гидродинамической точки зрения являются непроницаемыми границами второго рода;
- нижней границе модели соответствовало условие II рода с нулевым расходом (непроницаемая), в связи с тем, что породы, которые залегают на глубине 700 метров от устья скважин, непроницаемы;
- на верхней границе задавалось инфильтрационное питание  $10^{-5}$  м/сут;

— левая граница соответствовала расходу для каждого из элементов геологического строения, которые также варьировались в процессе калибровки.

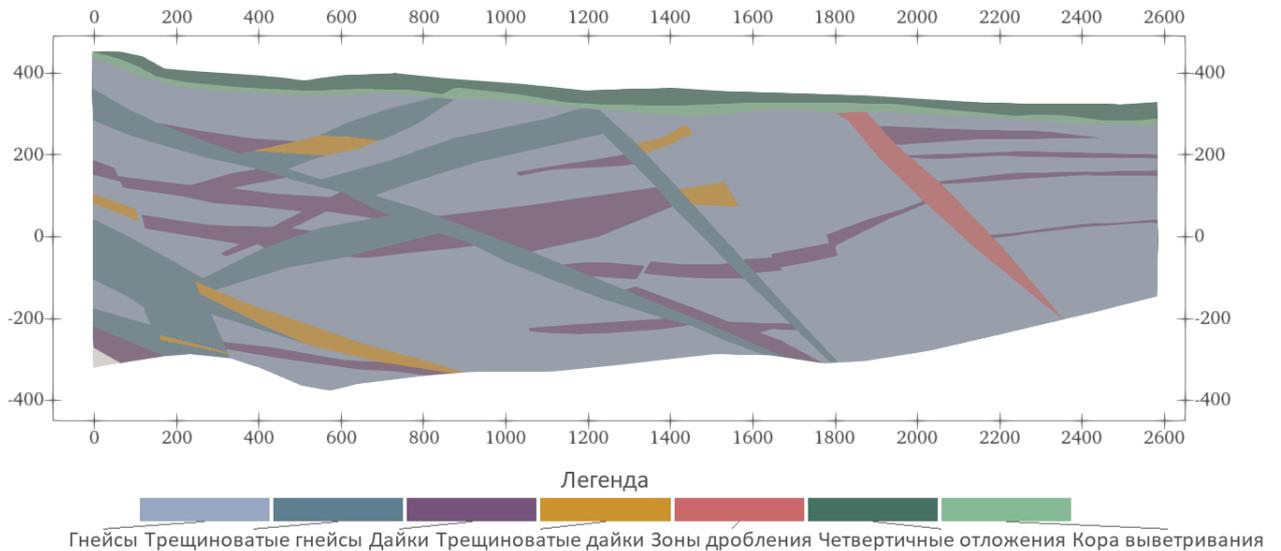


Рисунок 2.3.5 – Профильная модель дальней зоны

### 2.3.2 Результаты миграционных расчетов

Ниже приведены результаты моделирования профильной модели фильтрации и массопереноса. На профильной модели, в отличие от плановой, можно учесть неоднородность в плане и разрезе, изменение напоров по вертикали. Важно только, чтобы профильная модель была ориентирована вдоль основного направления потока подземных вод. В соответствии с изложенными выше данными такое направление - северо-северо-восток.

Гидрогеологической основой профильной модели был разрез, приведенный на рисунке 2.3.5. На основе анализа опытно-фильтрационных работ были выделены 7 элементов геологического строения, имеющих различные фильтрационные свойства. Это четвертичные отложения, кора выветривания, дайки среднетрещиноватые, дайки монолитные, гнейсы сильнотрещиноватые, гнейсы монолитные, зоны дробления.

В ходе моделирования численно решалась стационарная задача напорной фильтрации.

Также рассматривался альтернативный вариант учета граничного условия. Так, на левой границе задавалось условие 2-го рода каждого гидрогеологического подразделения (горизонт четвертичных отложений, водоносная зона архейских пород, водонепроницаемая

зона архейских пород). Для каждого из соответствующих горизонтов задавался и варьировался в процессе калибровки свой расход.

Неопределенные и, соответственно, варьировавшиеся в процессе калибровки параметры модели приведены в таблице 2.3. Диапазоны изменения выбирались, исходя из данных исследований и экспертной оценки. В качестве критерия для сравнения модельных решений и, соответственно, минимизируемой целевой функции использовалось среднеквадратичное отклонение 35 значений, рассчитанных напоров от соответствующих значений экспериментальных наблюдений:

$$RMS = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (hm_i - h\phi_i)^2 \right]^{1/2}$$

где  $hm$  и  $h\phi$  – расчетные и фактические напоры, концентрации,  $N$  общее количество наблюдений.

Таблица 2.3 – Диапазоны варьирования параметров и результаты калибровки.

Альтернативные модели		Граничное условие 1-го рода	Граничное условие 2-го рода
Параметр	Диапазон варьирования	Результат калибровки	
Напор на левой границе (м)		(370;420)	
Расход [м <sup>3</sup> /сут]	Горизонт четвертичных отложений	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 1·10 <sup>-2</sup> )	0.00126
	Слабоводоносная зона архейских пород	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 1·10 <sup>-2</sup> )	0.00127
	Водонепроницаемая зона архейских пород	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 1·10 <sup>-2</sup> )	0.000535
Коэффициент фильтрации [м/сут]	Четвертичные отложения	(1,0·10 <sup>-3</sup> – 5,0·10 <sup>-1</sup> )	1.09·10 <sup>-3</sup>
	Кора выветривания	(1,0·10 <sup>-3</sup> – 1)	0,127
	Дайки среднетрещиноватые	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 3,5·10 <sup>-2</sup> )	3.49·10 <sup>-2</sup>
	Дайки монолитные	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 1,0·10 <sup>-2</sup> )	1.87·10 <sup>-6</sup>
	Плагиогнейсы, гнейсы сильнотрещиноватые	(5,0·10 <sup>-3</sup> – 1,0·10 <sup>-1</sup> )	5.04·10 <sup>-3</sup>
	Зоны дробления	(1,0·10 <sup>-2</sup> – 1,0)	0,99
	Гнейсы монолитные	(1,0·10 <sup>-6</sup> – 1,0·10 <sup>-3</sup> )	9.93·10 <sup>-4</sup>

В результате было получено наименьшее значение среднеквадратичного отклонения  $RMS=5,55$  для модели с граничным условием 1-го рода. Анализ полученных значений

(также в табл. 2.3) позволяет сделать следующие выводы. Коэффициенты фильтрации для пород одного петрографического типа с разной степенью трещиноватости существенно отличаются. Это говорит о том, что для построения геофильтрационной модели выделение элементов геологического строения с различными уровнями трещиноватости существенно важно. Также полученные коэффициенты фильтрации позволяют предположить, что дайки с низкой трещиноватостью будут выступать в роли естественных барьеров безопасности. Распределение напоров (цветные изолинии), полученных при решении фильтрационной задачи, приведено на рисунке 2.3.6.

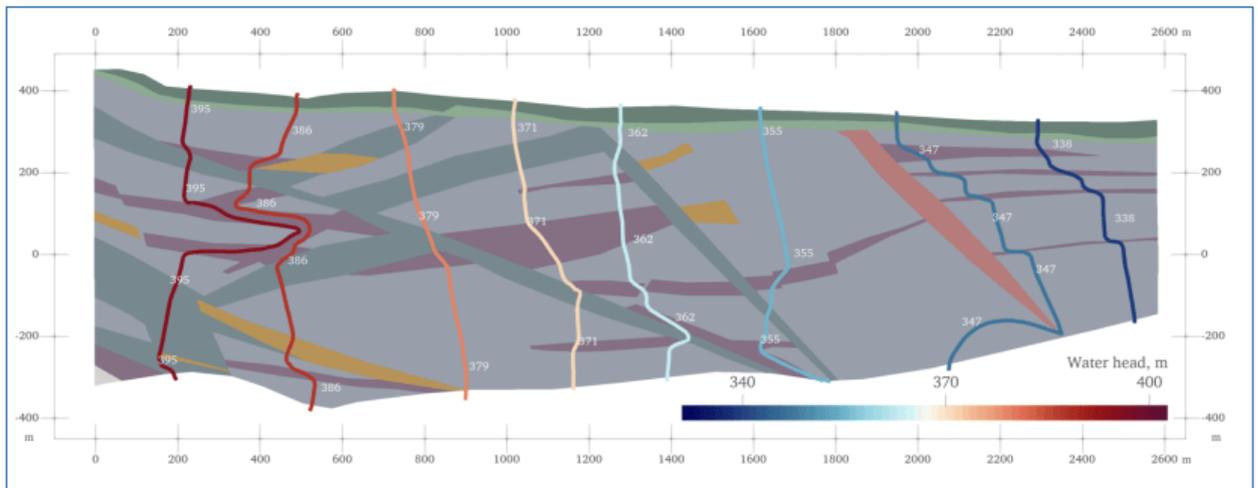


Рисунок 2.3.6 – Распределение напоров, полученное в результате моделирования

В результате решения геофильтрационной задачи можно делать прогнозы по распространению загрязнителя с учетом цепочек радиоактивного распада, адвекции, диффузии, продольной и поперечной дисперсии, а также сорбции по линейной изотерме. Авторы работы [45] утверждают, что параметр продольной дисперсивности можно описать следующим соотношением:

$$\alpha_L = 0.83(\lg L)^{2.414},$$

где  $L$  – расстояние до потенциальной зоны разгрузки.

В настоящей работе величина продольной дисперсивности составила 15.7 м, величина поперечной дисперсивности принимается в 10 раз меньше от продольной, согласно [46].

На основе представленной модели были проведены расчеты миграции консервативного трассера (I-129) на 5, 10 и 20 тыс. лет. Результаты прогнозов в виде ореолов на моменты времени от 5 до 20 тыс. лет даны на рисунке 2.3.7. На рисунке 2.3.8 показан график удельной активности разгрузки в р. Шумиху.

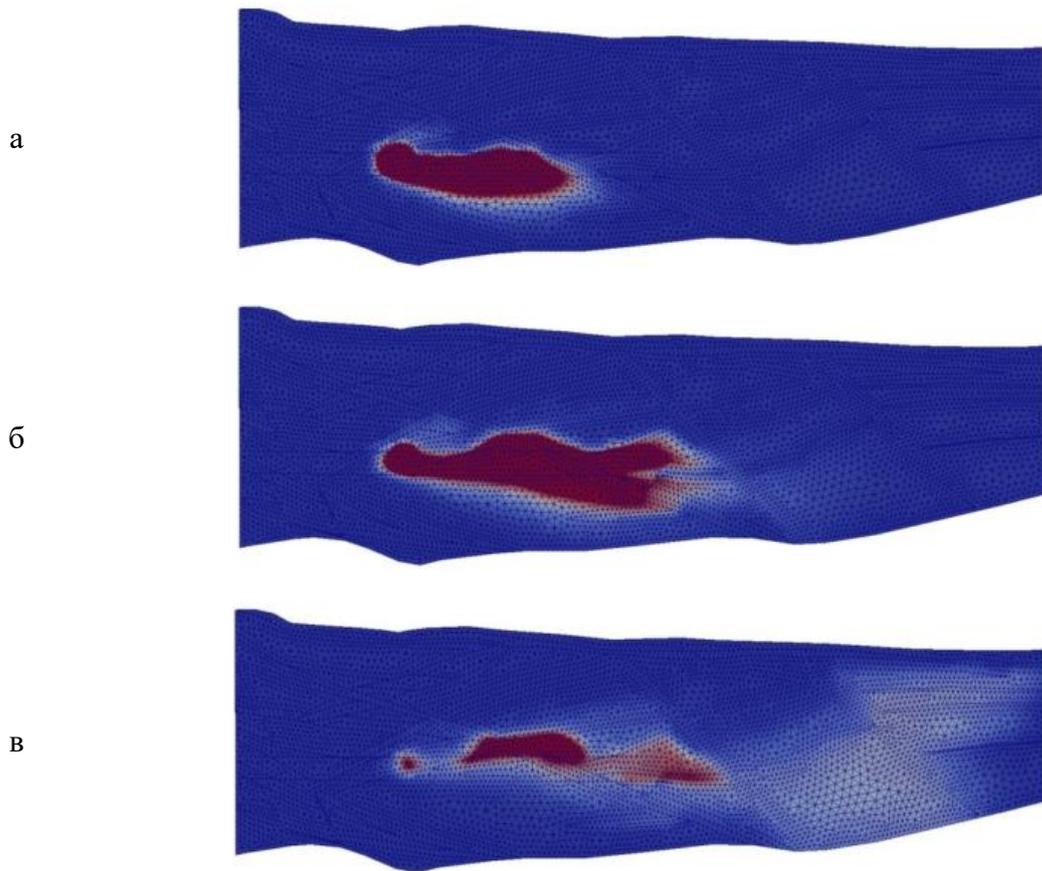


Рисунок 2.3.7 – Распространение консервативного трассера от ПИЛ за 5 тыс. лет (а), 10 тыс. лет (б), 20 тыс. лет (в)

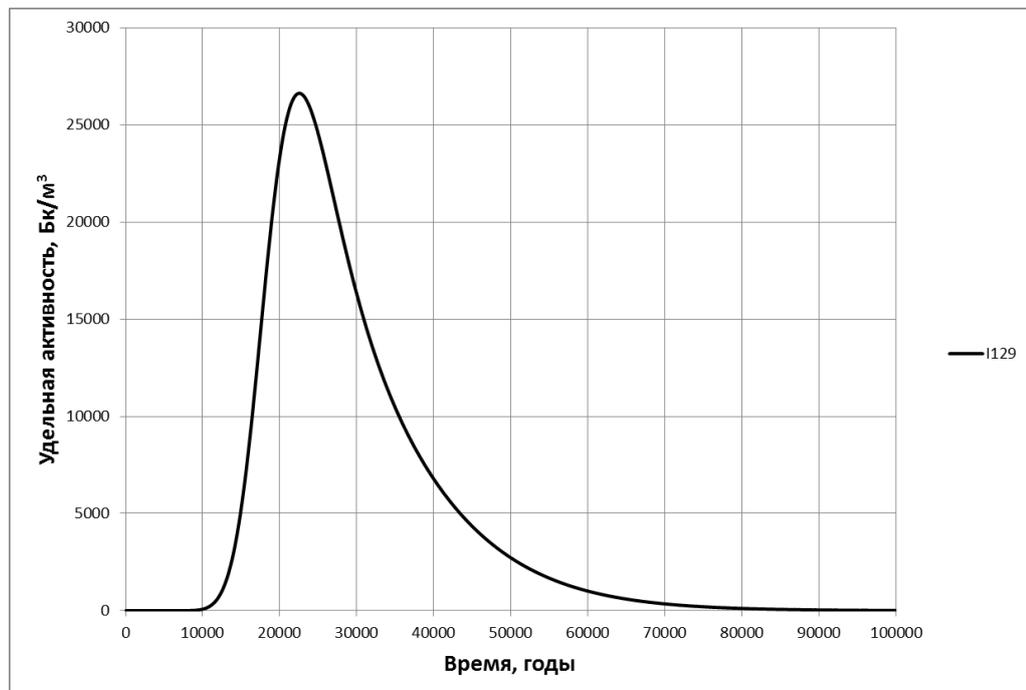


Рисунок 2.3.8 – Прогнозная удельная активность  $^{129}\text{I}$  в зоне разгрузки в р. Шумиху

Согласно приведенным выше результатам, миграция консервативного трассера  $^{129}\text{I}$  от ПИЛ к реке Шумиха составляет около 22500 лет. Для сорбируемых компонентов время миграции увеличивается соответственно фактору задержки.

### **3 Обработка и интерпретация результатов кустовой откачки из несовершенных скважин с использованием трехмерного моделирования**

Опытно-фильтрационные работы играют важную роль для определения фильтрационных параметров водоносных горизонтов. Стандартная методика оценки параметров по ОФР основана на модели Тейса [47]. Эта модель была получена на основе допущений, что откачивающая скважина совершенна, с нулевым радиусом, в стволе не происходит накопления воды, и потеря напора через фильтр скважины незначительная. На практике это не соответствует реальной ситуации. К тому же на начальном этапе проведения откачки масса воды поступает не из водоносного горизонта, а из объема, первоначально находящегося в обсадной колонне скважины [48]. Интерпретация этих работ не всегда однозначна, имеет некоторые ограничения и в связи с этим требует комплексного подхода. [Equation Chapter 3 Section 1](#)

В сложных гидрогеологических условиях интерпретация откачек вызывает определенные трудности, связанные со сложностью идентификации расчетной схемы, что обусловлено анизотропным строением толщи и различным характером режима фильтрации [49].

В скальных породах процесс обработки откачек усложняется. Встаёт вопрос, как задавать трещины на модели и как влияет их геометрия на результаты обработки. В работе [50] было представлено полуаналитическое решение для откачки из водоносного горизонта, представленного наклонной зоной, повышенной трещиноватости, окруженной слабопроницаемыми породами. Было обнаружено, что понижение уровня подземных вод в скважине прямо пропорционально зависит от угла наклона водоносного горизонта на начальном этапе откачки, и почти не зависит на поздних этапах. Фильтрационные свойства слабопроницаемых пород (матриц) имеют сильное влияние на изменение их уровня на поздних этапах откачки.

Для определения фильтрационных параметров была проведена графоаналитическая обработка 2 кустовых откачек, выполненных в 2011 году из скважин, расположенных на территории площадки (куст 1: 2Ц, Р-2, 2-2 и куст 2: 7Ц, Р-7, 7-2). Работы проводились на участке «Енисейский». Для оценки параметров структурных элементов были построены трехмерные модели в пределах участков кустовых откачек, где проводились опытно-фильтрационные работы.

### 3.1 Описание участка проведения опытно-фильтрационных работ

Выбор схемы фильтрации для интерпретации ОФР целесообразно проводить с использованием диагностических графиков  $S-t$  и  $dS(t)/D \ln(t)$ . В настоящее время в нефтяной литературе такой подход широко используется, в качестве примера диагностические графики для трех схем даны ниже рисунок 3.1.1.

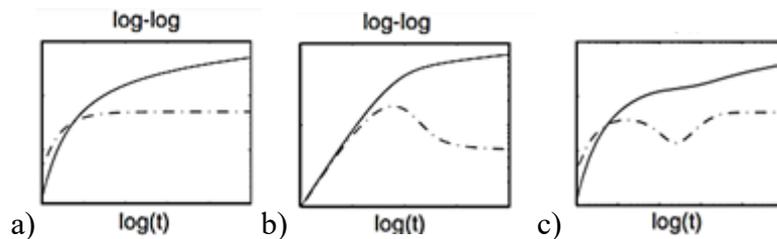


Рисунок 3.1.1 – Примеры диагностических графиков. Сплошная линия –  $S-t$ , пунктир –  $dS(t)/d \ln(t)$ . Напорный однородный горизонт (схема Тейса), b – влияние емкости ствола скважины, c – влияние двойной пористости (зоны разрывных нарушений)

На ходе диагностических графиков при проведении ОФР в реальных условиях отражается много факторов. Так, на диагностических графиках центральной скважины 7ц можно увидеть роль емкости ствола скважины и двух систем разрывных нарушений рисунок 3.1.2.

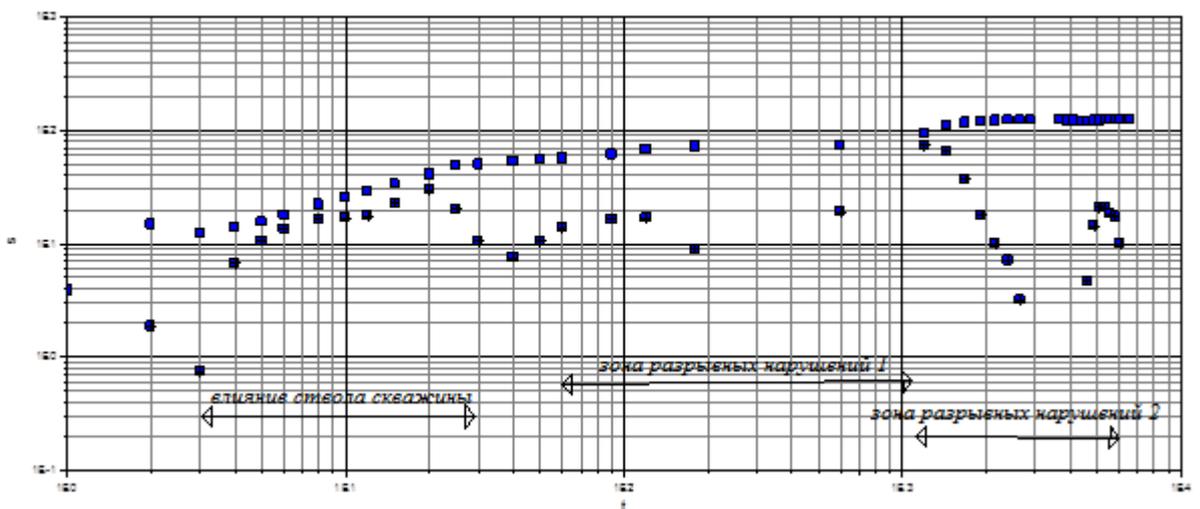


Рисунок 3.1.2 – Диагностические графики при откачке из скважины 7ц. Голубые квадратики  $S-t$ , синие  $dS(t)/d \ln(t)$

Для интерпретации откачки в таких условиях необходимо использовать численное моделирование.

Фильтрационные свойства водовмещающей среды в районе участка «Енисейский» во многом определяются трещиноватостью, связанной с основными структурными

элементами: разрывными нарушениями (представленными преимущественно зонами дробления) и дайками.

АО «Красноярскгеология» на участке «Енисейский» проводила опытно-фильтрационные работы. Эти данные были использованы для 3 главы диссертационного исследования. В ходе работ были выполнены опытные откачки на специально подготовленных двух однолучевых кустах скважин: 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2. Центральные скважины 2Ц и 7Ц и наблюдательные 7-2 и 2-2 несовершенные по степени вскрытия пласта, а наблюдательные скважины Р-2 и Р-7 совершенные. Стоит отметить, что существует разделение по степени вскрытия водоносного горизонта. Вертикальные скважины подразделяются на совершенные и несовершенные – в зависимости от того, полностью или частично они вскрывают водоносный горизонт своей рабочей частью (фильтром) [51]. Откачки выполнены с помощью погружного насоса ЭЦВ-4, опущенного на глубину 184 м. Расстояние между скважинами, дебит, ход двух откачек и основные данные по скважинам приведены в таблице 3.1 и на рисунке 3.1.3.

Для интерпретации ОФР использовались как центральные, так и наблюдательные скважины, в которых происходили изменения уровня подземных вод. Данные полученные по наблюдательным скважинам 7-2 и 2-2 не обрабатывались, так как во время откачки изменений уровня подземных вод в них не наблюдалось.

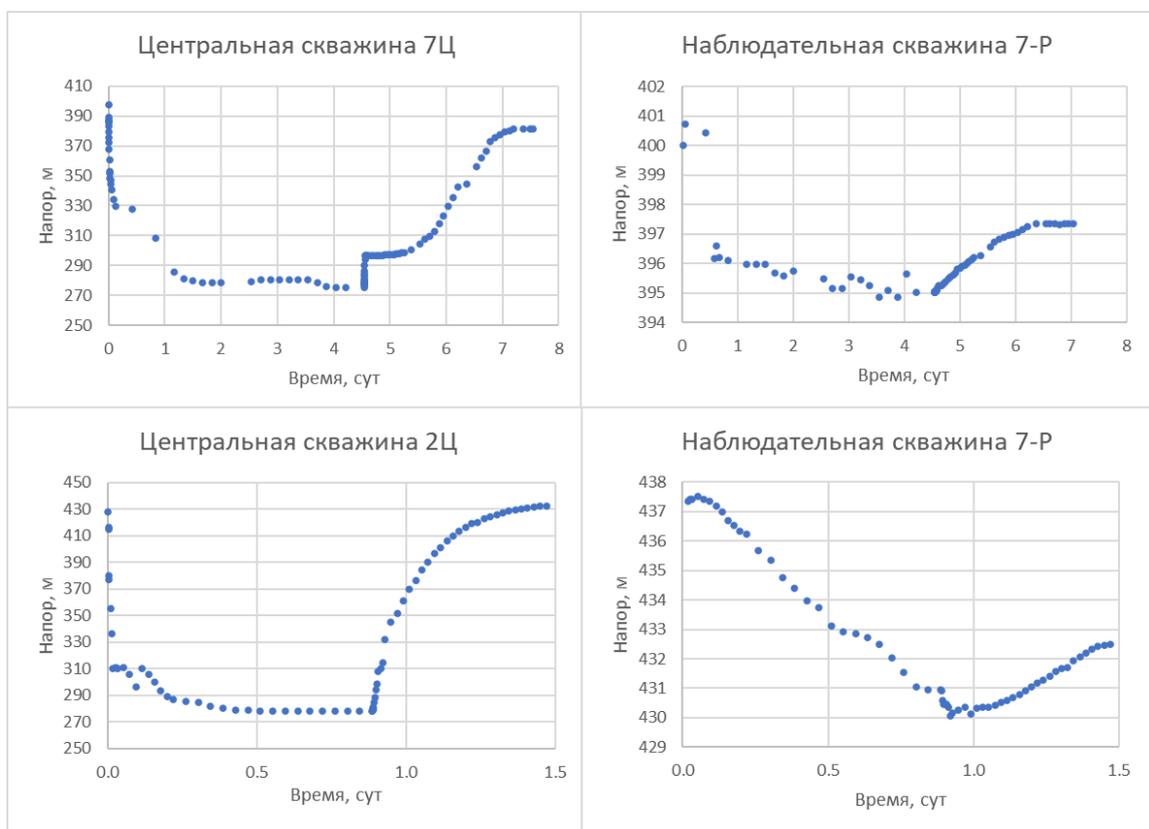


Рисунок 3.1.3 – Ход кустовых откачек 7Ц – 7-Р и 2Ц – 2-Р (по данным АО «Красноярскгеология» [33, 31])

Таблица 3.1 – Основные данные по скважинам кустовых откачек (по данным АО «Красноярскгеология» [33]).

№ скважины	Расстояние от центральной скважины, м	Глубина скважины, м	Интервал опробования, от-до, м	Мощность зоны трещиноватости, м	Нст, м	Данные опробования			
						Способ опробования	Продолжительность, час	Дебит, Q, м <sup>3</sup> /сут	Понижение S, м
2Ц	0	200	8.4-200	191.6	8.4	центральная скважина	22	9.5	159.8
2-Р	22.6	700	47.9-700	652.1	47.9	набл.			6.58
2-2	31.8	200	7-200	193	7.05	набл.	24		0.19
7Ц	0	200	16.3-200	183.7	16.3	центральная скважина	109	6.8	126.04
7-Р	19.5	700	21.7-700	678.3	21.7	набл.			4.98
7-2	31.3	200	12-200	188	12.03	набл.			0

### 3.2 Аналитическая обработка результатов опытно-фильтрационных работ

Для определения фильтрационных параметров выполнена графоаналитическая обработка двух кустовых откачек из скважин 2Ц и 7Ц. Обработка производилась по схеме Тейса для изолированного напорного однородного пласта, неограниченного в плане, с одной опытной скважиной и с постоянным расходом. Для обработки были построены полулогарифмические графики временного прослеживания понижения ( $S$ , м) и восстановления уровня подземных вод от устья скважины ( $S'$ , м) на рисунках 3.2.1, 3.2.2 ( $S$  – понижение уровня подземных вод до момента выключения насоса,  $S'$  – повышение уровня подземных вод после выключения насоса).

Графики изменения уровня были аппроксимированы уравнением прямой линии по формулам 1-3. Аппроксимация производилась вручную. При этом на экспериментальных

графиках выбирались участки, имеющие близкий угловой коэффициент как для откачки, так и для восстановления. Из данных уравнений были использованы угловой коэффициент  $C$  и свободный член  $A$  для расчёта фильтрационных параметров ( $k$  – коэффициент фильтрации (м/сут),  $a$  – пьезопроводность ( $\text{м}^2/\text{сут}$ )), которые приведены в таблице 3.2.

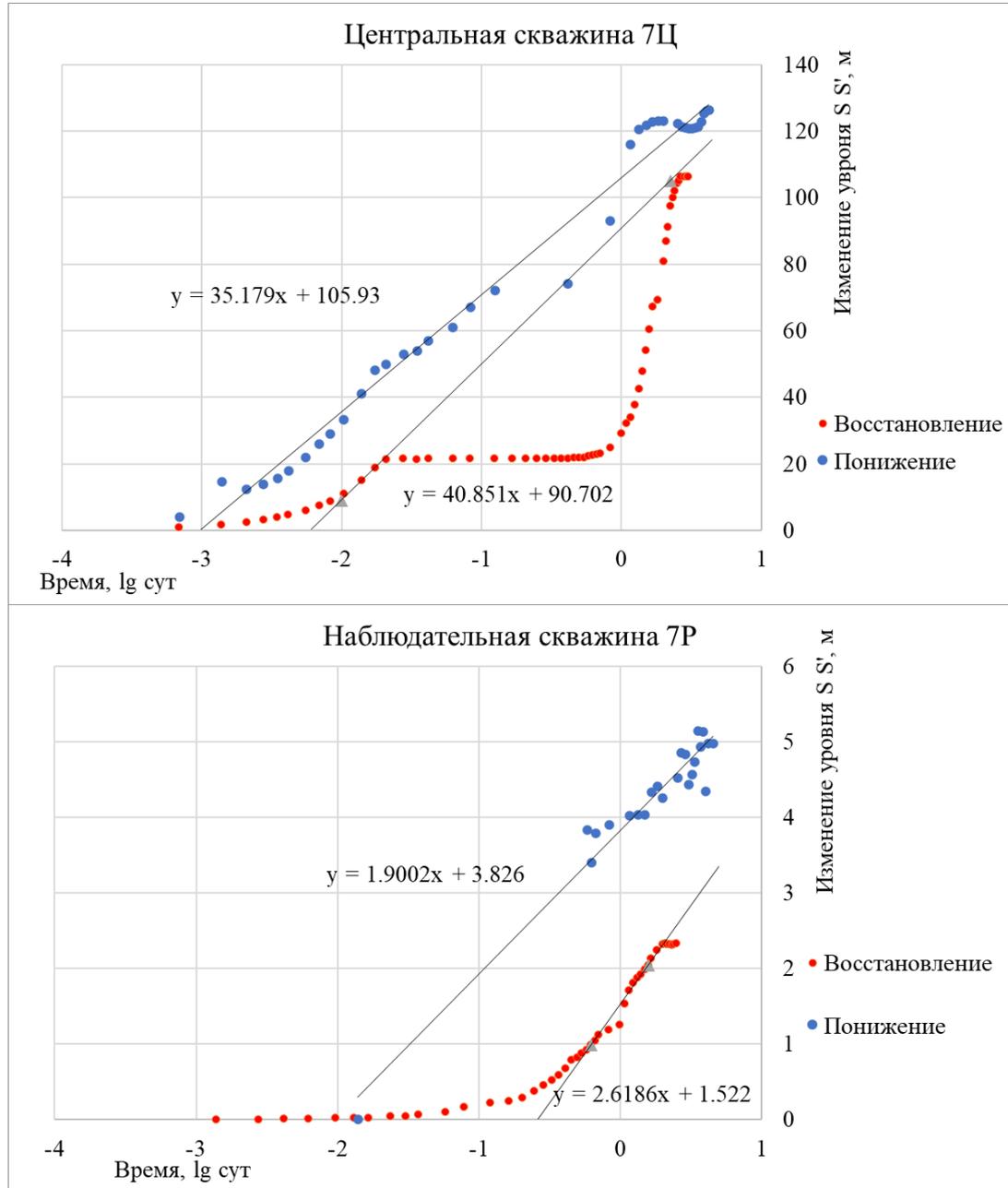


Рисунок 3.2.1 – Графики изменения уровня подземных вод ( $S, S'$ ) для периода понижения и восстановления уровней кустовой откачки по скважинам 7Ц и 7Р.

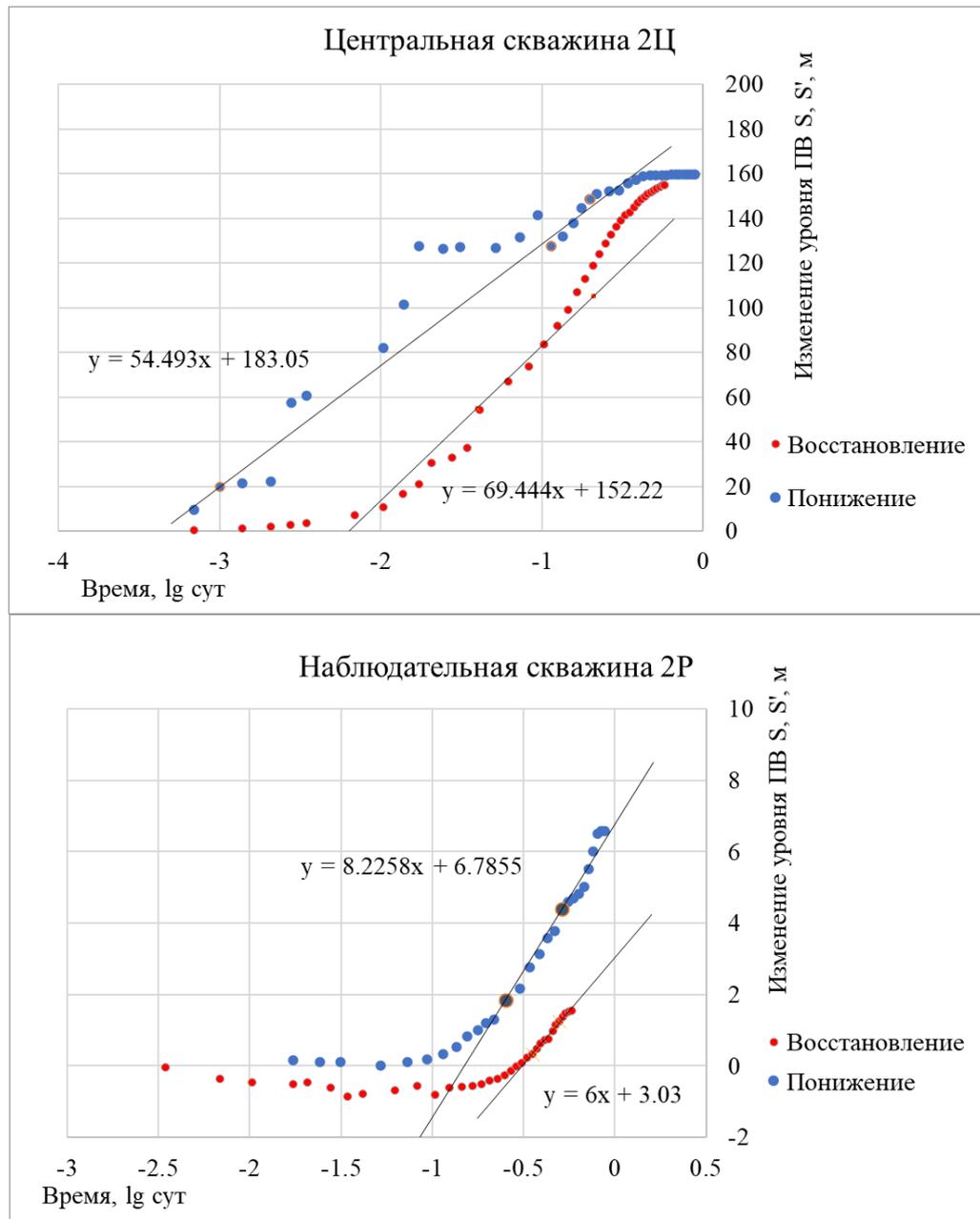


Рисунок 3.2.2 – Графики изменения уровня подземных вод (S, S') для периода понижения и восстановления кустовой откачки по скважинам 2Ц и 2Р.

Таблица 3.2 – Расчёт фильтрационных параметров.

№ скважины	Понижение					Восстановление		
	C	A	T, м <sup>2</sup> /сут	k, м/сут	a, м <sup>2</sup> /сут	C	T, м <sup>2</sup> /сут	k, м/сут
2Ц	54.5		0.03	4.9E-05		69.4	0.03	3.8E-05
2Р	8.2	6.8	0.21	3.2E-04	1525.1	6.0	0.29	4.4E-04
7Ц	35.2		0.04	5.2E-05		40.9	0.03	4.5E-05
7Р	1.9	3.8	0.65	9.7E-04	16900.0	2.6	0.48	7.1E-04

Расчетные формулы:

$$T = \frac{0.183Q}{c} \quad (3.1)$$

$$k = \frac{T}{m} \quad (3.2)$$

$$\lg a = \frac{A}{c} + \lg \frac{r^2}{2.25} \quad (3.3)$$

где  $T$  – проводимость ( $\text{м}^2/\text{сут}$ ),  $Q$  – дебит центральной скважины ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ),  $c$  – угловой коэффициент уравнения аппроксимирующей прямой,  $A$  – свободный член уравнения аппроксимирующей кривой,  $k$  – коэффициент фильтрации ( $\text{м}/\text{сут}$ ),  $m$  – мощность водоносного горизонта,  $a$  – пьезопроводность ( $\text{м}^2/\text{сут}$ ).

Из полученных выше результатов можно сделать следующий вывод: обработка аналитическим способом пригодна только по данным наблюдательных скважин. На графиках наблюдательных скважин выделялись участки, которые подчинялись логарифмической зависимости, что не наблюдалось на графиках центральных скважин. Это объясняется влиянием скин-эффекта центральной скважины, который возникает из-за различия фильтрационных параметров между прискважинной зоной и водовмещающими отложениями водоносного горизонта. Таким образом, за основу необходимо брать результаты, полученные при обработке по наблюдательным скважинам.

Для сравнения в таблице 3.3 приведены результаты, полученные АО «Красноярскгеология». Метод обработки данных не отличался, поэтому различия в результатах незначительные, в пределах погрешности метода обработки.

Полученные значения фильтрационных параметров могут быть использованы для модельной интерпретации ОФР.

Таблица 3.3 – Результаты определения коэффициента фильтрации АО «Красноярскгеология» [33, 31, 31].

№ скважины	Коэффициент фильтрации (к), м/сут		Пьезопроводность (а), м <sup>2</sup> /сут
	Понижение	Восстановление	
7Ц	1.90E-04	1.60E-04	
7Р	1.14E-03	1.18E-03	5.00E+04
2Ц	1.60E-04	1.10E-04	
2Р	3.50E-04	2.30E-04	1620

### 3.3 Разработка трехмерной модели и расчетных результатов

Для оценки параметров структурных элементов были построены трехмерные модели участка «Енисейский» (рис. 3.3.1), где были проведены опытно-фильтрационные работы. В результате смоделированы две кустовые откачки из скважин 7Ц и 2Ц с наблюдательными 7Р и 2Р соответственно. Для моделирования использовалась программа Groundwater Modeling System 10.4 (GMS) [52]. GMS – это комплексная графическая пользовательская среда для моделирования подземных вод. Вся система GMS состоит из графического интерфейса пользователя (программа GMS) и ряда кодов анализа (MODFLOW [53], MT3DMS [54] и т. д.). В данной программе есть необходимый для задания в модели скважин модуль Multi-Node Well (MNW2) [49]. Данный модуль позволяет задавать скважину сразу в несколько ячеек по глубине. С помощью этого модуля можно задавать несовершенные по степени и характеру вскрытия скважины, модельная реализация которых требует подробной вертикальной дискретизации, когда скважина реализуется в нескольких модельных слоях (такой скважиной является центральная скважина). Данный модуль позволяет получить общий (единый) уровень воды в скважине, что делает его пригодным для модельной реализации наблюдательных скважин. Также данный модуль учитывает несовершенство скважины по характеру вскрытия (скин-эффект).

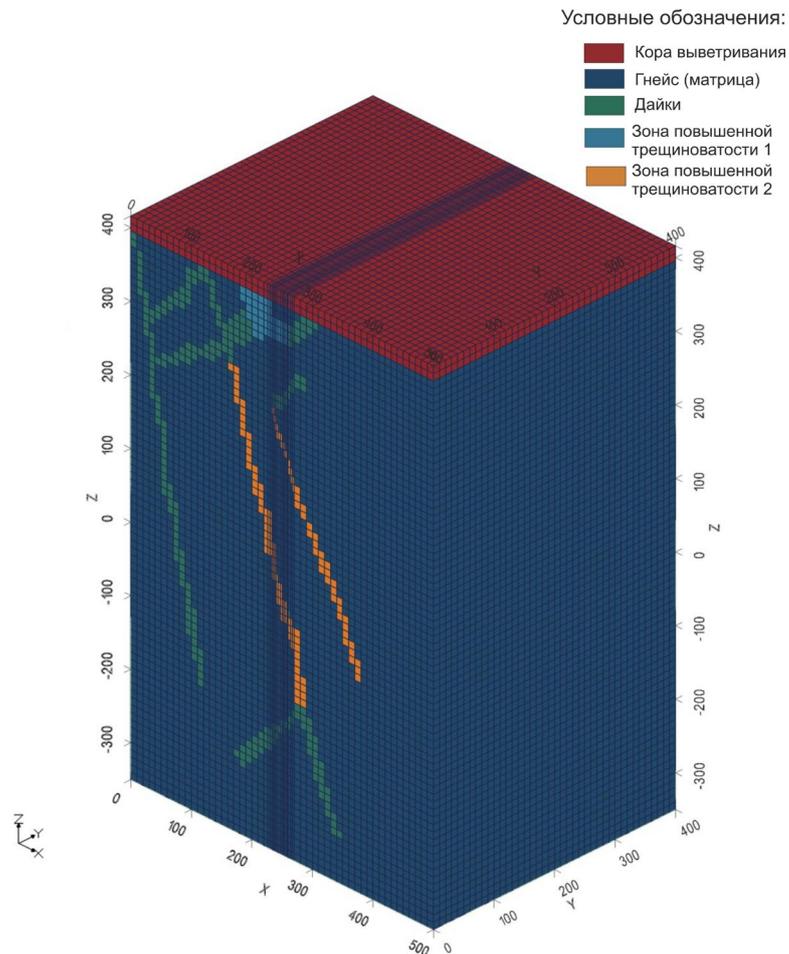
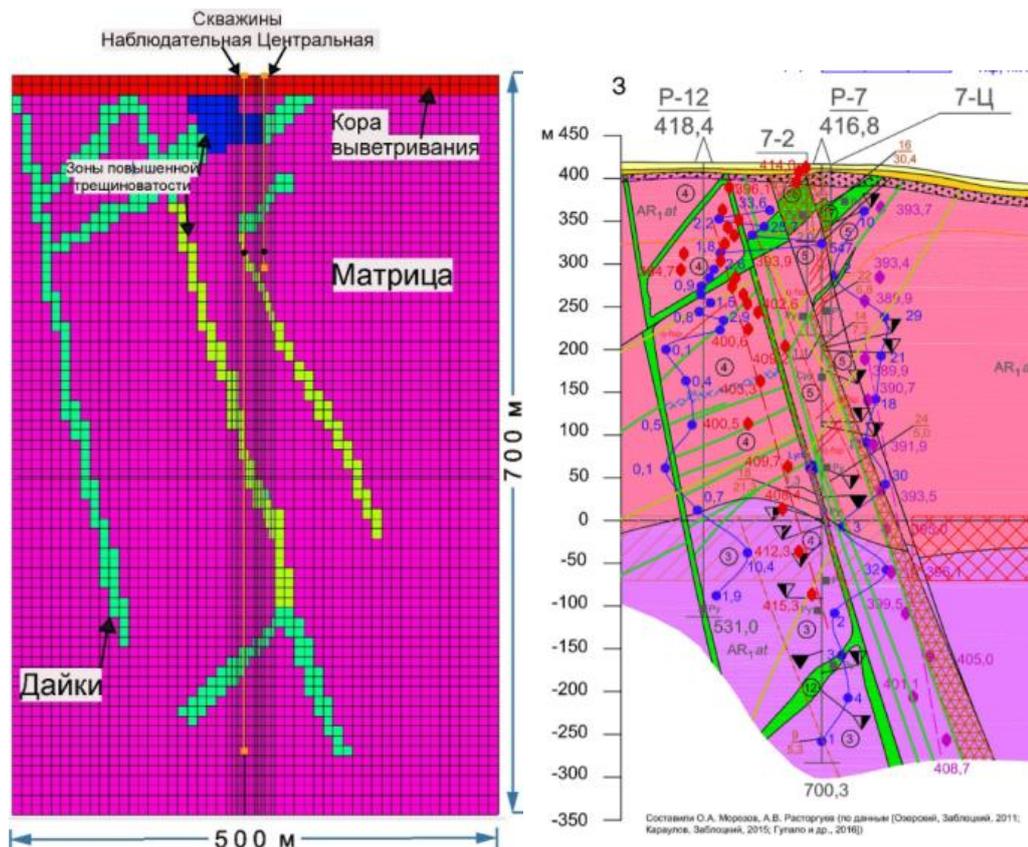


Рисунок 3.3.1 – Трехмерная модель опытной откачки из скважины 7Ц на участке «Енисейский»

Трехмерная модель построена в расчетной области размером 500x500x700 м. Сетка прямоугольная. Размеры ячеек 10x10x10 м со сгущением к скважинам до 1.8x10x10 м. Размер ячеек сетки выбран исходя из необходимости задания на модели геологических элементов, центральных и наблюдательных скважин. Общий вид модели приведен на рисунке 3.3.1. В соответствии с геологическими разрезами, на которых выделены геологические разности, на модели также выделены различные геологические структурные элементы: дайки, зоны повышенной трещиноватости, кора выветривания, гнейсы. Далее по тексту, для обозначения гнейсов будет использоваться термин – матрица (рис. 3.3.2, 3.3.3). Данным элементам в ходе калибровки модели присваивались различные фильтрационные параметры. Границы модели были удалены от скважин на расстояние, превышающее радиус влияния откачки.



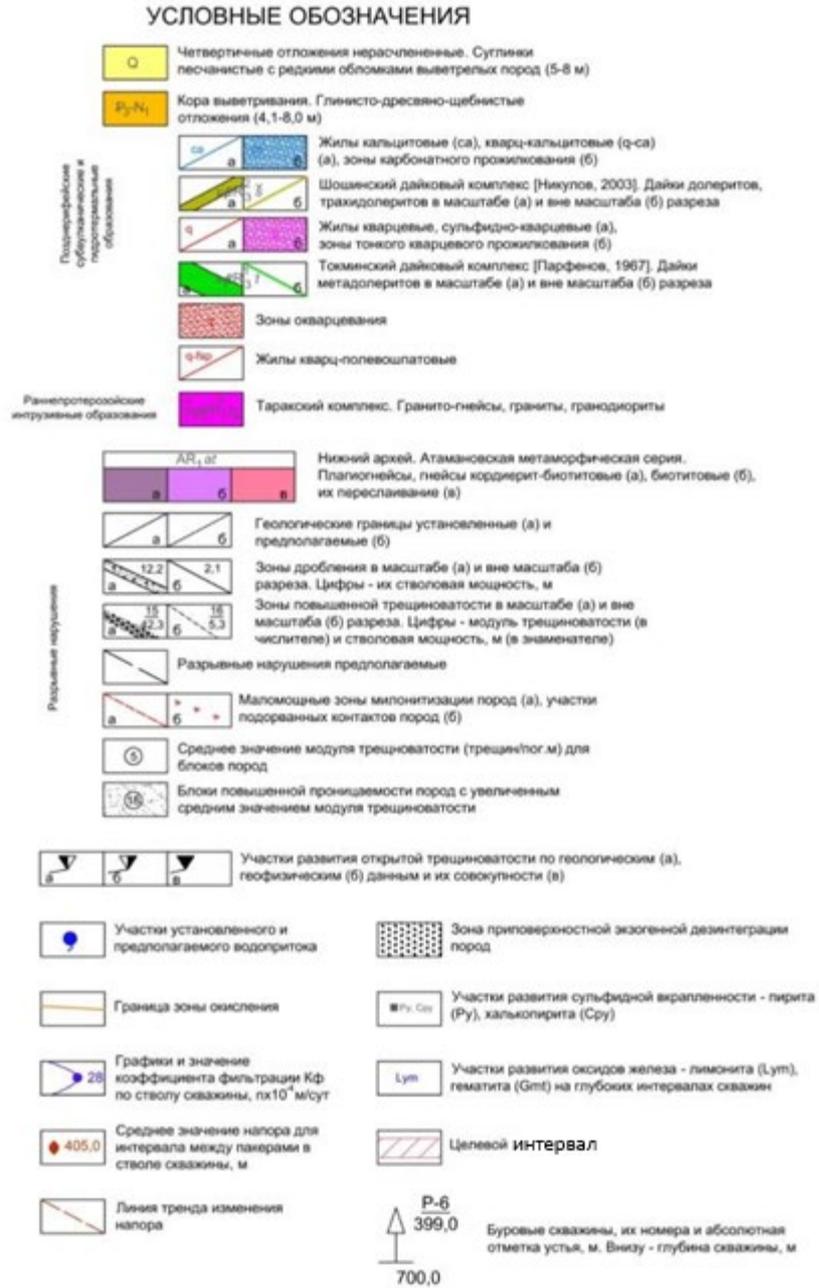


Рисунок 3.3.2 – Разрез трехмерной модели кустовой откачки из скважины 7Ц (слева) и выкопировка геологического разреза по скважинам P12 – P7 – P6 – P11 – P8 (справа) с условными обозначениями, участка «Енисейский» (по данным [31, 32, 34])

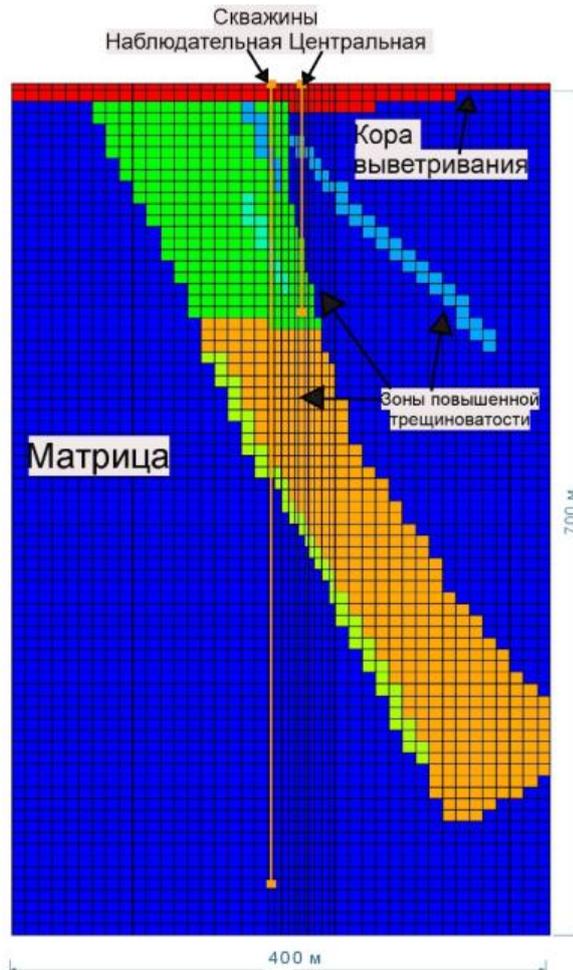


Рисунок 3.3.3 – Разрез трехмерной модели кустовой откачки из скважины 2Ц, участка «Енисейский»

В ходе моделирования и верификации модели с использованием фактических данных, полученных в ходе опытно-фильтрационных работ, можно отметить следующее:

- Положение уровня подземных вод в наблюдательной скважине зависит в большей степени только от емкостных параметров элементов геологического строения, нежели от коэффициента фильтрации. Это связано с тем, что процесс откачки полностью идёт в нестационарном режиме. Поэтому в ходе калибровки удельная водоотдача (*specific storage* – *Ss*) менялась редко, и была установлена в матрице  $10^{-7}$  1/м, потому что только при таких значениях можно было достичь наиболее схожего понижения в наблюдательных скважинах.
- Скин-эффект (коэффициент фильтрации прискважиной зоны) у центральной скважины сильно влияет на понижение уровня подземных вод в ней. На рисунке приведено сравнение понижения уровня подземных вод центральной скважины 7Ц при различных коэффициентах фильтрации прискважинной зоны (рис. 3.4.1). В наблюдательной скважине скин-эффект не влияет на результаты моделирования.

### 3.4 Анализ результатов опытно-фильтрационных работ

По результатам моделирования был установлен набор параметров (табл. 3.4), при котором рассчитанные на модели изменения уровня подземных вод в скважинах при откачке максимально совпадали с наблюдаемыми при проведении кустовых откачек. Скин эффект у наблюдательной скважины был принят 0.1 м/сут, у центральной – 0.00075 м/сут. Наиболее оптимальный вариант сходимости модели с наблюдаемыми данными для кустовых откачек 7Ц и 2Ц приведён ниже на рисунке 3.4.2.

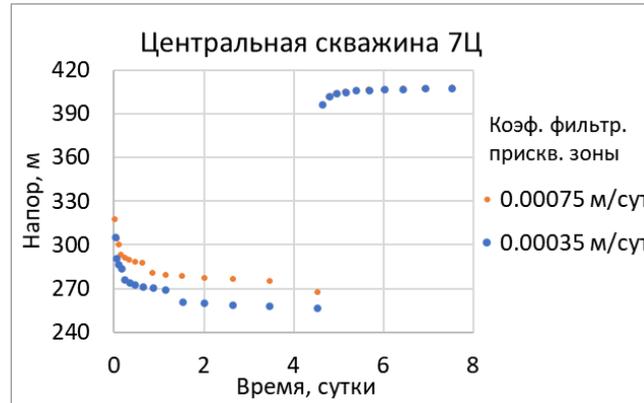


Рисунок 3.4.1 – График временной зависимости напора подземных вод центральной скважины 7Ц в ходе откачки при разных значениях коэффициента фильтрации прискважинной зоны.

Таблица 3.4 – Параметры моделей.

Геологический элемент	Модель куста 2Ц-2Р		Модель куста 7Ц-7Р	
	Коэф. Фильтр. (м/сут)	Удельн. Водоотдача Ss (1/м)	Коэф. Фильтр. (м/сут)	Удельн. Водоотдача Ss (1/м)
Матрица	0.0001	1.00E-07	0.0051	1.00E-07
Зоны повыш. трещиноватости 1	0.005	5.00E-07	0.01	1.00E-07
Зоны повыш. трещиноватости 2	0.0008	1.00E-07	-	-
Дайки	-	-	0.00001	1.00E-07
Кора выветривания	0.005	1.00E-07	0.01	1.00E-07

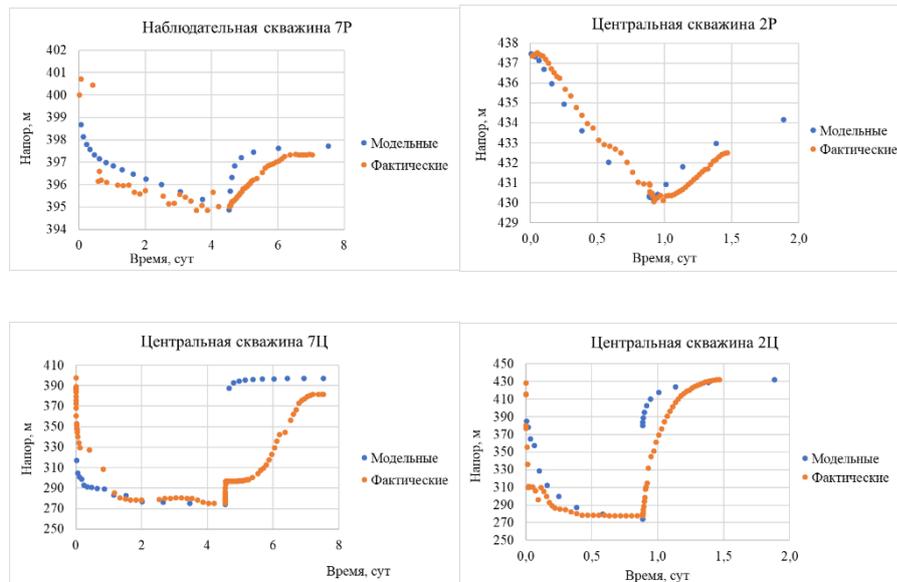


Рисунок 3.4.2 – Сравнение модельных и наблюдаемых понижений уровня подземных вод в кустах скважин 7Ц-7P и 2Ц-2P

Было проведено исследование по влиянию наблюдательной скважины 7P на результаты моделирования. Для этого был построен график зависимости модельного напора в наблюдательной скважине от глубины (рис. 3.4.3). Из рисунка видно, что напор в скважине увеличивается с глубиной. Это говорит о том, что в ней наблюдается восходящий поток подземных вод, который создаёт дополнительную подпитку, подтягивая с глубины некоторое количество воды. На рисунке приведено сравнение динамики изменения уровня подземных вод в центральной скважине при откачке с наблюдательной скважиной и без неё (рис. 3.4.4). При моделировании без наблюдательной скважины понижение на конец откачки увеличивается на 4 м. Таким образом, если не учитывать наблюдательную скважину при моделировании откачки, то коэффициенты фильтрации будут завышены.

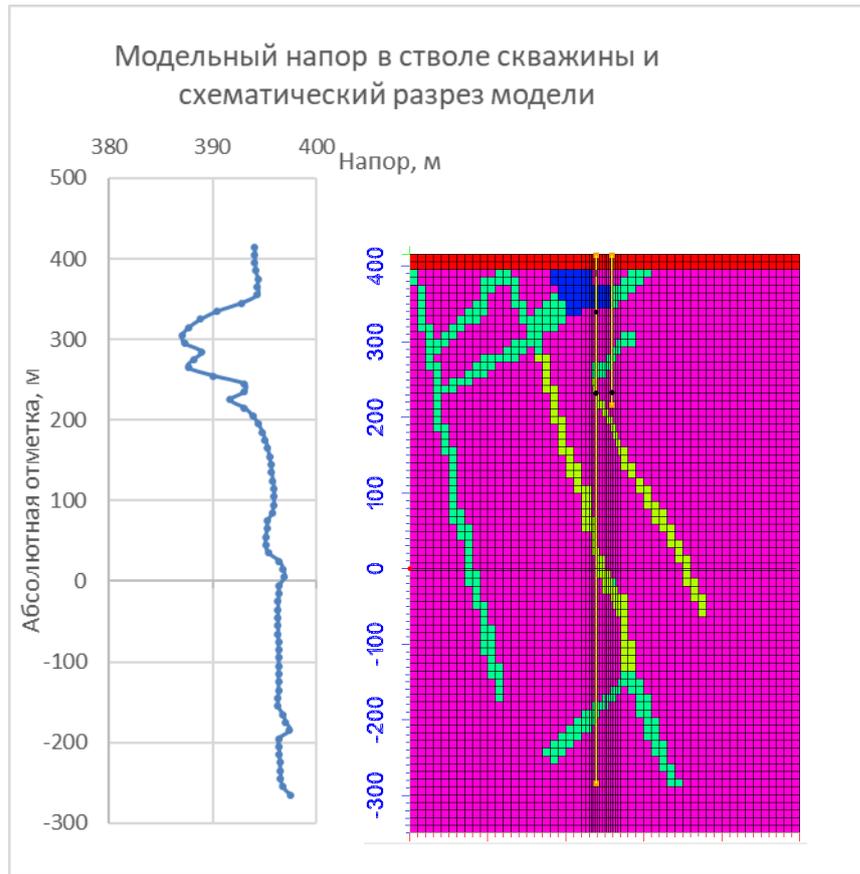


Рисунок 3.4.3 – График зависимости напора в наблюдательной скважине 7P от глубины на момент конца откачки (слева) и модельный разрез (справа)

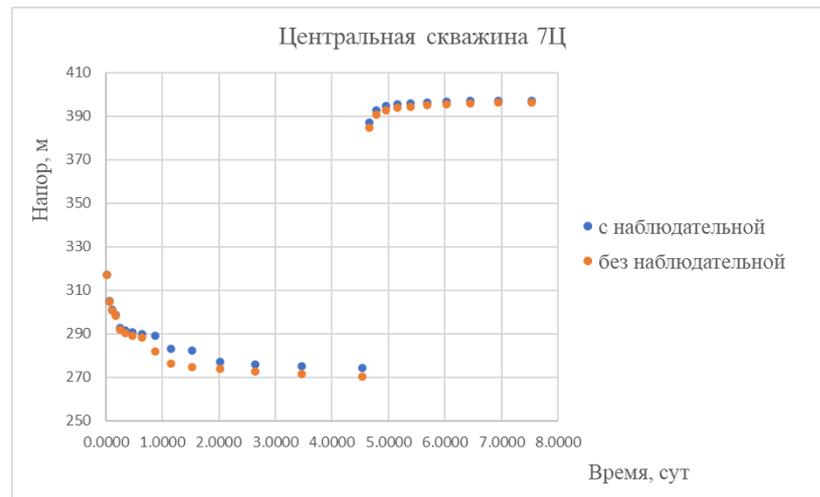


Рисунок 3.4.4 – График изменения напора в центральной скважине при откачке с наблюдательной скважиной и без неё

По результатам данного исследования можно сделать следующие выводы:

- результаты аналитической обработки определения коэффициента фильтрации АО «Красноярскгеология» в целом совпадают с результатами, приведёнными в главе 3.

Небольшое различие возникает из-за погрешности метода определения коэффициента фильтрации. Коэффициенты фильтрации, определённые по центральным скважинам, занижены, так как данный аналитический метод не учитывает скин-эффект;

- численное моделирование позволило более детально учесть условия трещиноватой толщи – задать структурные элементы. Это привело к тому, что коэффициент фильтрации матрицы оказался в 2-3 раза меньше, чем при аналитической обработке. В этом случае большая часть водопроницаемости оказалась связанной не с матрицей, а со структурными элементами. Проведенное моделирование позволило дать оценку фильтрационных свойств структурных элементов и наблюдательных скважин, что показало необходимость их учета при моделировании.

При сравнении графиков водопонижений, рассчитанных на модели и наблюдаемых при выполнении откачек, можно сделать вывод о том, что модель повторяет фактический ход откачки, но различия наблюдаются при восстановлении уровня подземных вод. Модельное повышение уровня более резкое, чем в опытных данных. Вероятно, это можно объяснить тем, что в модели не учитывается взаимосвязь потока в трещиноватой зоне и матрице. На практике такое влияние взаимосвязи прослеживается, т. к. более проницаемая трещиноватая зона дренируется при откачке, и получает питание из матрицы, которое замедлено из-за низких фильтрационных свойств матрицы. После отключения насоса, когда начинается период восстановления уровня подземных вод в скважине, модель не учитывает эту взаимосвязь, в результате чего уровень подземных вод в скважине быстро повышается. В дальнейшем связь матрицы и трещиноватых зон может быть реализована с помощью введения дополнительных специальных коэффициентов водообмена, учитывающих взаимосвязь между ними.

Если не учитывать при моделировании специальное условие на наблюдательных скважинах с помощью пакета Multi-Node Well (MNW2) [49], результаты по определению коэффициентов фильтрации могут быть завышены. Это объясняется тем, что наличие совершенной скважины приводит к тому, что появляется канал (он и реализуется с помощью MNW2), который объединяет всю толщу и даёт дополнительную подпитку.

Трёхмерное численное моделирование позволило определить численные значения коэффициентов фильтрации основных структурных элементов, которые являются наиболее важными гидрогеологическими характеристиками в пределах участка «Енисейский». Полученные результаты необходимы для построения геофильтрационных моделей, являющихся основой для последующих геомиграционных прогнозов. Подтвердить или опровергнуть данные предварительные результаты, вероятно могут помочь поинтервальные исследования.

## 4 Исследование фильтрационных параметров в кристаллических породах.

### 4.1 Полевые исследования на участке Енисейский

Основной целью данной главы является описание методики проведения эксперимента и интерпретации полученных результатов на скважине Р-8, выполненных в летний период 2021 года. [Equation Chapter 4 Section 1](#)

#### 4.1.1 Предшествующие работы по изучению фильтрационных характеристик скважины Р-8

Полевые работы выполнялись в скважине Р-8, глубиной 700 м и пробуренной на Енисейском участке в 2010 г. для целей геологического изучения массива в ближней зоне ПИЛ. Схема расположения скважины показана на рис. 4.1.1.

После завершения опытно-фильтрационных работ осенью 2010 г. других работ на скважине не проводилось, кроме периодических измерений уровня подземных вод. В октябре 2020 г. скважина была реконструирована с целью перевода ее в разряд мониторинговых скважин. Это повлекло изменение ее первоначальной конструкции.

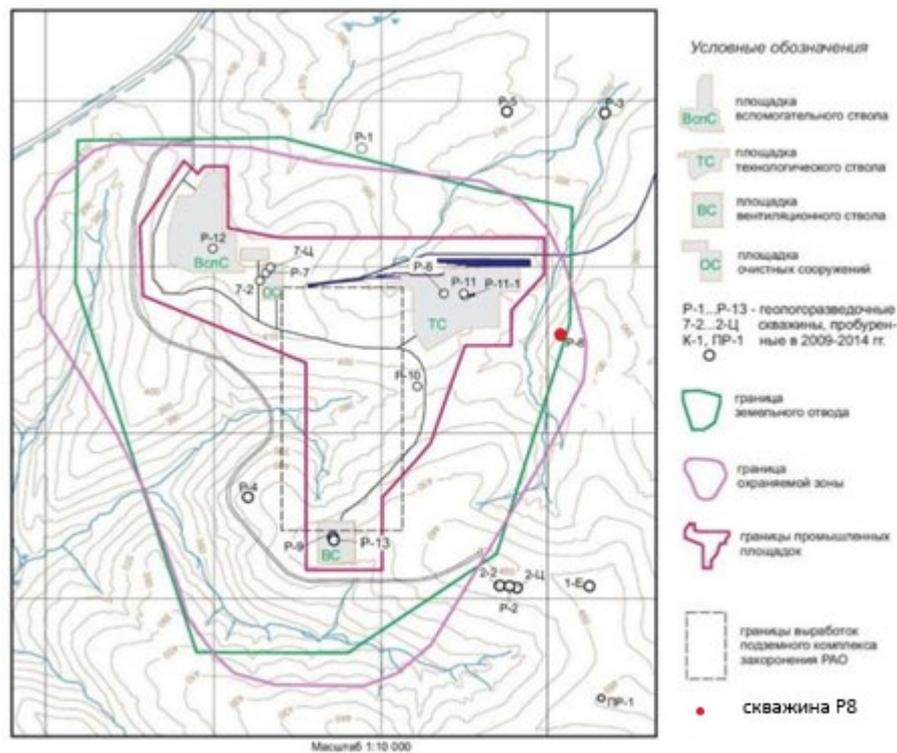


Рисунок 4.1.1 – Схема расположения скважины Р-8 на Енисейском участке

Опытно-фильтрационные работы на скважине Р-8 проводились сразу после завершения ее бурения и заключались в поинтервальных исследованиях в интервалах длиной по 50 м. Изоляция интервалов достигалась применением разжимных пакеров,

устанавливаемых на колонне бурильных труб. Далее проводилась откачка воды с помощью желонки и измерением за восстановлением уровня. В начале опробования интервала производилась откачка воды в объеме 250–300 л, с измерением в конце откачки уровня воды в колонне и в затрубном пространстве. Затем через 1–2 часа производились повторные откачки с отбором 75–150 л воды с измерением в конце откачек уровней в колонне и затрубном пространстве. По окончании всех манипуляций осуществлялось наблюдение за полным восстановлением уровней в колонне труб (интервале) и в затрубном пространстве.

Данные восстановления уровня обрабатывались с использованием решения Cooreg-Jacob [55] в координатах  $S^* - \lg(t)$  ( $S^*$  – восстановление уровня), а также с применением графика прослеживания восстановления уровня, построенного в координатах  $S - \lg(T+t)/t$ , где  $T$  – длительность откачки,  $t$  – текущее время от начала восстановления. Учитывая возможные ошибки при определении дебита при тартании желонкой, дополнительно использовалось решение Nguyen и Pinder [36] (для экспресс-откачек), учитывающее несовершенство опробуемой скважины, при котором величина дебита не участвует в расчетах [33].

Результаты обработки данных ОФР представлены величинами коэффициентов фильтрации, определенными для каждого исследованного интервала (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Величины коэффициентов фильтрации в интервалах.

Интервал исследований, м	700,0-649,05	649,0-601,0	602,0-550,5	551,4-499,35	500,2-448,2	451,5-400,0	397,9-345,9	346,8-299,35	300,25-249,1	249,1-197,95	199,1-151,45	150,1 – 101,35
Коэффициент фильтрации $n \cdot 10^{-4}$ , м/сут	3	3	2	11	3	4	2	5	6	28	3	4

Большой интерес представляют данные об уровнях воды в интервалах, амплитуда изменений которых достигает 30 м. Как следует из данных ОФР [34], уровни в интервале и затрубном пространстве измерялись после расширения пакеров, до начала откачек. На рис. 4.1.2 представлены графики изменения уровня и коэффициента фильтрации по интервалам, отнесенные к середине интервалов исследований.

На графике изменения уровня прослеживается тенденция роста напоров подземных вод с глубиной, свидетельствующая о восходящем направлении потока подземных вод. Вместе с тем, такое распределение уровней по интервалам не всегда согласуется с данными

по уровням в затрубном пространстве, что связано, по-видимому, с отсутствием стабилизации уровней до начала откачек. Так, например, если изолировать интервал с максимальным напором, то уровень в стволе скважины должен снизиться, но по данным ОФР [34] уровень в затрубном пространстве даже повысился. При этом нет оснований усомниться в изолирующей способности пакеров, поскольку при понижении в интервале на 70-80 м уровень в стволе скважины оставался неизменным.

Данные опытно-фильтрационных работ свидетельствуют о том, что во всех исследованных интервалах скважины Р-8 присутствуют участки фильтрации подземной воды с различной проницаемостью, но остается открытым вопрос о мощности и расположении проницаемых участков внутри интервалов, а также о наличии непроницаемых участков. Без такой информации можно допустить, что интервал длиной 50 м объединяет две или более систем трещин с затрудненной или отсутствующей гидравлической связью между ними, и в таком случае полученные значения уровней и коэффициентов фильтрации являются осредненными величинами без конкретной принадлежности.



Рисунок 4.1.2 – Графики уровней и коэффициентов фильтрации в интервалах

Вышеописанные неопределенности можно устранить с помощью исследований с более высокой детальностью.

#### 4.1.2 Учет зарубежного опыта исследования фильтрационных характеристик на объектах аналогах

Анализ накопленного зарубежного опыта, связанного с поинтервальными исследованиями, основывается преимущественно на работах, выполненных в Финляндии и Швеции как стран, в которых проекты создания ПГЗРО на сегодняшний день находятся на

наиболее продвинутой стадии. Так, в финской компании Posiva на протяжении последних нескольких десятилетий проводятся исследования по изучению гидрогеологических свойства массива. В шведской компании SKB проводятся аналогичные исследования.

На рисунке 4.1.3 приведена схема по размещению оборудования в скважине. Над верхним пакером в колонне труб расположен контрольный клапан, управляемый гидравликой с поверхности, предназначенный для изоляции межпакерного интервала от столба воды в колонне. Рядом смонтирован датчик давления, измеряющий давление над верхним пакером. Контрольный клапан и датчик давления помещены в изогнутых трубах, а между ними и пакером установлено соединение, позволяющее извлечь колонну труб.

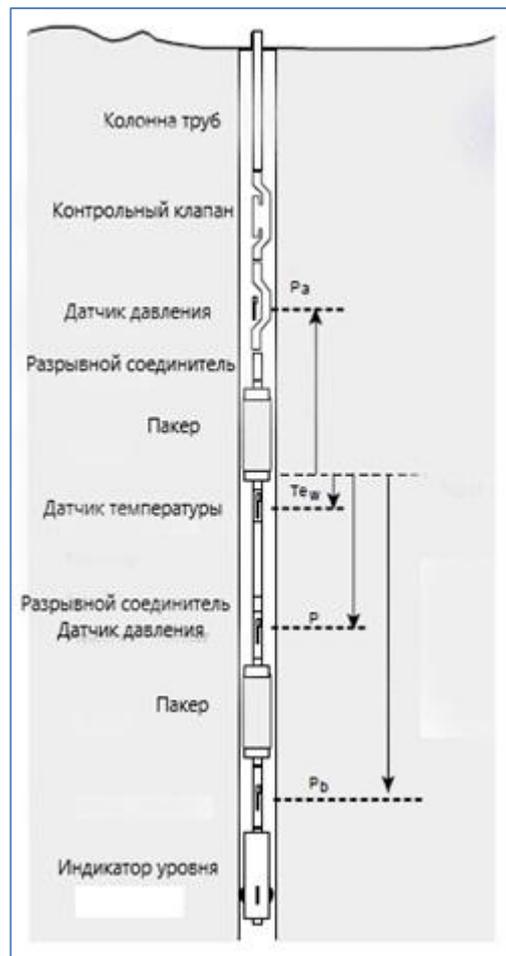


Рисунок 4.1.3 – Схема внутрискважинного оборудования [56, 57, 58]

Датчик давления и температуры в межпакерном интервале расположены между двумя пакерами, а под нижним пакером расположены еще один датчик давления и устройство измерения глубины погружения.

На поверхности земли оборудование размещено в трейлере на шасси стандартной каротажной станции. Оно включает лебедку, блок из 4 автоматически подключаемых

расходомеров, компрессор и напорную емкость с водой. Закачка воды в интервал осуществляется из напорной емкости сжатым воздухом.

Определение гидродинамических параметров интервала основано на интерпретации данных, полученных при нагнетаниях с постоянным напором, поэтому поддержание постоянного давления является наиболее значимой функцией установки. В зависимости от фильтрационных свойств интервала в исследованиях используется два метода поддержания постоянного давления. При средних и относительно высоких значениях коэффициента фильтрации задействуется активный регулятор давления, установленный над верхним пакером и контролирующей падение давления в нагнетательной линии до себя. Регулятор работает достаточно точно при заметном потоке воды через него.

Если падение давления в нагнетательной линии слишком большое, контроль давления становится нестабильным, и в этом случае большое значение имеет начальное давление в напорной емкости, откуда вода поступает в нагнетательную линию. Давление в емкости устанавливается до начала нагнетания в секцию, и его значение определяется оператором, исходя из опыта. Во многих случаях характер стабилизации давления в секции после расширения пакеров дает оператору представление о возможной величине коэффициента фильтрации, исходя из которой он задает начальное давление в напорной емкости.

Процедура тестирования интервала включает 4 стадии:

1) Расширение пакеров. Время закачки воды для расширения пакеров варьируется от 5 до 15 минут в зависимости от расстояния между пакерами и ожидаемой продолжительности налива. Давление в пакерах устанавливается на уровне 0,8 МПа, после чего клапан в линии закачки воды закрывается. В процессе расширения пакеров байпасный клапан над верхним пакером открыт для исключения скачка давления в исследуемом интервале;

2) Стабилизация давления. Байпасный клапан закрывается и скважина в течение 5–10 минут выдерживается для стабилизации уровня, который должен быть близок к статическому положению до начала опыта. Однако, выравнивание давления внутри пакера в зависимости от геометрии стенок может занимать значительно большее время. При весьма низких значениях проницаемости интервала небольшое изменение объема секции сопровождается скачком давления, восстановление которого до начальных значений может продолжаться до нескольких часов. Но и в этом случае значение начального уровня в секции остается неизвестным. Скачок давления при стабилизации уровня является индикатором низкой проницаемости и позволяет оператору установить соответствующее начальное давление в напорной емкости. В процессе стабилизации регулятор давления в

блоке датчиков закрыт, а нагнетательная линия заполнена водой из напорной емкости, и таким образом давление в напорной емкости и нагнетательной трубке выравнивается, что обеспечивает стабилизацию объема воды в трубке при ее расширении. По окончании налива давление в трубке возвращается к той же величине, что гарантирует точность определения расхода нагнетания в интервал;

3) Нагнетание. Открывается регулятор давления в скважине, предварительно установленный в некое среднее положение, и программное обеспечение дискретно открывает или закрывает регулятор для стабилизации давления в нагнетательной линии. Если начальное давление в напорной емкости установлено соответственно ожидаемой проницаемости, стабилизация давления занимает не более минуты. Если проницаемость интервала достаточно высока, стабилизация давления может занимать несколько минут. В этом случае частота записи кривой расхода увеличивается, чтобы зафиксировать переходные процессы в стабилизации расхода. Стандартное давление налива составляет 0,2 Мпа, но при повышенной проницаемости интервала может снижаться, чтобы минимизировать потери давления в нагнетательной трубке. Налив продолжается до стабилизации расхода, критерием чего являются колебания расхода на уровне 0,5%. Стандартное время налива – 20 минут, но может варьировать в широких пределах в зависимости от фильтрационных свойств интервала;

4) Восстановление уровня. Восстановление начинается при закрытии регулятора давления в скважине. Частота регистрации данных увеличивается до 1 минуты для фиксации начального участка кривой восстановления. Номинальное время восстановления составляет 10 минут, но может колебаться от нескольких минут до часов в различных интервалах. После снятия давления внутри пакеров, что длится 5-10 минут, инструмент перемещается на следующий интервал. Типовой график нагнетания показан на рис. 4.1.4.

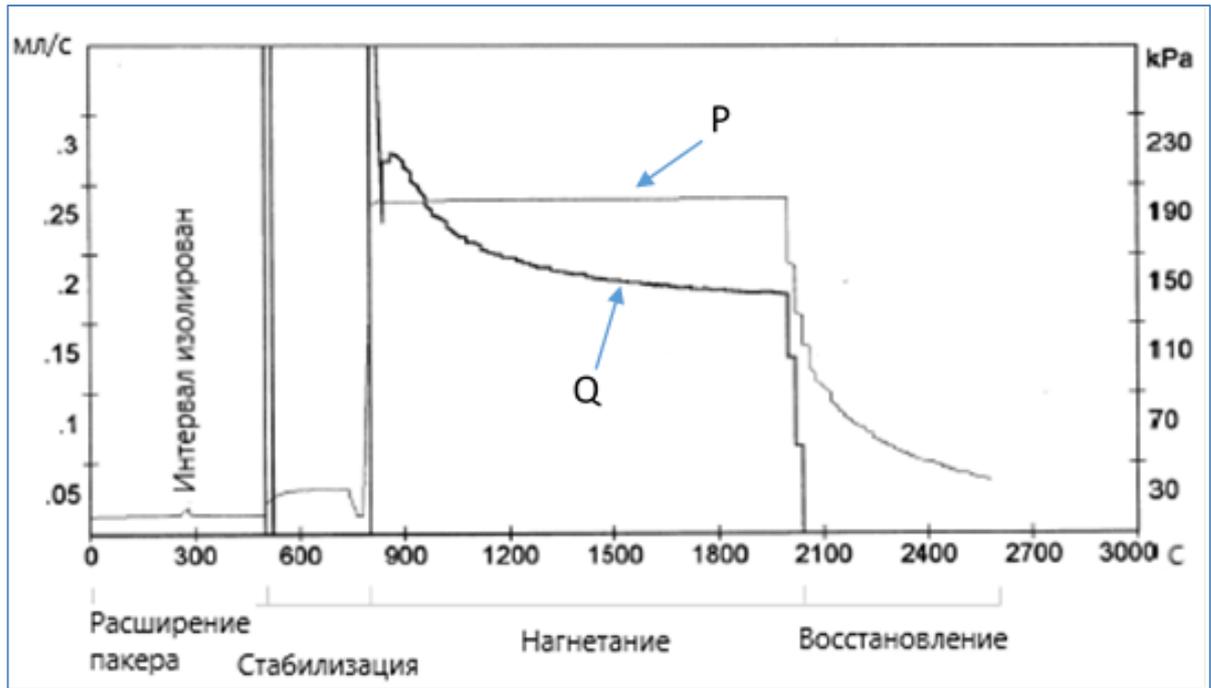


Рисунок 4.1.4 – Типовые кривые нагнетания в интервал

#### 4.1.3 Оборудование и методика поинтервальных исследований на участке Енисейский

В соответствии со схемой оборудования скважины (рис. 4.1.5), внутрискважинное оборудование включает двухпакерный снаряд, датчики уровня, две полиамидные трубки и колонну пластиковых трубок для размещения логгера.

Работоспособность пакеров гарантируется при больших избыточных давлениях расширения, достигающих 10 МПа. Для расширения пакеров используется насос для закачки в них воды.

Полиамидные трубки предназначены для гидравлической связи между пакерами и межпакерным интервалом. Для закачки воды в пакеры выбрана трубка 8/6 мм, выдерживающая рабочее давление более 3 МПа.

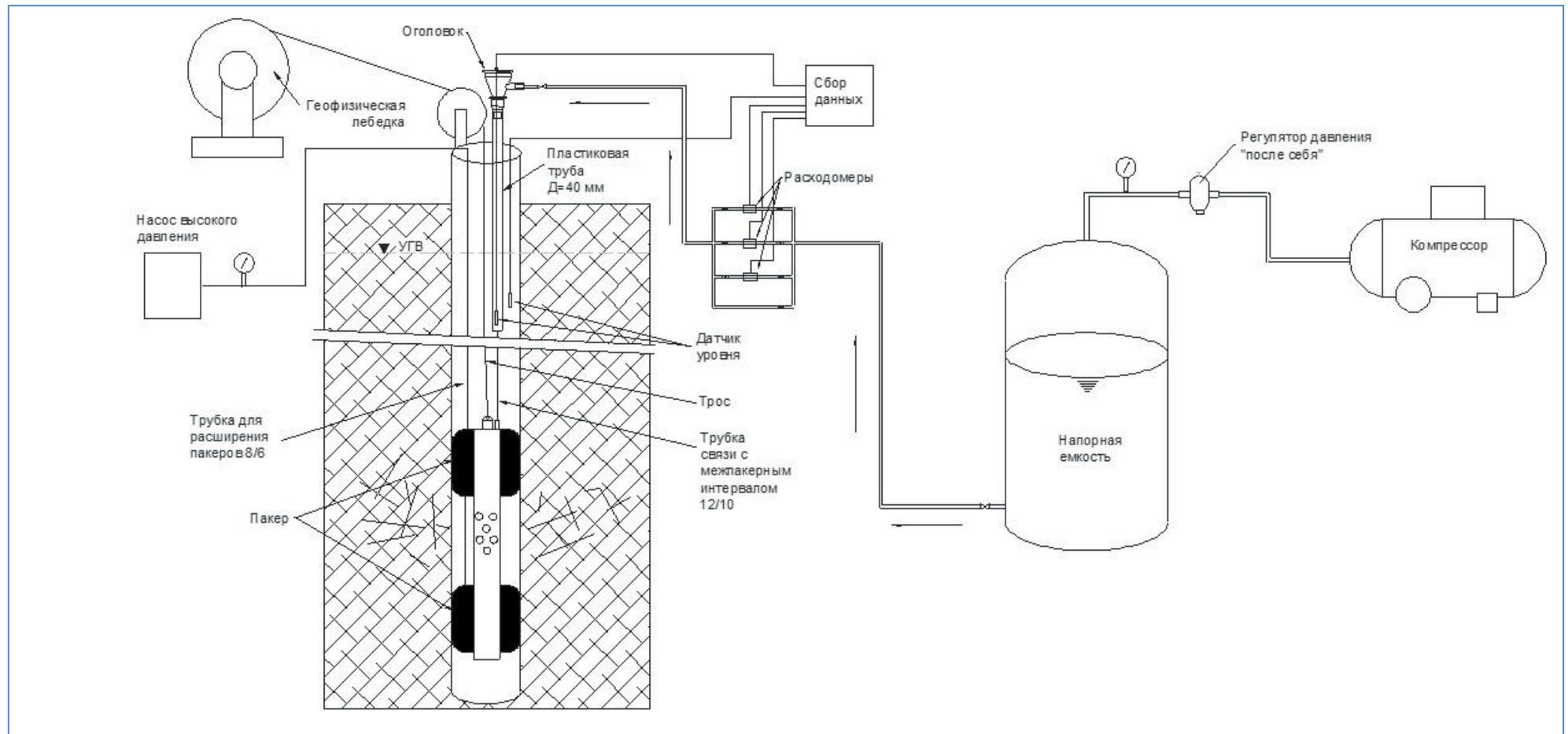


Рисунок 4.1.5 – Схема оборудования скважины для поинтервальных исследований

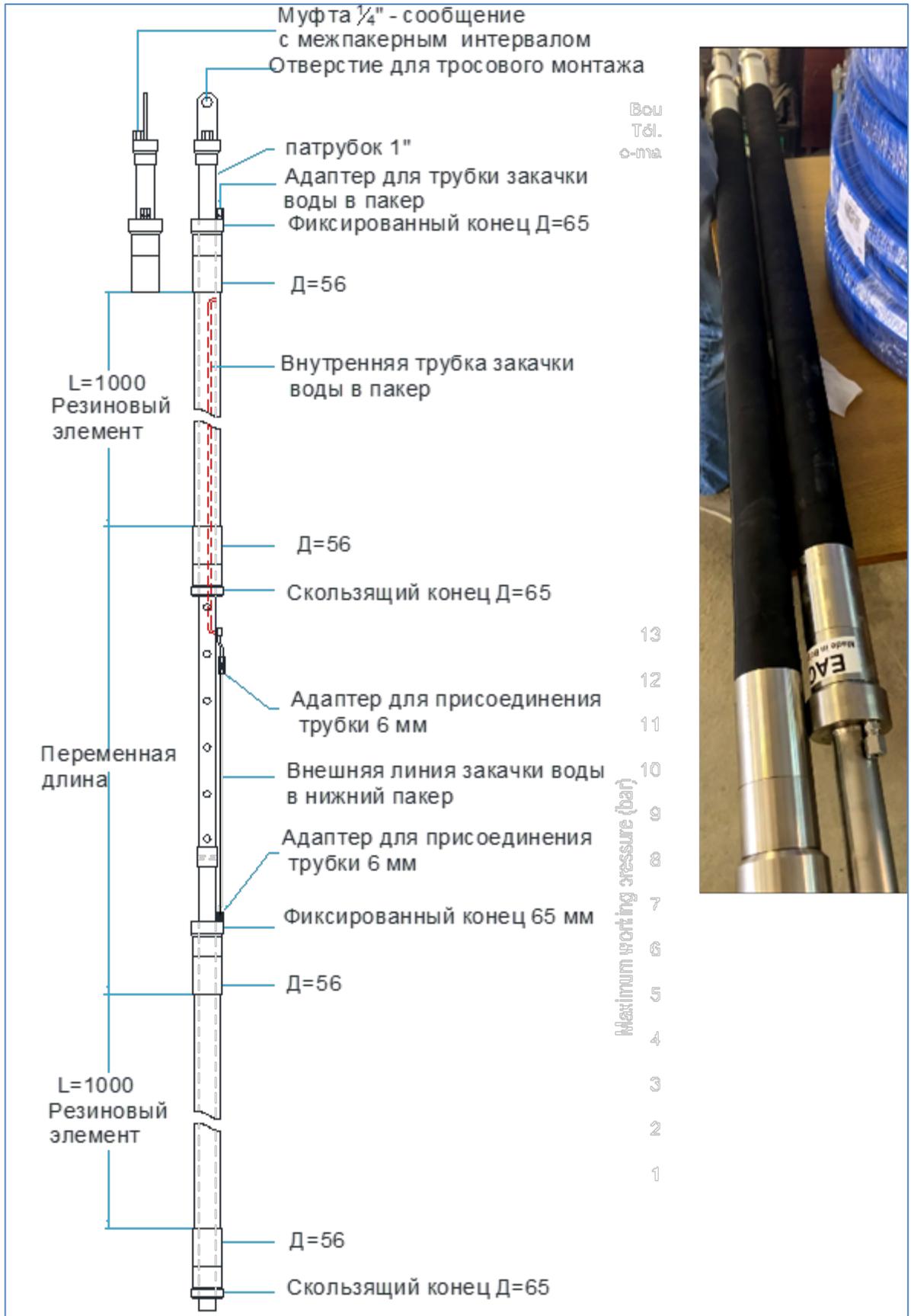


Рисунок 4.1.6 – Схема двухпакерного снаряда

Внутри колонны ПВХ помещался логгер с кабелем прямого считывания для слежения за уровнем в межпакерном интервале онлайн. Логгеры измеряли абсолютное давление столба воды над собой. На рисунке 4.1.7 приведены этапы монтажа пакерного снаряда.



а – нижний пакер опущен, монтаж алюминиевых труб; б – алюминиевые трубы опущены, видна трубка связи между пакерами; в – верхний пакер присоединен; г – к пакерам присоединены трубки накачки и связи с межпакерным интервалом (синяя); д – монтаж колонны пластиковых труб; е – колонна ПВХ опущена

Рисунок 4.1.7 – Этапы монтажа пакерного снаряда

После демонтажа пакерного устройства 02.08.2021 г. информация с логгеров, в том числе барологгера, была обработана, результаты представлены на графике уровней в межпакерном интервале и над верхним пакером на рис. 4.1.8.

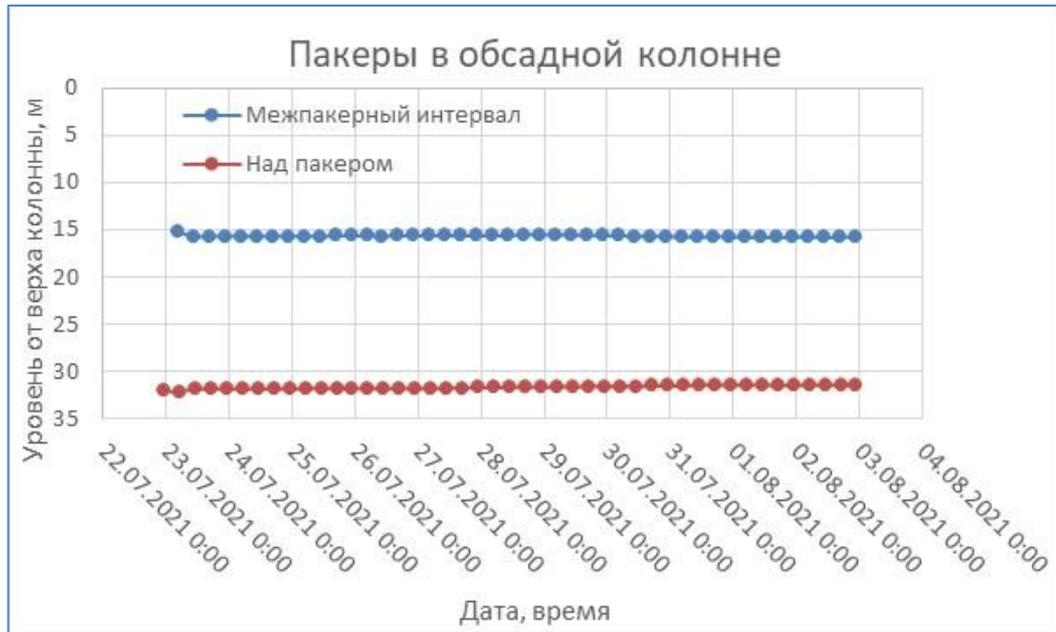


Рисунок 4.1.8 – Графики уровней в межпакерном интервале и в затрубье

Из графика видно, что уровни в интервалах оставались стабильными на протяжении всего периода наблюдений, что является свидетельством надежной изоляции пакерами интервала исследований.

## 4.2 Интерпретация поинтервальных исследований

### 4.2.1 Анализ первичных результатов полевых работ

На начальном этапе испытаний двухпакерная система с расстоянием между пакерами 10 м была опущена на глубину 659 м. При таком положении двухпакерного снаряда интервал исследований находился на отметках 657,5 – 647,5 м. Нулевая метка счетчика глубины устанавливалась в момент, когда быстросъемное соединение трубки связи с межпакерным расстоянием на верхнем пакере находилось на обресе обсадной трубы. Поскольку перемещение снаряда в дальнейшем предполагалось снизу-вверх, колонна труб ПВХ имела максимальную длину – 90 м. Стоит отметить, что перед началом поинтервальных исследований был выполнен акустический каротаж скважин для определения наиболее трещиноватых зон, которые могут являться проницаемыми.

Вследствие поршневого эффекта уровень в скважине после монтажа пакеров на нижний интервал повысился примерно на 10 м, поэтому перед изоляцией интервала решено оставить скважину до следующего дня для восстановления уровня. На следующий день уровень составил 34,67 м, т. е. невосстановился на 1,13 м. График восстановления показан на рис. 4.2.1. Учитывая медленный темп восстановления уровня, в дальнейшем

решено проводить исследования в нарушенных условиях, рассчитывая на более быструю реакцию различных интервалов на искусственное повышение уровня.

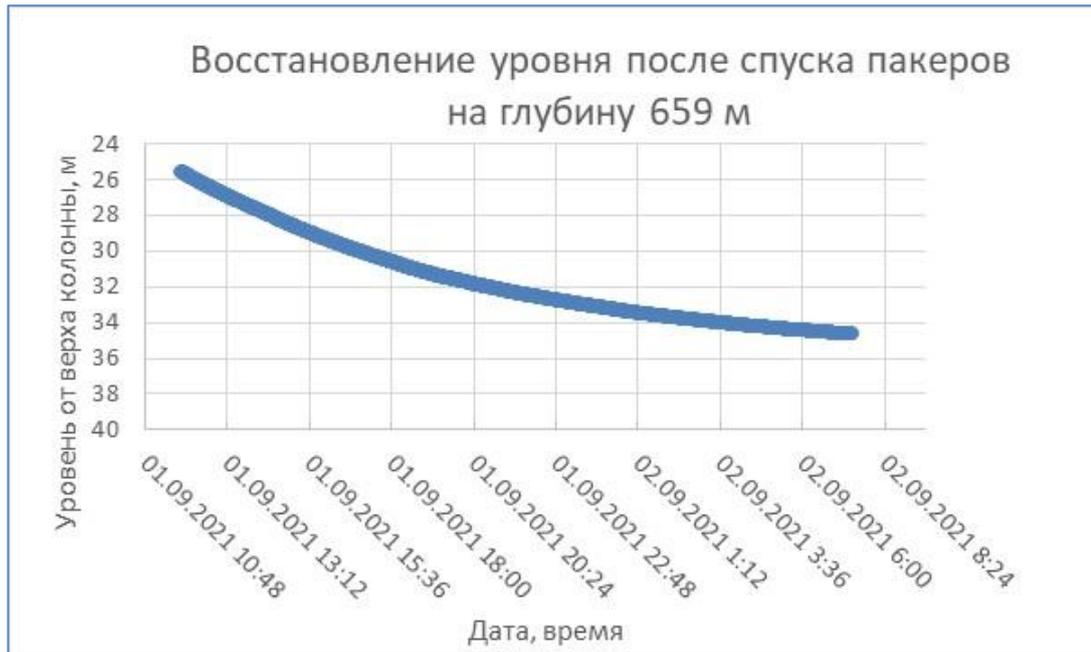


Рисунок 4.2.1 – График восстановления уровня после спуска пакерного снаряда

По результатам исследований, оказалось, что участок ствола скважины в интервале 250–500 м оказался практически непроницаемым, а ствол от 500 м до 650 м исследован с шагом 10 м, при прохождении каждого 10-метрового интервала было выделено несколько интервалов, которые представляли ценность для более детального изучения. В дальнейшем решено перейти к использованию одного пакера для изучения значительных по протяженности участков ствола. С этой целью на верхнем пакере была заглушена трубка связи пакеров между собой, нижний пакер и алюминиевые трубки отсоединены от снаряда и одинарный пакер опущен на отметку 651 м, что позволяло оценить проницаемость забойной части ствола в интервале 651–700 м.

В течение 8 сентября было исследовано 7 интервалов ствола в пределах отметок 575,8 м–487,4 м. Для обеспечения более быстрого перемещения по интервалам снизу-вверх в скважину была залита вода, поэтому уровни в интервалах были высокими

После монтажа пакера он был оставлен в разжатом состоянии до следующего дня. Логгер с кабелем прямого считывания был прикреплен к трубке связи с межпакерным интервалом в месте ее присоединения к трубе ПВХ, что позволяло оперативно контролировать уровень в затрубье. График уровней в двух зонах скважины показаны на рис. 4.2.2. Из графиков видно, что призабойная часть ствола длиной 50 м практически

непроницаема, а темп снижения уровня в остальной части ствола существенно ниже по сравнению с начальным периодом исследований.

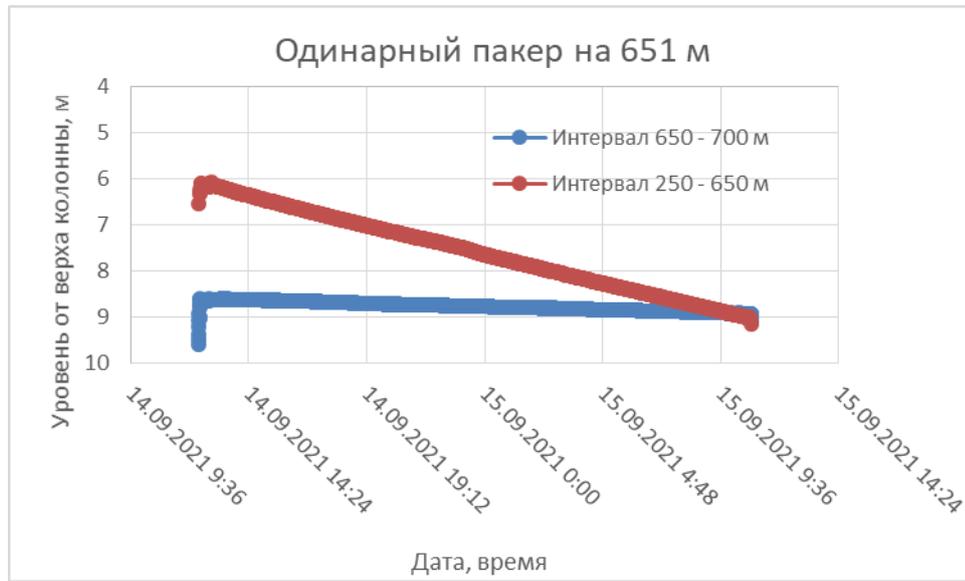


Рисунок 4.2.2 – Графики уровней на двух участках ствола скважины

#### 4.2.2 Постановка задачи и интерпретация результатов исследований

На всем протяжении поинтервальных исследований уровни воды в скважине превышали статический уровень, зафиксированный до начала опытных работ. Поэтому интерпретация результатов осуществлялась на основе решений для наливов воды в скважину. Обычно к таким методам определения параметров водоносных горизонтов прибегают в слабопроницаемых отложениях.

Из всего массива данных поинтервальных исследований интерпретации поддается только часть из них, преимущественно данные о восстановлении уровня в скважине в целом и надпакерной зоне.

Обработка результатов проводилась на основе аналитического решения, полученного в работе [59]. Приведенная формула ниже позволяет определять коэффициент фильтрации, водоотдачу, сопротивление прискважинной зоны ( $km$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$ ). Обработка параметров проводилась на основе совмещения теоретических и натурных данных.

Аналитическое решение для восстановления уровня в скважине имеет следующий вид:

$$S(t) = S_0 \frac{8\mu^*}{\pi^2} \int_0^{\infty} \frac{e^{-v^2\tau}}{N} \frac{dv}{v}, \quad (4.1)$$

где  $N$ ,  $\tau$ ,  $\mu^*$  выражаются следующим образом:

$$N = \left[ \nu J_0(\nu) - \frac{\xi}{2} \left( \frac{4\mu^*}{\xi} - \nu^2 \right) J_1(\nu) \right]^2 + \left[ \nu Y_0(\nu) - \frac{\xi}{2} \left( \frac{4\mu^*}{\xi} - \nu^2 \right) Y_1(\nu) \right]^2,$$

$$\tau = \frac{T(r,t)t}{\mu r_s^2},$$

$$\mu^* = \mu \frac{r_s^2}{r_c^2}.$$

(4.2)

$J_0, J_1, Y_0, Y_1$  – функции Бесселя первого и второго рода, где  $S(0)$  – начальный подъем уровня после налива;  $r_s, r_c$  – радиусы фильтра и ствола скважины;  $\mu, \alpha$  – коэффициенты упругой емкости и пьезопроводности;  $\xi$  – обобщенное сопротивление скважины.

Один из первых опытов был выполнен 01.09.21. После установки пакеров на глубину 650 м уровень в скважине за счет поршневого эффекта поднялся на 10 м. Долив воды в скважину не осуществлялся, пакеры не расширялись, скважина оставлена на восстановление на 16 часов (рис. 4.2.1). График совмещения данных опыта с теоретическим решением показан на рисунке 4.2.3. Наилучшее соответствие было достигнуто при нулевом сопротивлении прискважинной зоны ( $\xi = 0$ ), водопроницаемости  $km = 0,0194 \text{ м}^2/\text{сут}$ , упругой водоотдаче  $\mu = 0,00003$ . Некоторое несоответствие теоретического и модельного графиков возможно связано с относительно медленным поднятием уровня.

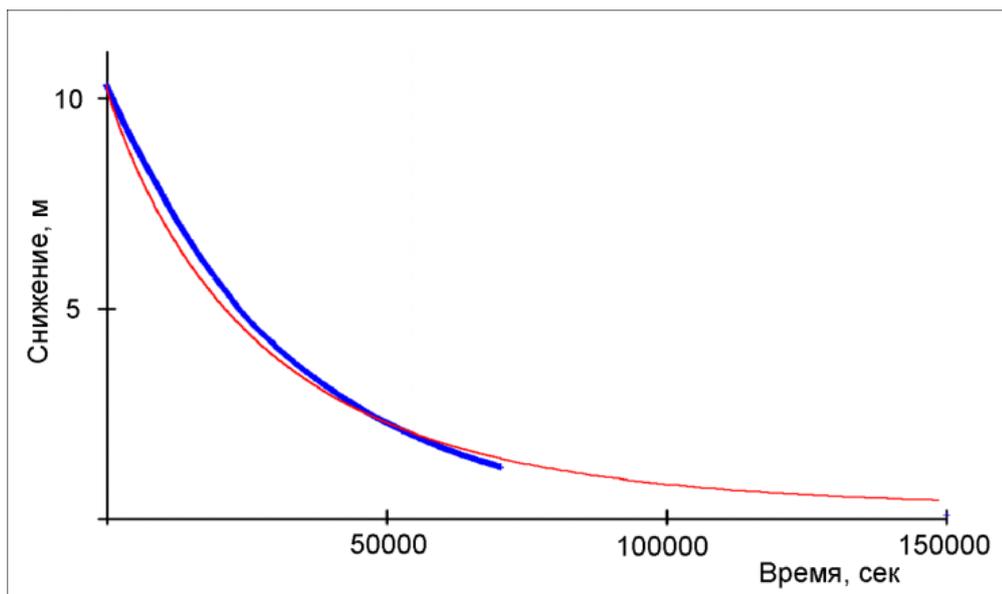


Рисунок 4.2.3 – Сопоставление фактического (синяя линия) и расчетного графика (красная линия) при оптимальных параметрах для опыта 01.09.21

Следующий опыт был выполнен в период с 06.09.21 – 07.09.21. Уровень в скважине был повышен доливом воды, необходимым для перемещения пакеров в скважине. Избыточный напор над статикой (35,8 м) составил почти 30 м. Скважина после изоляции интервала 586,7 – 596,7 м была остановлена для восстановления уровня до следующего утра. Общее время неполного восстановления уровня составило около 16 часов. Обработка проводилась по данным восстановления уровня в надпакерном интервале 250 – 586,7 м. График совмещения опыта с теоретическим решением показан на рисунке 4.2.4. Наилучшее соответствие было достигнуто при сопротивлении прискважинной зоны  $\zeta = 0,1$ , водопроницаемости  $k_m = 0,0147 \text{ м}^2/\text{сут}$ , упругой водоотдаче  $\mu = 0,0008$ .

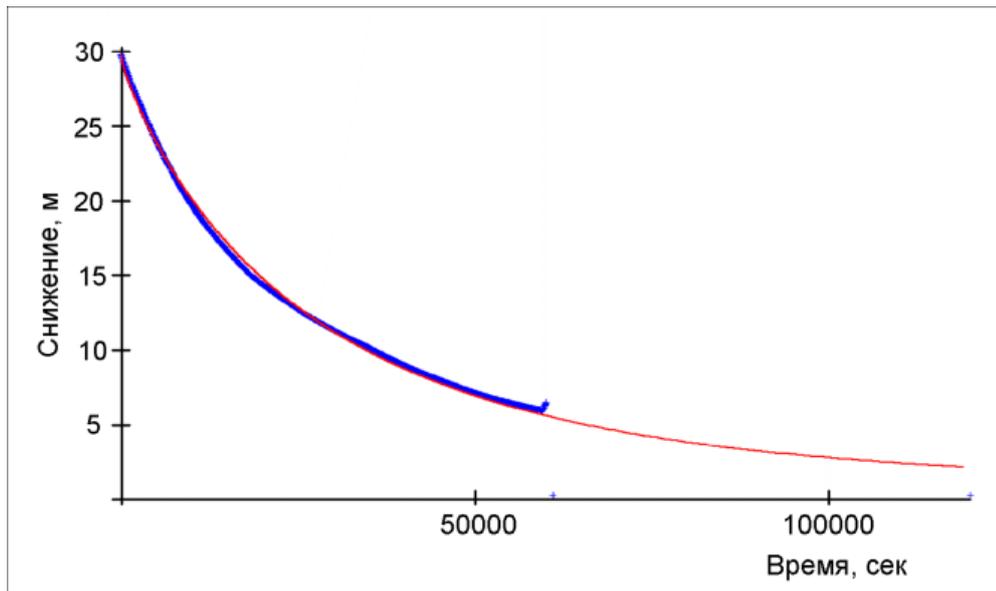


Рисунок 4.2.4 – Сопоставление фактического (синяя линия) и расчетного графика (красная линия) при оптимальных параметрах для интервала 250 – 586,7 м

В период с 15.09.21 – 16.09.21 был выполнен налив до устья скважины. Начальный уровень составлял 12 м от верха колонны. Восстановление уровня в скважине происходило медленно, что можно объяснить уменьшением проницаемости прискважинной зоны за счет кольматажа трещин. В результате интерпретации наилучшее соответствие было достигнуто при сопротивлении прискважинной зоны  $\zeta = 109$ , водопроницаемости  $k_m = 0,019 \text{ м}^2/\text{сут}$ , упругой водоотдаче  $\mu = 0,00003$ . График совмещения опыта с теоретическим решением показан на рисунке 4.2.5.

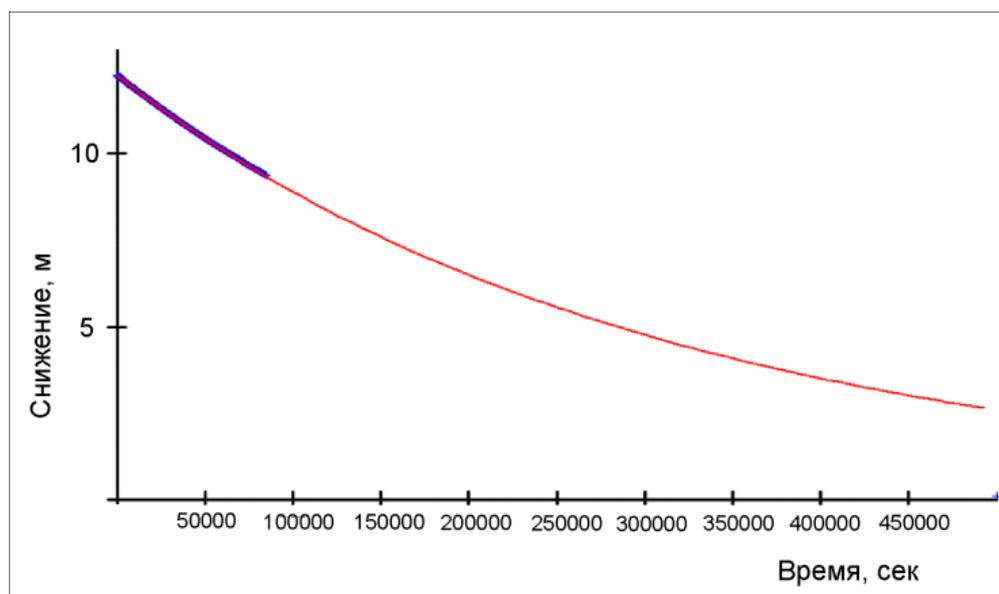


Рисунок 4.2.5 – Сопоставление фактического (синяя линия) и расчетного графика (красная линия) при оптимальных параметрах для интервала 250 – 650 м

Результаты интерпретации данных представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры интервалов

№ п/п	Интервал, м	$km, м^2/сут$	$\zeta$	$\mu, *10^{-5}$	$k, м/сут, *10^{-4}$	
					2021 г.	2010 г.
1	250 - 700	0,0194	0	3	0,431	4,3
2	250-586,7	0,0147	0,1	80	0,437	4,7
3	497,6 – 507,6	0,002	0,1	8	2	-
4	250 - 700	0,019	109	3	0,422	4,3

Сравнение коэффициентов фильтрации, определенных для всей скважины в 2021 г. и в 2010 г. показывает, что они отличаются на порядок. Для 2010 г. величина  $k$  осреднена для соответствующего интервала ствола.

Результаты поинтервальных исследований показали, что двухпакерный снаряд при использовании в кристаллических породах обеспечивает надежную изоляцию изучаемых интервалов, что исключает перетоки подземных вод и даёт наиболее достоверную величину при определении фильтрационных характеристик.

## 5 Разработка и обоснование трехмерной модели

Можно выделить два основных подхода к моделированию миграции в кристаллических породах: модель сплошной поровой среды (СПС, или англ. Continuous Porous Medium, CPM) и модель сети дискретных трещин (СДТ, или англ. Discrete Fracture Matrix – DFM). В рамках модели СПС предполагается, что трещиноватая горная порода может быть представлена в виде однородной пористой среды. В моделях СДТ в пространстве выделяются области неоднородности (сеть трещин) с характеристиками, резко отличающимися от остальной пористой среды.

Далее приведено краткое описание уже разработанных и разрабатываемых трехмерных моделей миграции радионуклидов в дальней зоне ПГЗРО по участку Енисейский. [Equation Chapter 5 Section 1](#)

### 5.1 Ограничения предшествующих работ по моделированию ПГЗРО участка Енисейский

На сегодняшний день разработаны модели по участку Енисейский различной степени сложности и с использованием различных средств моделирования. Так, в работе [60] рассматриваются модели течения подземных вод, теплопереноса в подземной среде и миграции радионуклидов при помощи численного моделирования на основе собственного конечноразностного кода. Пространственная неоднородность была построена стохастически на основе статистических данных о фильтрационных параметрах, полученных по результатам полевых поинтервальных исследований. К сожалению, такой подход не дает возможности полноценно учесть конструкцию предполагаемого хранилища и геологическое строение участка, соответственно результаты могут быть использованы только в качестве предварительных приближенных оценок. Тем не менее, для получения достоверных оценок на более поздних этапах обоснования безопасности будут необходимы более детальные модели, для создания которых необходимо пользоваться специализированными (а в контексте федеральных нормативных документов еще и обязательно аттестованными) программными средствами или общепринятыми мировыми программными кодами типа MODFLOW [53], MT3DMS [54], FEFLOW [61], CONNECTFLOW [62], GMS [52].

В работе [21] приводятся расчеты в рамках концепции эквивалентной пористой среды с помощью программного комплекса Processing Modflow [53, 63], а также результаты моделирования, выполненные в рамках решения сопряженной задачи двухфазной фильтрации и теплопереноса на основе программного кода TOUGH2 [64]. Полученные результаты могут быть использованы как для предварительных оценок по участку Енисейский, так и для последующего усовершенствования существующих моделей с

появлением новых данных. Авторы приходят к выводу на основе трехмерного моделирования, что на участке размещения объекта отсутствует восходящий поток подземных вод, который мог бы потенциально повлиять на мелкую речную сеть.

*Модель миграции радионуклидов в дальней зоне ПГЗРО в приближении СПС*

Модель миграции радионуклидов в дальней зоне ПГЗРО в Нижнеканском массиве в рамках подхода сплошной поровой среды приведена в работе [21]. Расчет проводится в двумерной постановке на базе программного модуля PMWIN (блок MT3DMS). Используется поле скоростей фильтрации, полученное в гидродинамической модели в работе [21]. Принимается, что поток подземных вод, проходящий через зону размещения ПГЗРО, разгружается в р. Енисей (см. рисунок 5.1.1).

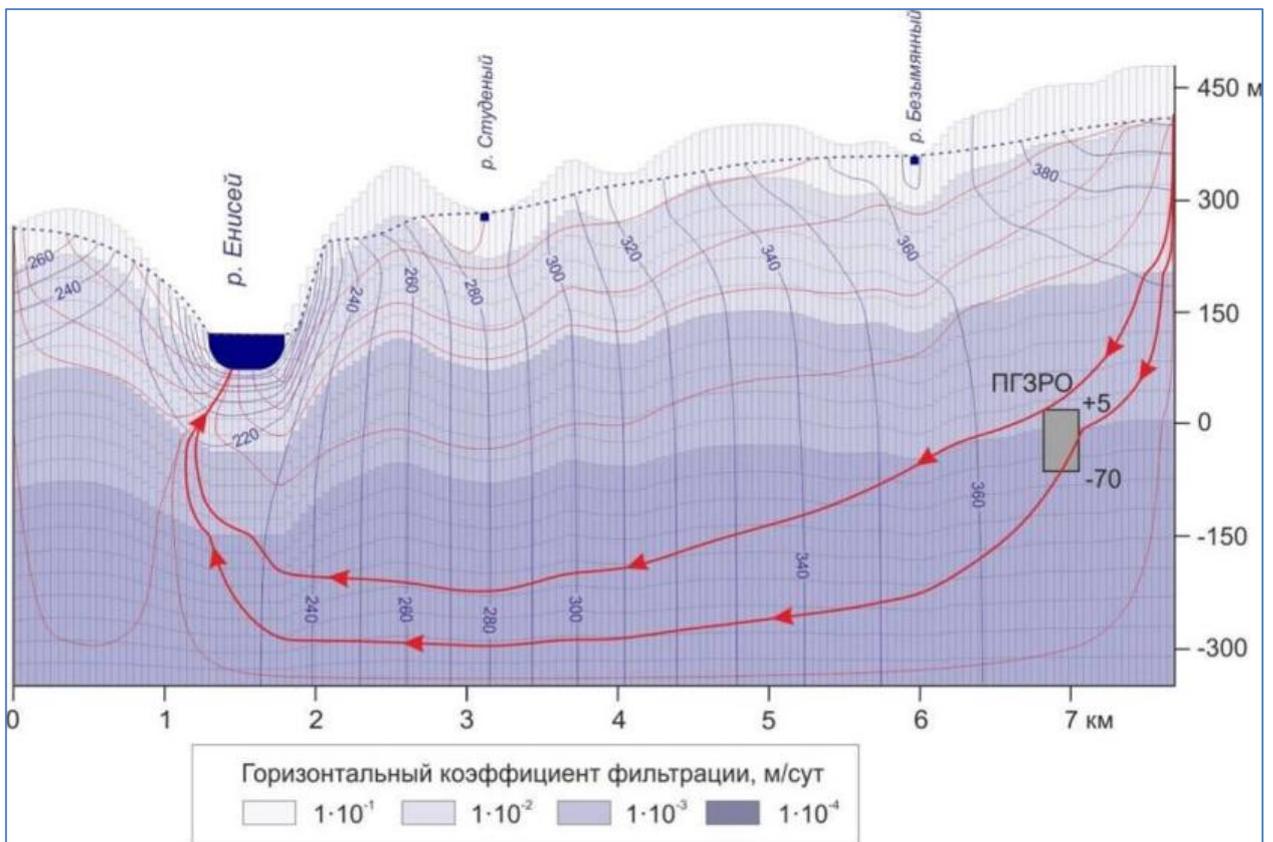


Рисунок 5.1.1 – Основной расчетный профиль, который использовался в работе [21]. Цветом показаны зоны породы, различающиеся коэффициентом фильтрации, тонкие синие линии – эквипотенциали, красные линии со стрелками – главные линии тока

Источник в модели рассматривался в виде единого однородного тела, в объеме которого распределена начальная активность радионуклидов, вышедших за пределы системы инженерных барьеров.

В расчете миграции, помимо адвективного переноса, учитывалась гидродинамическая дисперсия (причем параметры заданы довольно малыми для данной длины пути переноса:(

$\delta_L = 10$  м и  $\delta_T = 1$  м), сорбция на поверхности трещин, радиоактивный распад. Диффузионным обменом между трещинами и пористыми блоками (его в подходе СПС описывают моделью двойной пористости) консервативно пренебрегли.

Расчеты миграции радионуклидов с подземными водами проводились по двум сценариям – базовому и аварийному. Базовый сценарий предусматривает нормальную эксплуатацию ПГЗРО на протяжении периода  $10^{10}$  лет (~10 периодов полураспада  $^{238}\text{U}$ ) с постепенной деградацией инженерных барьеров. В аварийном сценарии максимально консервативно считалось, что система инженерных барьеров не сработала, и произошло мгновенное попадание всей накопленной в ПГЗРО активности в водоносный горизонт.

Одним из главных выводов по результатам моделирования является то, что в рассмотренных геолого-гидрогеологических условиях, вмещающая среда не гарантирует полную изоляцию от радионуклидов  $^{129}\text{I}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Согласно расчетам, данные радионуклиды будут зафиксированы в зоне разгрузки с течением времени.

## 5.2 Разработка трехмерных моделей в пределах участка Енисейский

### 5.2.1 Разработка и калибровка геофильтрационной и геомиграционной моделей дальней зоны на основе концепции сплошной среды

На основе ранее выполненных модельных расчетов и анализируя предыдущие разработки. В рамках диссертационного исследования была разработана современная трехмерная модель в рамках концепции сплошной среды. Отличительная особенность данной модели заключается в следующем:

- модель выполнена на основе блоковой структуры массива и учитывает основные разрывные нарушения;
- верификация модели выполнена по данным мониторинга в пределах лицензионной площади участка и по горной части ФГУП «ГХК»;
- проведена верификация модели по основным гидропостам в пределах рассматриваемой территории.

Трехмерная модель была разработана на основе кода GeRa/V1 [44], который с помощью неортогональной дискретизации (см. рисунок 5.2.1) позволяет адекватно отразить геологические особенности объекта. Модель по вертикали разбита на 16 слоев, поверхность рельефа и состоит из геологических слоев, содержащая 285 603 ячеек. Первый модельный слой соответствует покровным отложениям неоген-четвертичного возраста. Остальные слои имеют равную мощность в 50 метров, такая мощность была выбрана для того, чтобы соответствовать результатам пакерных исследований. Расчеты проводились в

напорно-безнапорной постановке. Расчетная область соответствует границам водосборных бассейнов, включая р. Байкал, р. Шумиха, р. Плоский, по западной границе проходит русло р. Енисей.

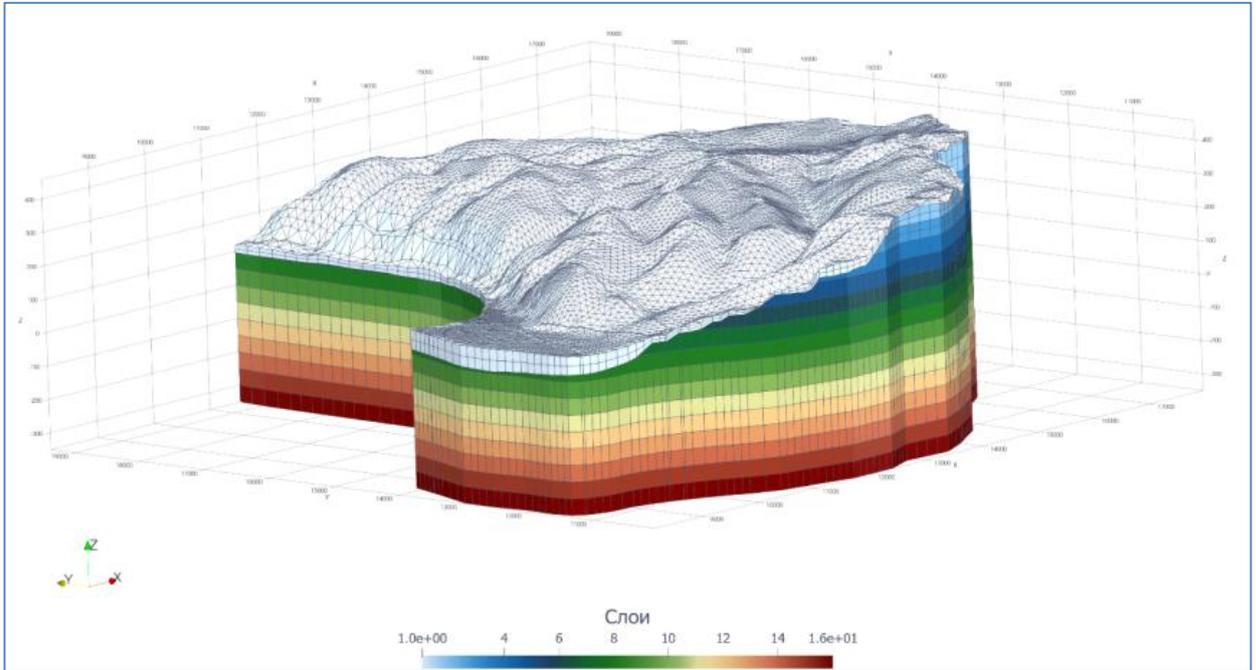


Рисунок 5.2.1 – Сетка расчетной области

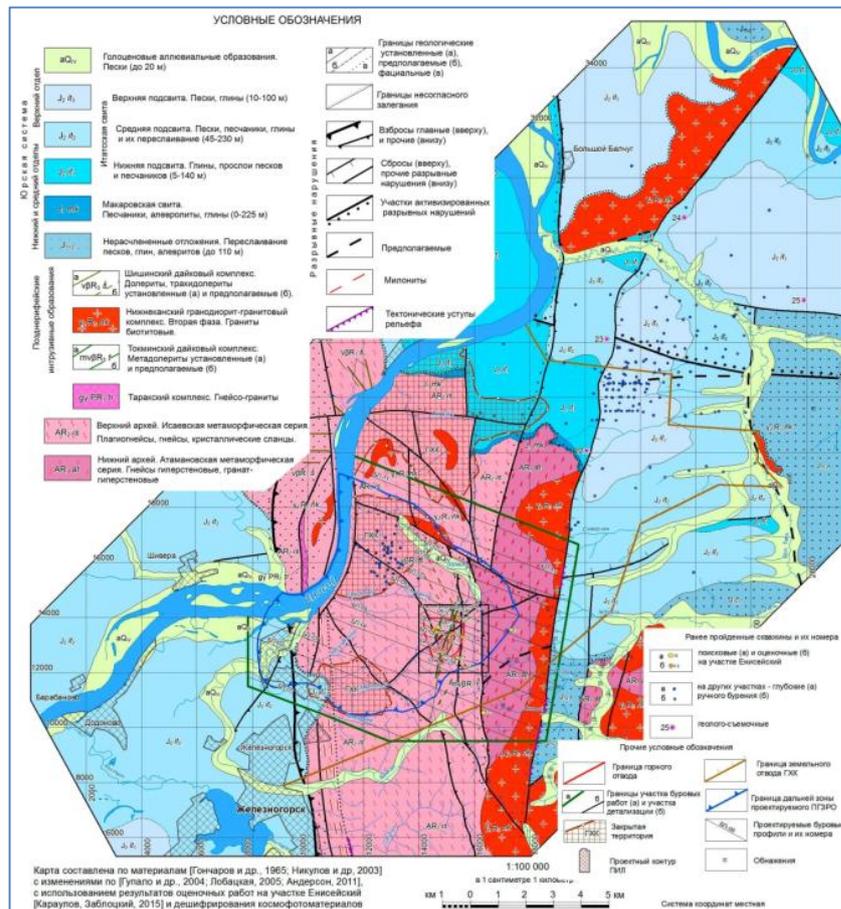


Рисунок 5.2.2 – Геологическая карта участка «Енисейский»

Основываясь на схеме разрывных нарушений, показанных на рисунке 2.1.2. На модели дальней зоны были заданы разрывные нарушения в виде вертикальных областей. По мнению автора, данное приближение является допустимым, т. к. основные структурные элементы являются крутопадающими с углом падения  $\sim 70-80$  градусов. На рисунке 5.2.3 приведено модельное расположение основных разрывных нарушений в пределах границ дальней зоны.

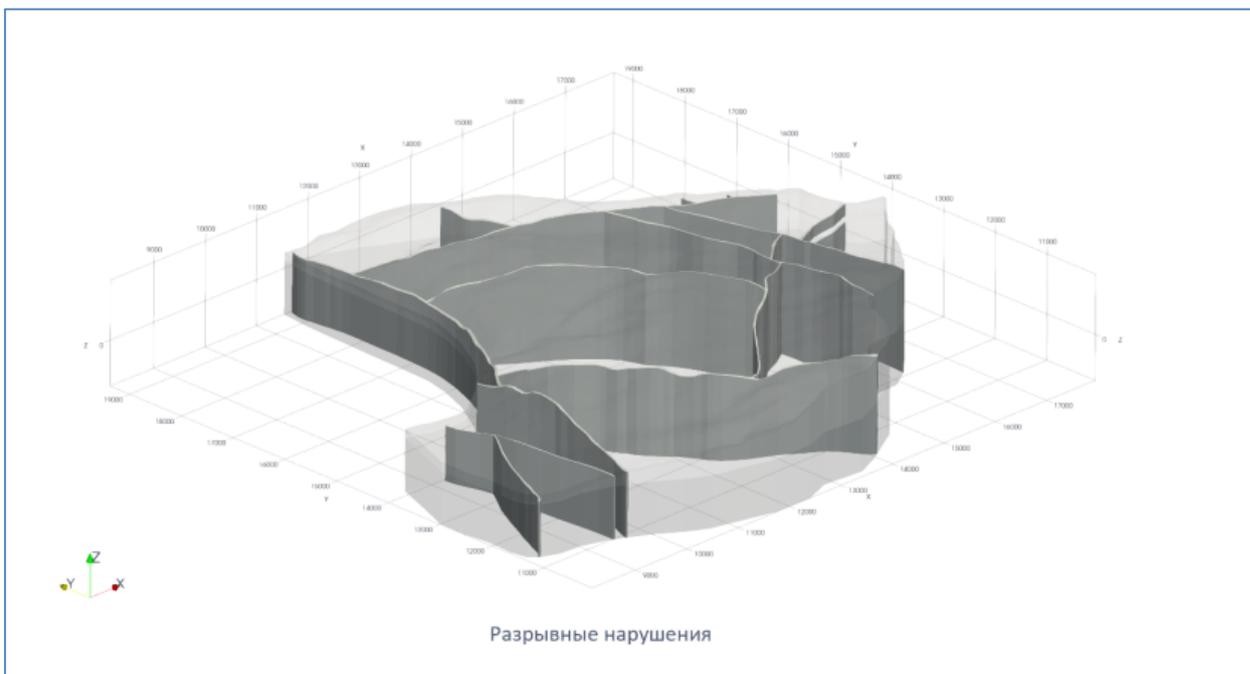


Рисунок 5.2.3 – Модельное расположение основных разрывных нарушений (вид сбоку)

Для оценки качества модели использовался визуальный подход по гистограмме частоты встречаемости разницы между фактическими и расчетными данными по скважинам см. рисунок 5.2.4. Метрика (SRMS), с помощью которой можно дать оценку качества модели, определяется по всем скважинам по следующей формуле:

$$SRMS = \frac{RMS}{\Delta H} \cdot 100\% , \quad (5.1)$$

где  $\Delta H$  – разница между минимальным и максимальным фактическим напором на данной территории. Для моделируемой области  $\Delta H$  составляет 162.5 м. RMS в формуле выше – среднее квадратическое из ошибки, которое рассчитывается по формуле:

$$RMS = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (cal_i - obs_i)^2 \right]^{1/2} \quad (5.2)$$

В результате получена среднеквадратическая ошибка по уровню подземных вод. Ошибка SRMS составила около 6%. Полученную оценку можно охарактеризовать, как приемлемую.

В ходе многочисленных вариантов расчетов и отбраковки непригодных результатов был получен график сопоставления фактических и модельных результатов расчетов см. рисунок 5.2.5.

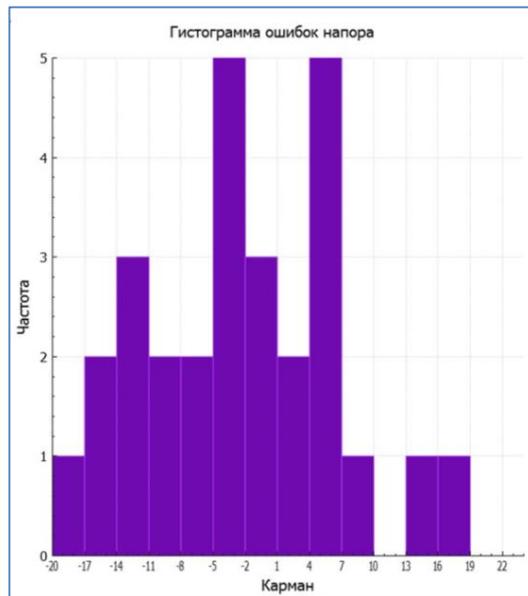


Рисунок 5.2.4 – Гистограмма частоты встречаемости разницы между фактическими и расчетными данными напоров по скважинам

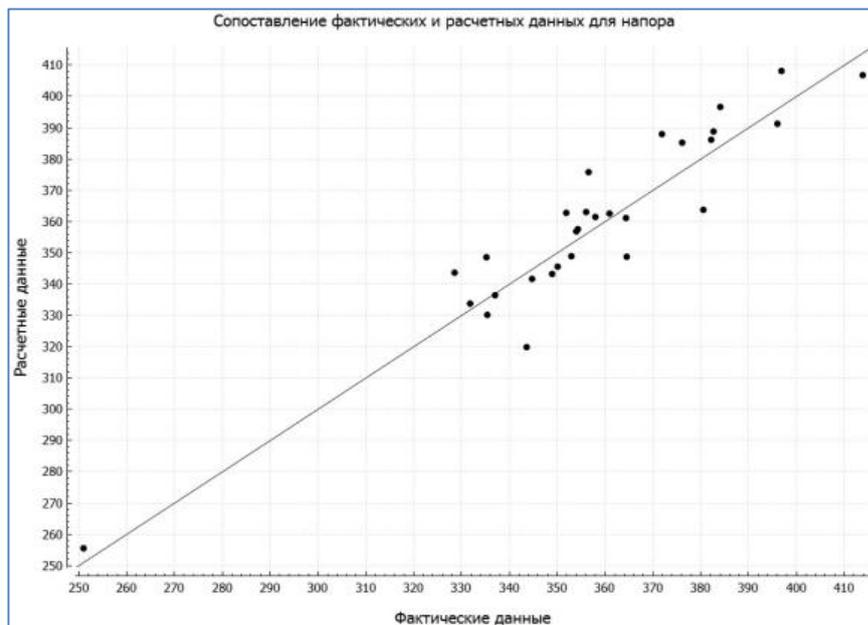


Рисунок 5.2.5 – Сопоставление фактических и расчетных значений напоров

В таблице 5.1 приведены коэффициенты фильтрации, которые были определены в результате калибровки модели. Полученные значения согласуются с опытно-фильтрационными работами, проведенными на рассматриваемой территории.

Таблица 5.1. Параметры модели в рамках концепции пористой среды.

Материал	Коэффициент фильтрации, м/сут	Инфильтрационное питание, м/сут
Неоген четвертичные отложения	0.05	0.00028
Матрица (2-8 слой)	0.001	
Матрица (9-16 слой)	0.00005	
Разрывные нарушения	0.1	

В таблице 5.2 приведены результаты расчетов по фактическим и расчетным значениям напора. Можно заметить, что для некоторых точек наблюдается несоответствие более чем на 10 метров. Это связано с тем, что в модели не учитывается детальное геологическое строение около горной части ФГУП «ГХК», т. к. по этой части участка «Енисейский» отсутствуют достоверные геологические данные, которые можно использовать при моделировании. Еще одна сложность заключается в том, что на рассматриваемом участке рельеф имеет сложную структуру. Учитывая размеры дальней зоны и перепады абсолютных отметок рельефа от 120 до 430 метров, при создании цифровой модели рельефа возникают небольшие не состыковки с фактическими абсолютными отметками. В ходе данной работы величина несоответствия в некоторых случаях достигала от нескольких сантиметров до 5 метров. Данные несоответствия, хоть и небольшие, но вносят некоторые неопределенности в данную модель.

Таблица 5.2 – Расчетные и фактические значения напора

Скважина	Расчет	Наблюдение
6201	255.4	251
6207	361.1	364.3
6209	361.4	357.9
6210	348.5	335.2
6211	330.1	335.4
6218	362.5	360.9
6219	363	356.0
6220	357.5	354.3

6221	343.2	348.9
6222	336.4	337
6223	348.7	364.5
6225	343.6	328.5
6226	345.5	350.1
6230	362.7	351.9
7404	341.6	344.7
7406	333.7	331.8
7407	356.8	354
7903	348.8	352.9
R10	396.6	384
R1	387.9	371.8
R2	408.1	396.8
R4	388.7	382.6
R5	375.7	356.5
R6	385.1	376
R7	391.2	396
R8	386	382.1
R9	406.7	413.8

На рисунке 5.2.6 показано решение фильтрационной задачи. В ходе решения обратной задачи уточнялись значения фильтрационных параметров. Завершением процесса решения обратной задачи и критерием достоверности построенной модели являлась величина среднеквадратичного отклонения модельных уровней подземных вод от замеренных. Для калибровки модели использовались замеры уровней в наблюдательных скважинах. В ходе калибровки модели был уточнён коэффициенты фильтрации для всех слоёв, а также инфильтрационное питание. По результатам моделирования и на основе фактических данных величина инфильтрационного питания, заданного на модели, составила 0.00028 м/сут.

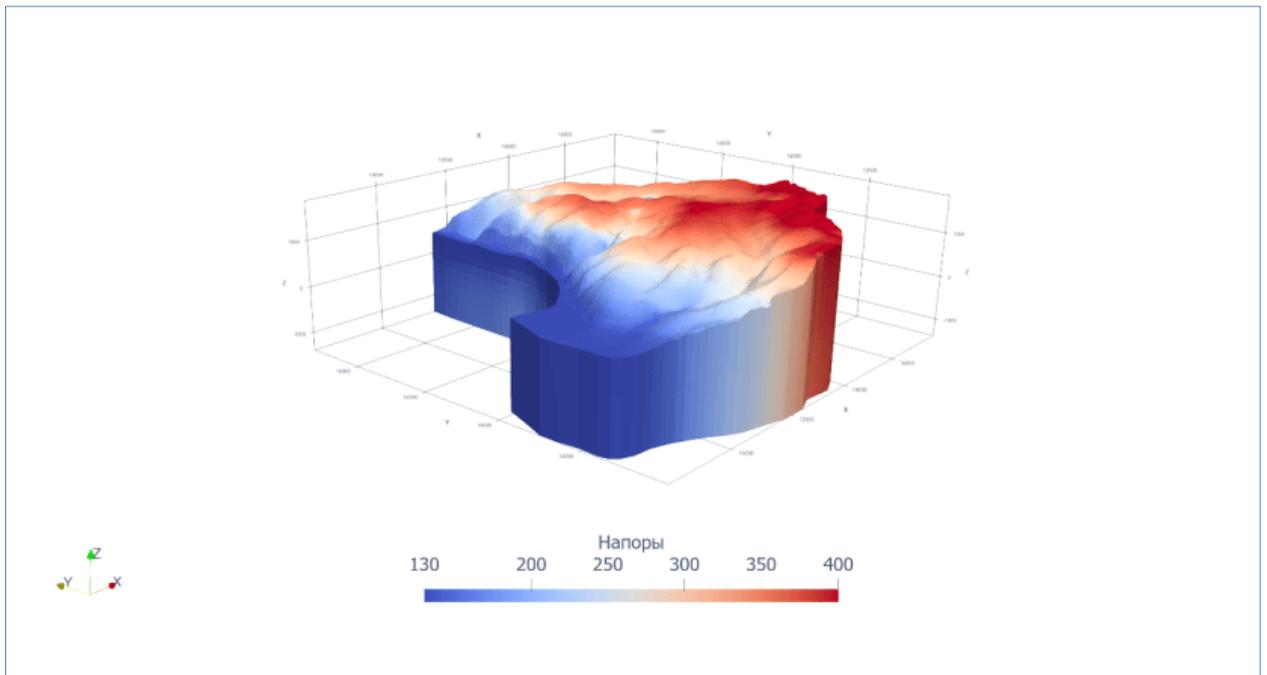


Рисунок 5.2.6 – Положение свободной поверхности на модели дальней зоны (вид сбоку)

На рисунке 5.2.7 приведена модельная карта гидроизопьез для целевого горизонта. Движение подземных вод направлено в сторону р. Шумиха в направлении р. Енисей, а также наблюдается отклонение в сторону ручья Меркурьев. Такое отклонение наблюдается за счет того, что по распаду руч. Меркурьев проходит разлом Безымянный. На рисунке 5.2.8 приведена схема расположения локального разлома Безымянный. На ней отчетливо видно, где разлом Безымянный проходит через территорию площадки. Данный разлом был выделен на основе геофизических данных, но до сих пор бурением не вскрыт.

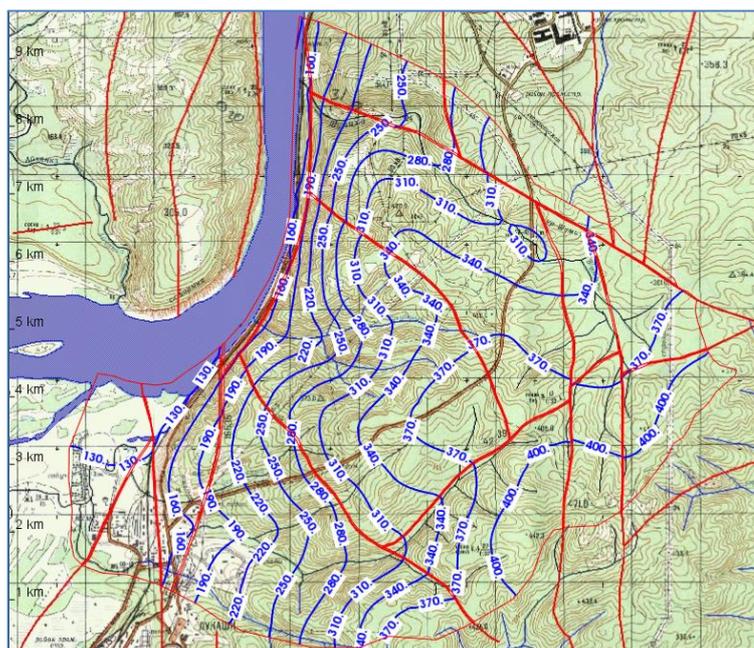


Рисунок 5.2.7 – Модельная карта гидроизопъез для целевого горизонта

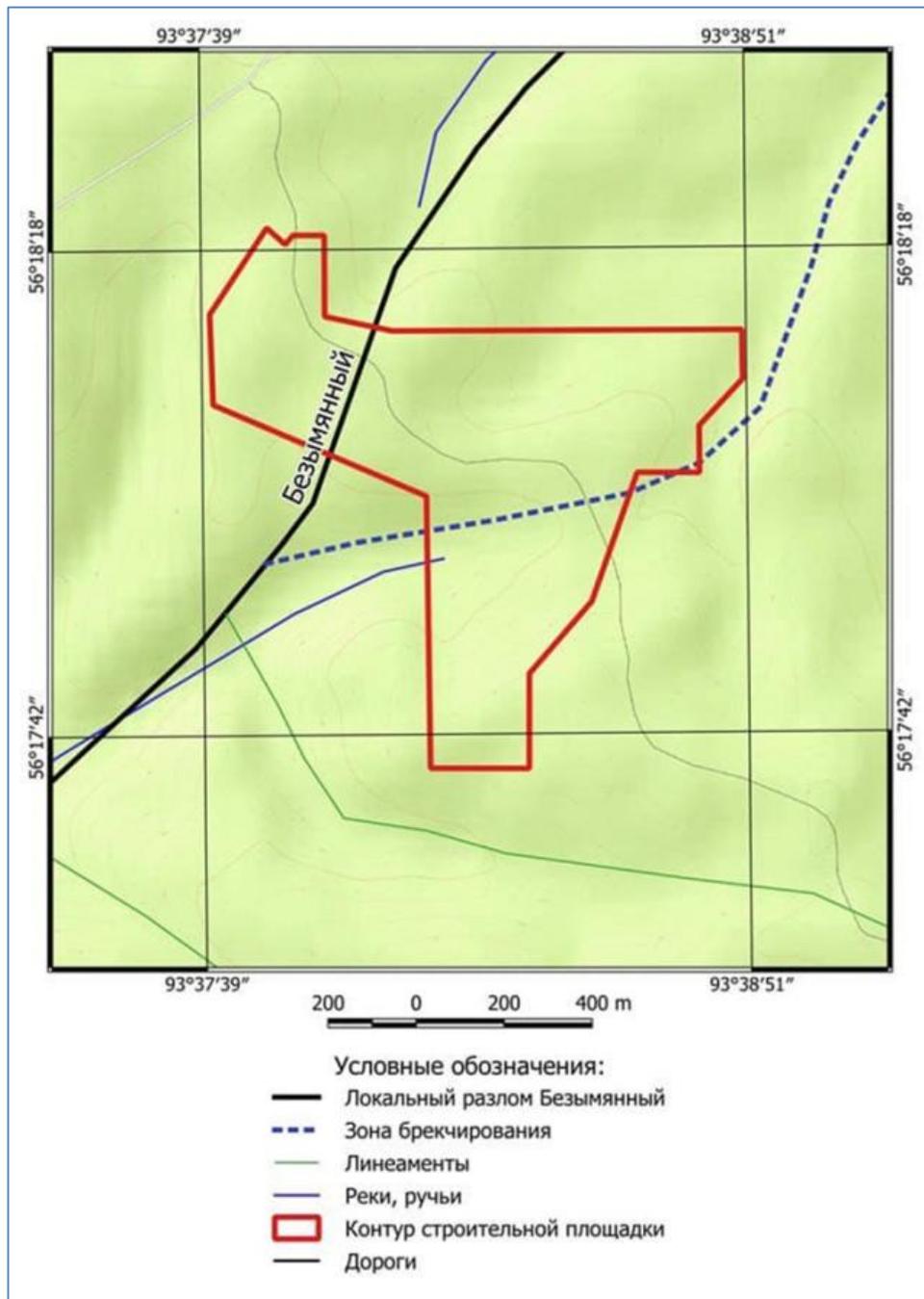


Рисунок 5.2.8 – Положение локального разлома Безымянный на участке Енисейский

Для калибровки моделей также использовались фактические данные расхода рек. Расходными характеристиками, получаемыми на модели, являются данные разгрузки потока подземных вод в речную сеть, которые можно сравнить с фактическими расходами рек, см. рисунок 5.2.9. Для калибровки модели рассматривался летний (июль–сентябрь) меженный сток основных рек водосборной площади, характеризуемый данными, которые приведены в таблице 5.3. Калибруемым параметром был коэффициент фильтрации донных

отложений. Удовлетворительное соответствие модельных расходов рек фактическим было достигнуто при коэффициенте фильтрации 0,001-0,01 м/сут. Общий водный баланс модели приведен в таблице 5.4. Из нее видно, что основной объем поступившей в пласт воды (80 %) перехватывается мелкими водотоками. Лишь 12% и 8% подземных вод разгружаются в р. Енисей и озера напрямую соответственно. Также отметим, что в верховьях мелкие реки теряют свой сток, питая подземные воды (8,9 тыс. м<sup>3</sup>/сут).

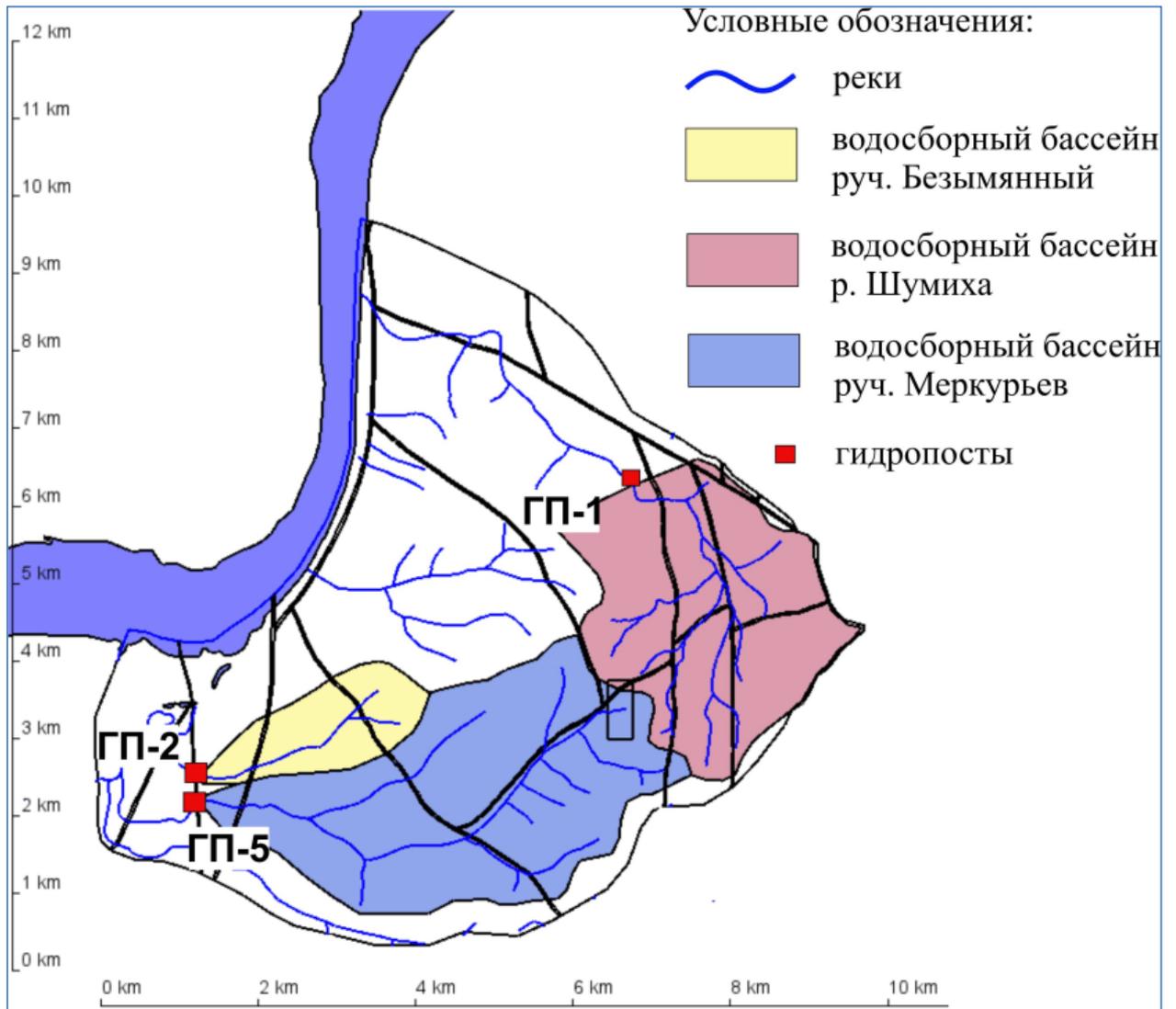


Рисунок 5.2.9 – Расположение водосборных бассейнов на модели

Таблица 5.3 – Сопоставление фактических и модельных расходов рек в пределах водосборной площади

Водоток	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Фактический расход, м <sup>3</sup> /сут		Модельный расход, м <sup>3</sup> /сут
		2017–2018	2018–2019	
р. Шумиха (ГП-1)	8,72	3 688	2 084	2803

руч. Безымянный (ГП-2)	2,50	399	289	295
руч. Меркурьев (ГП-5)	11,53	3 120	4 316	3626

Таблица 5.4 – Водный баланс модели

Статьи баланса	Поступило в модель, тыс. м <sup>3</sup> /сут	Вышло из модели, тыс. м <sup>3</sup> /сут
Инфильтрационное питание	14,1	0
р. Енисей	0	2,7
Озера	0	1,7
Мелкие реки и ручьи	8,9	18,6
Сумма	23	23

\*площадь модели 50,5 км<sup>2</sup>

Как видно, данные моделирования вполне согласуются с фактическим гидрологическим материалом (ГП-1, 2, 5). Погрешность в среднем составляет 20%, что является допустимым для территории с низкой плотностью сети пунктов гидрологических и гидрогеологических наблюдений.

#### *Геомиграционное моделирование*

В результате решения геофильтрационной задачи можно выполнять прогнозы по распространению загрязнителя с учетом процессов адвекции, диффузии, дисперсии и сорбции.

Коэффициент диффузии для всех слоев модели принят равным  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/сут для консервативности расчетов, что соответствует высоким значениям для рассматриваемых пород согласно [65].

На сегодня существуют различные подходы для определения параметра дисперсивности. Так, согласно [65], можно считать установленным, что при больших масштабах переноса в реальных (трехмерных) гомогенных системах продольная гидродисперсия хорошо описывается линейной зависимостью от скорости фильтрации с постоянным параметром  $\delta_L$  (продольная гидродисперсия). Применимость такого представления определяется размером репрезентативного объема среды: он должен содержать достаточно большое число (грубо говоря, десятки) «пересечений», по которым идет обмен веществом между основными водопрводящими элементами среды. При этом

авторы подчеркивают, что для относительно однородных по гранулометрическому составу пористых пород, коэффициент  $\delta L$  может достигать нескольких десятков сантиметров. В работах [65, 66] проводились исследования по изучению параметра гидродисперсии. Авторы приходят к выводу, что параметр продольной дисперсивности можно описать следующим соотношением: (5.3)

$$L < 100 \text{ м}; \delta_L = 0.0017 L^{1.5} \quad (5.3)$$

$$L > 100 \text{ м}; \delta_L = 0.32 L^{0.83} \quad (5.4)$$

где  $L$  – длина пути фильтрации,  $\delta L$  – продольная гидродисперсия. Полученные оценки нашли свое отражение в документе [53]. Также стоит отметить, что в более ранних исследованиях [45] была получена следующая зависимость:

$$\alpha_L = 0.83(\lg L)^{2.414}, \quad (5.5)$$

На основе вышеприведенной зависимости величина продольной дисперсивности составила 18,3 м, величина поперечной дисперсивности принимается в 10 раз меньше от продольной согласно [46].

Начальная активность для  $^{129}\text{I}$  задавалась равной  $1 \cdot 10^{10}$  Бк. Поступление радионуклидов из ПГЗРО моделировалось в виде точечного источника, расположенного в 9-ом модельном слое, что соответствует фактическому месту расположения рассматриваемого объекта. Получена удельная активность в точке мониторинга приведены без учета разбавления в реке Енисей, см. рисунок 5.2.10, ореол распространения на момент времени 10 000 лет показан на рисунке 5.2.11.

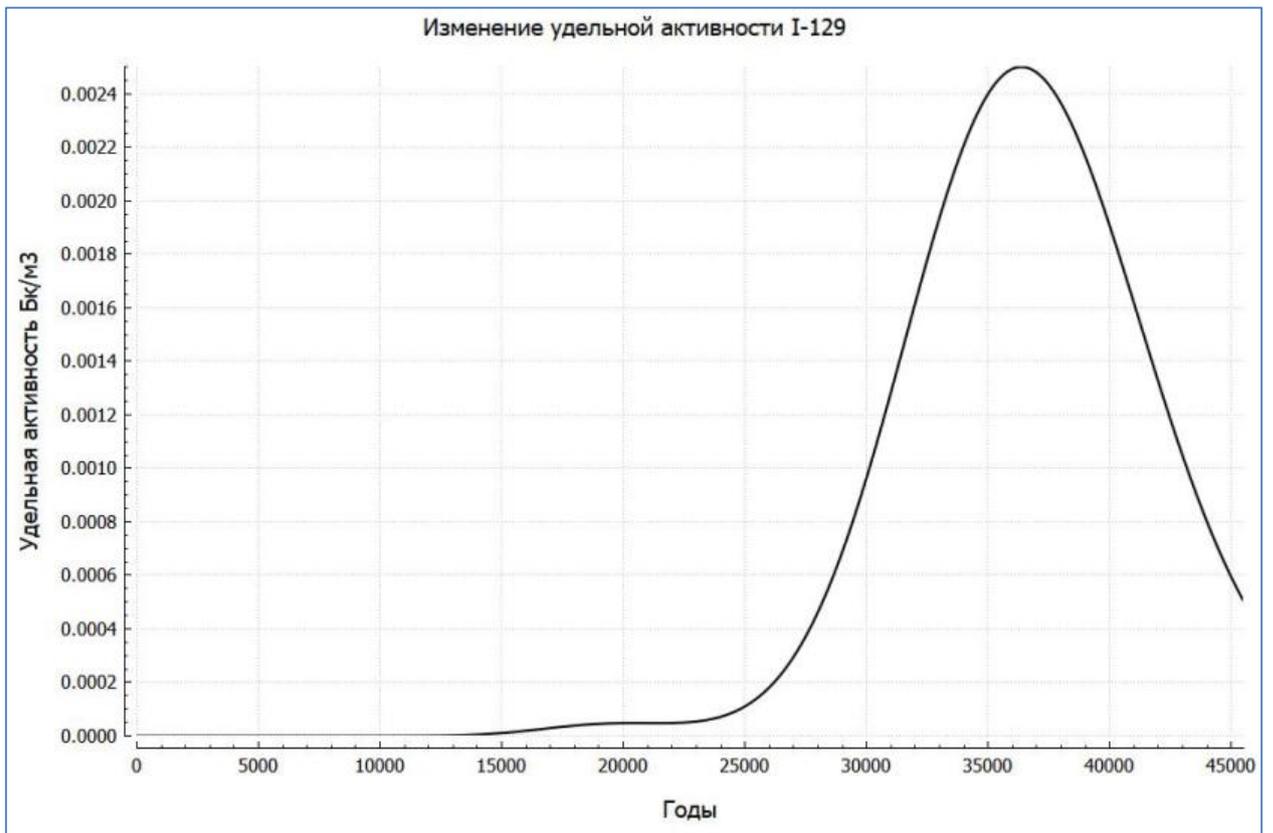


Рисунок 5.2.10 – Прогноз изменения удельной активности  $^{129}\text{I}$  в р. Енисей

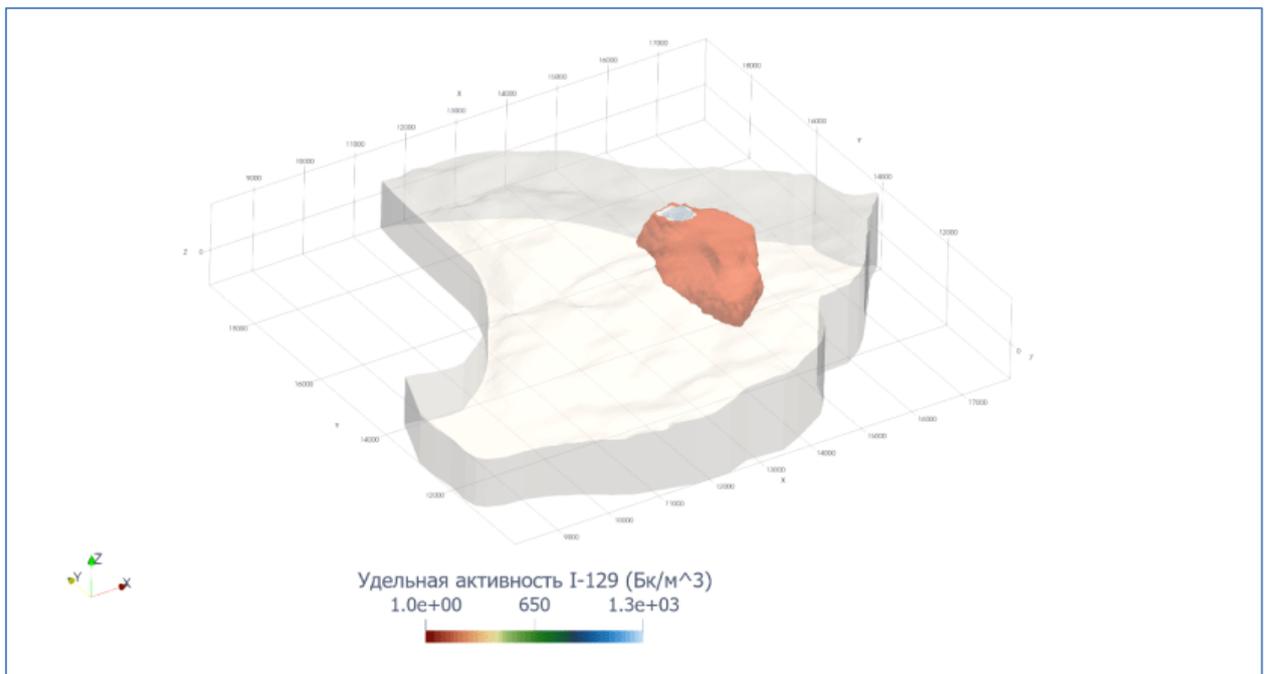


Рисунок 5.2.11 – Прогнозный ореол распространения  $^{129}\text{I}$  на момент времени 10 000 лет  
(вид боку)

По результатам моделирования можно отметить, что пик прихода загрязнения до р. Енисей составил 36 300 лет с удельной активностью 0,0024 Бк/м<sup>3</sup> для <sup>129</sup>I, что ниже 0,1 УВ <sup>129</sup>I в питьевой воде в 51 000 раз.

#### 5.2.2 Разработка и калибровка моделей дальней зоны на основе концепций дискретной среды

Модели дальней зоны проектируемого ПГЗРО на участке Енисейский, реализованы с применением расчетного комплекса GeRa/V1. В них учитываются региональные разрывные нарушения, которые находятся в пределах границ модели дальней зоны, а также в модели реализованы разрывные нарушения третьего порядка: Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский, Меркурьевский. Фильтрационный поток моделируется в напорной постановке, его пространственная структура принимается трехмерной. Отличительная особенность модели заключается в том, что структурные элементы были реализованы поверхностями, проходящими через ось структурного элемента. Разрывные нарушения третьего порядка были реализованы в соответствии с их реальными предполагаемыми простираниями и падениями. Истинную мощность разрывных нарушений приходилось оценивать по аналогии с разрывными нарушениями, вскрытыми бурением на участке «Енисейский».

Модель совпадает с основными характеристиками модели, описанной в пункте 5.2.1, и при этом включает в себя разрывные нарушения третьего порядка и содержит 522 056 ячеек.



Рисунок 5.2.12 – Сетка расчетной области (вид в плане)

Была получена модельная реализация данных разрывных нарушений, см. рисунки 5.2.13, 5.2.14. В модели были учтены как основные разрывные нарушения (РН), так и разрывные нарушения третьего порядка. Главные РН учитывались как вертикальные. Такое допущение было связано с тем, что они являются крутопадающими с углом падения  $\sim 70-80$  градусов. Расчет фильтрации и миграции с учетом разрывных нарушений третьего порядка, был реализован с помощью DFM модели. DFM модель позволяет явно разрешить трещины на расчетной сетке. Течение и перенос моделируются и в трещине, и в пористой матрице с учетом обмена между ними. Таким образом, расчет происходит в области со смешанной размерностью: на двумерных многообразиях в трещине, и в 3D в пористой среде.

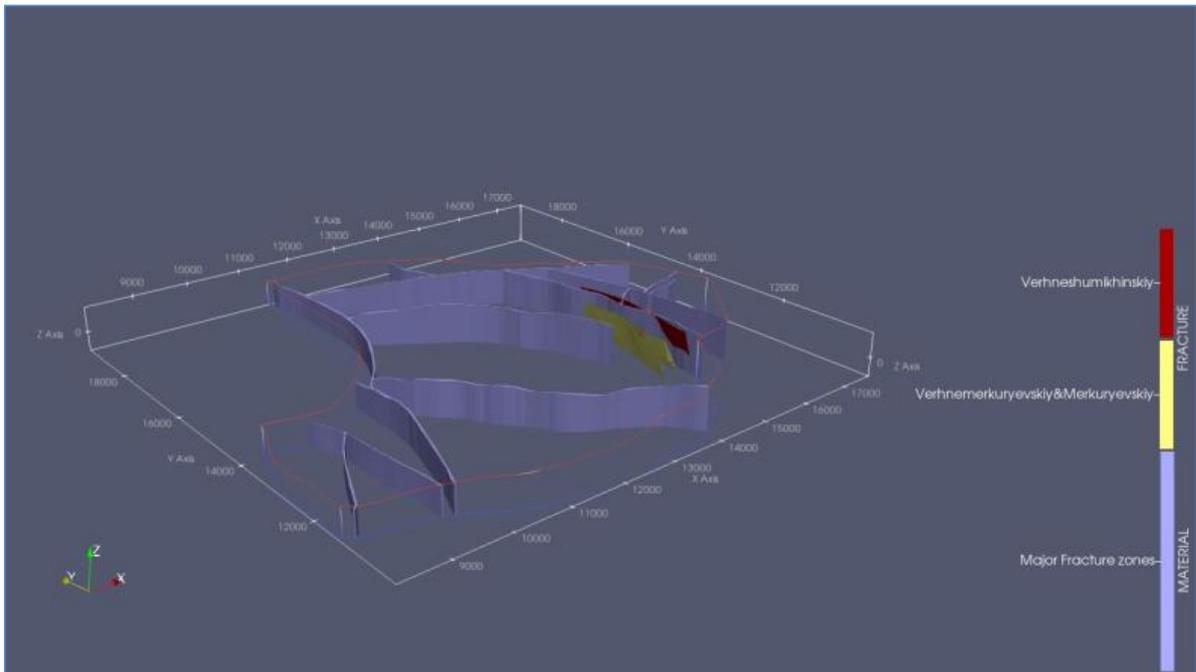


Рисунок 5.2.13 – Модельная реализация разрывных нарушений в пределах дальней зоны  
(вид сбоку)

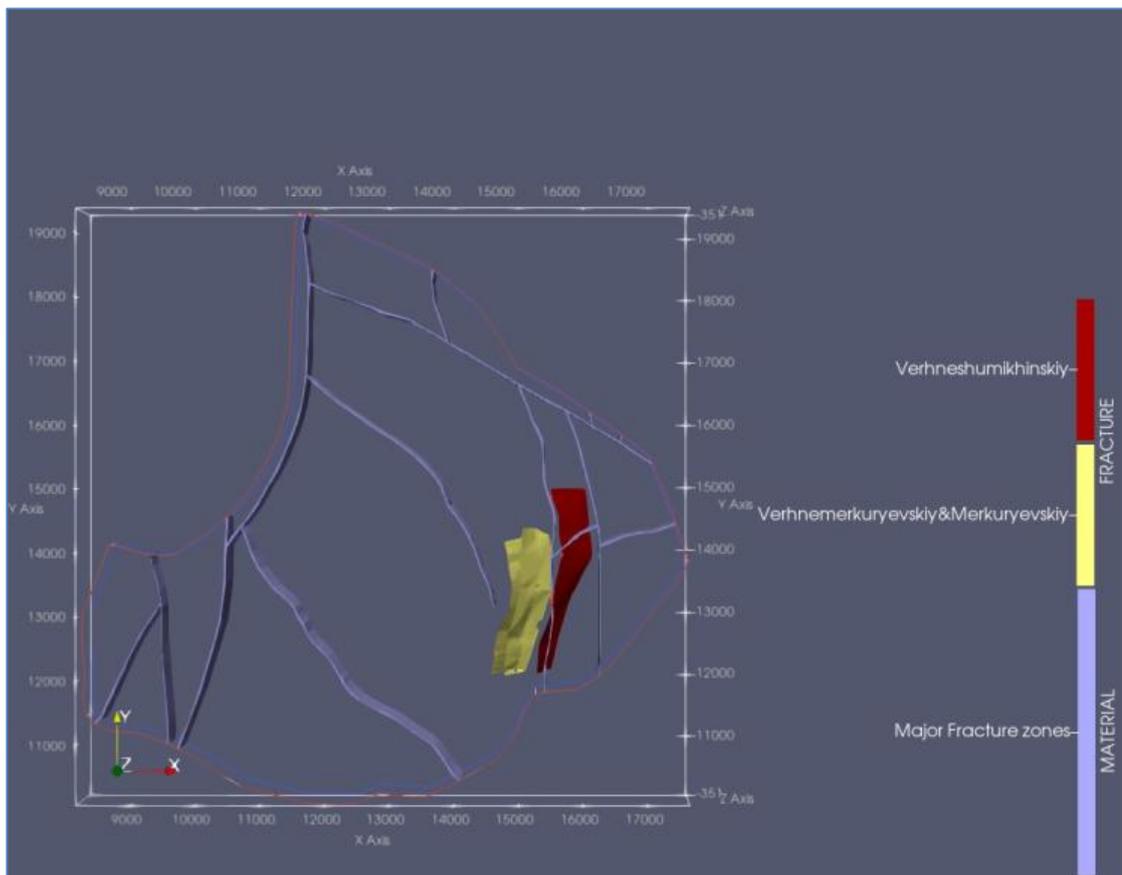


Рисунок 5.2.14 – Модельная реализация разрывных нарушений в пределах дальней зоны  
(вид сверху)

На графике 5.2.15, представлена гистограмма частоты встречаемости разницы между фактическими и расчетными данными напоров по скважинам, полученная по результатам калибровки модели. На рисунке 5.2.16 приведено сопоставление фактических и расчетных значений напоров по скважинам. Можно заметить, что данные рисунки совпадают с рисунками на странице 97. Это объясняется тем, что решение фильтрационной задачи практически одинаково как для концепции в рамках пористой среды, так и для дискретной среды.

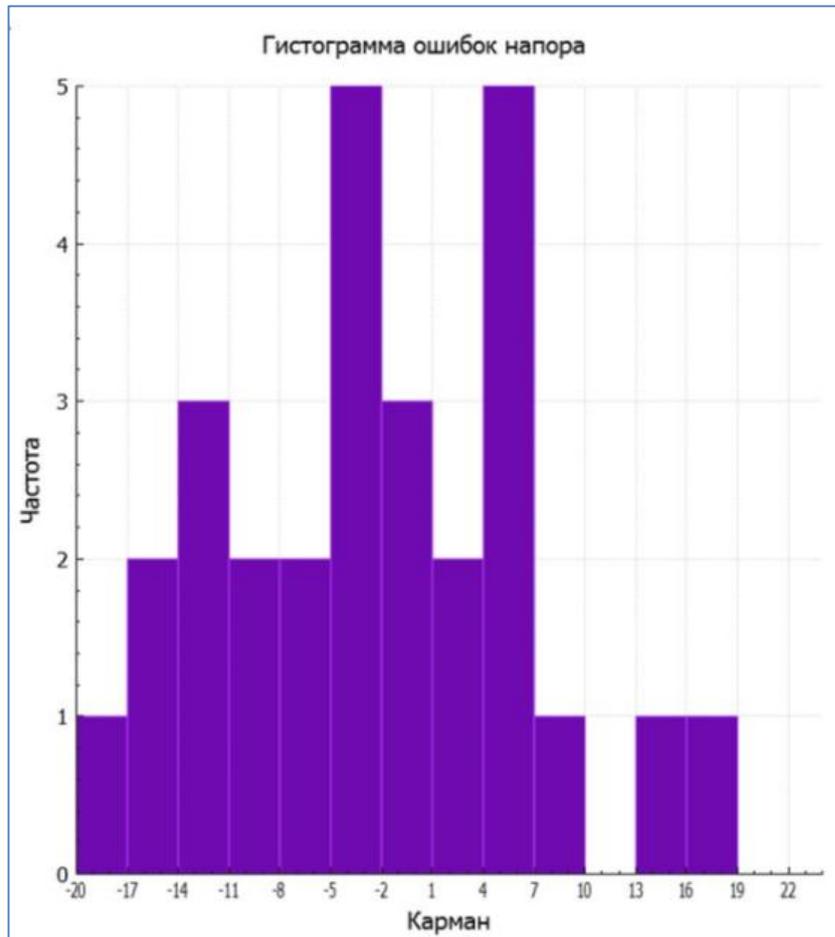


Рисунок 5.2.15 – Гистограмма частоты встречаемости разницы между фактическими и расчетными данными напоров по скважинам

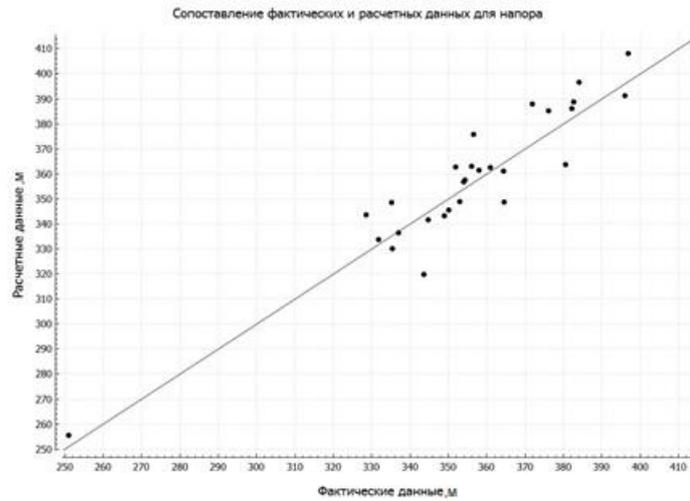


Рисунок 5.2.16 – Сопоставление фактических и расчетных значений напоров

В таблице 5.5 приведены коэффициенты фильтрации, которые были определены в результате калибровки модели и которые совпадают с результатами калибровки модели, приведенной в пункте 5.2.1. Величина инфильтрационного питания составила 0.00028 м/сут.

Таблица 5.5 – Параметры модели DFM

Материал	Коэффициент фильтрации, м/сут
Неоген-четвертичные отложения	0.05
Матрица (2-8 слой)	0.0005
Матрица (9-16 слой)	0.00005
Разрывные нарушения	0.1

В таблице 5.6 отражены параметры разрывных нарушений третьего порядка, принятые в модели.

Таблица 5.6 – Параметры материалов разрывных нарушений

Параметры	Верхнешумихинский	Меркурьевский	Верхнемеркурьевский
Мощность, м	15	10	10
Активная пористость	0.1	0.1	0.1
Проницаемость, м/сут	0.1	0.1	0.1

В рамках построенной геофильтрационной модели также решалась геомиграционная задача прогноза распространения загрязнителя по аналогии с пунктом 5.2.1. В модели рассматривалась миграция  $^{129}\text{I}$ . Сорбция принималась нулевой. Величина продольной и поперечной дисперсивности принята, как и в пункте 5.2.1.

Поступление загрязнителя моделировалось в виде точечного источника, расположенного в 9-м модельном слое. На рисунке 5.2.17, приведены результаты моделирования на момент времени 10 000 лет. Важно отметить, что высокие удельные активности загрязнителя остаются локализованы в области двух разрывных нарушений третьего порядка, а именно Верхнемеркурьевского и Меркурьевского РН.

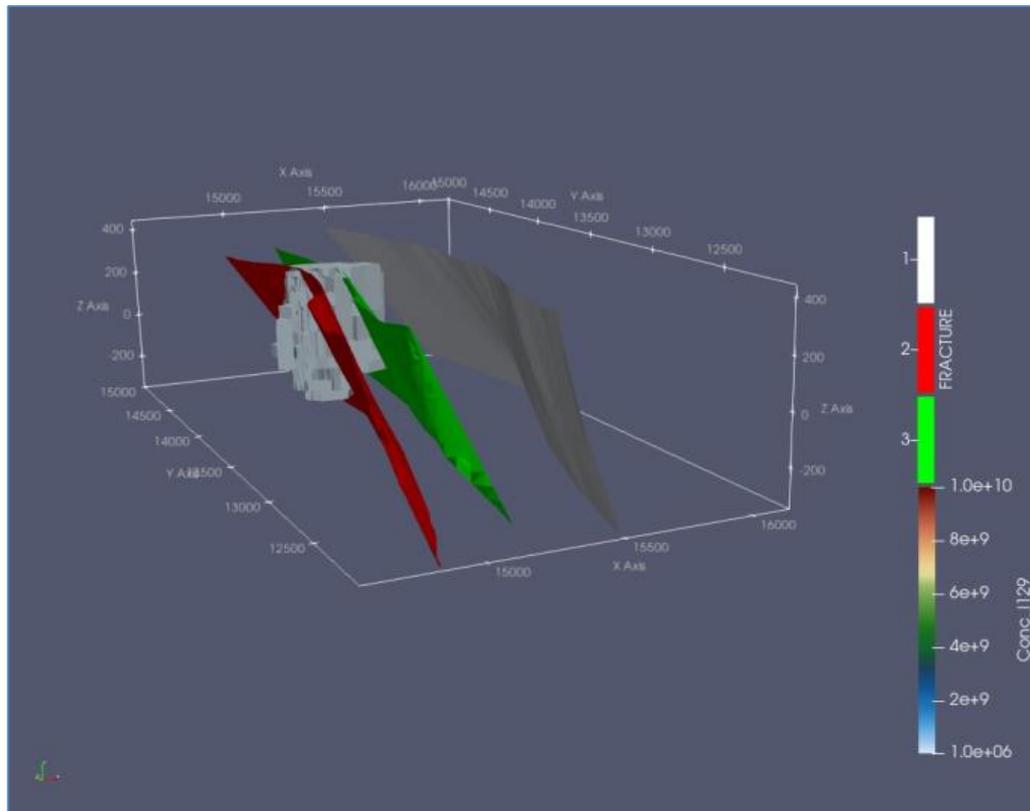


Рисунок 5.2.17 – Область распространения  $^{129}\text{I}$  на момент времени 10 000 лет (вид сбоку)

### 5.3 Анализ чувствительности трехмерной модели

Описанные выше примеры моделирования поднимают очень важный в контексте обоснования долговременной безопасности вопрос анализа и сравнения альтернативных моделей. В силу того, что любая модель геологической среды является упрощением, наличие нескольких концептуализаций неизбежно, и учитывать соответствующие неопределенности и то, как они влияют на итоговые оценки безопасности, обязательно нужно.

В данном пункте дана оценка чувствительности трехмерной модели, выполненной в рамках концепции пористой среды. В силу того, что некоторые параметры определены недостаточно точно, анализ того, как такая неопределенность повлияет на итоговую оценку, является необходимым шагом разработки модели [67, 68]. Анализ чувствительности осуществлялся при помощи кода MOUSE [40, 41].

Так, для трехмерной модели, описанной в пункте 5.2.1, был выбран набор задаваемых параметров. Анализ чувствительности был выполнен следующим образом: на откалиброванной геомиграционной модели задавался несорбируемый трассер в девятом модельном слое с суммарной активностью  $1 \cdot 10^{10}$  Бк по аналогии с пунктом 5.2.1. Оценка чувствительности проводилась для пика изменения удельной активности с течением времени в точке наблюдения, расположенной в верховьях реки Шумихи, т. к. через нее проходит основной поток подземных вод на рассматриваемой модели. В таблице 5.7 приведен диапазон параметров.

Таблица 5.7 – Диапазоны параметров трехмерной модели

Название параметров	От (м/сут)	До (м/сут)
Коэффициент фильтрации тектонического нарушения Шумихинский	0,001	1
Коэффициент фильтрации тектонического нарушения Безымянный	0,001	1
Инфильтрационное питание	0,0001	0,0004
Коэффициент фильтрации тектонического нарушения Верхнешумихинского	0,001	1
Коэффициент фильтрации матрицы 2-8 слоев	0,00005	0,001
Пористость остальных тектонических нарушений	0,05	0,25
Коэффициент фильтрации матрицы 9-16 слоев	0,00001	0,001
Коэффициент фильтрации остальных тектонических нарушений	0,001	1
Пористость тектонического нарушения Безымянный	0,05	0,25
Коэффициент фильтрации четвертичных отложений	0,05	1
Пористость матрицы 9-16 слоев	0,001	0,01
Пористость тектонического нарушения Верхнешумихинского	0,05	0,25
Пористость тектонического нарушения Шумихинский	0,05	0,25
Пористость матрицы 2-8 слоев	0,001	0,01

Расчеты выполнялись на период времени 100 000 лет, такой период времени был выбран с запасом, т. к. время миграции может увеличиться для некоторых из перебираемых

в процессе анализа чувствительности комбинаций параметров. Выборка составила 5000 расчетов согласно [69]. На рисунке 5.3.1 приведены результаты анализа чувствительности: индексы Соболя [70] первого порядка и полного вклада.

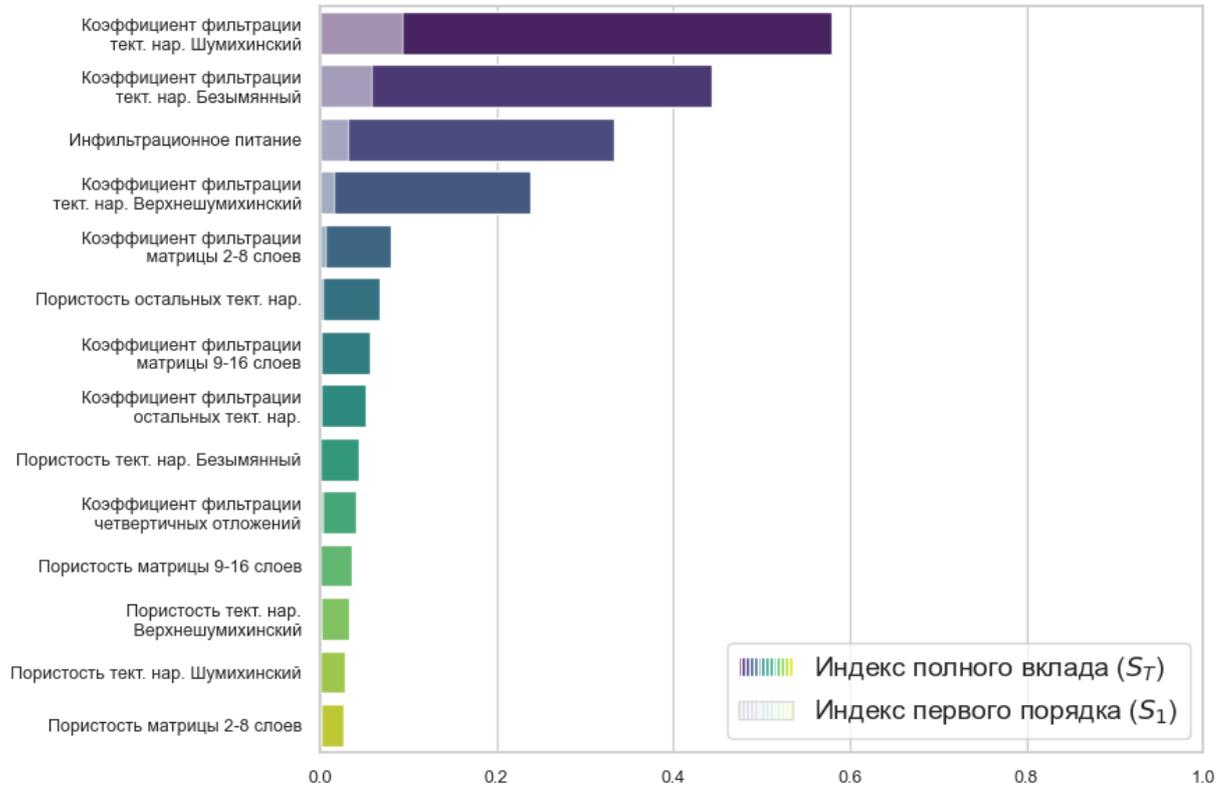


Рисунок 5.3.1 – Анализ чувствительности методом Соболя для трехмерной модели, выполненной на основе концепции пористой среды

По результатам выполненного анализа чувствительности можно сделать несколько выводов. Параметрами, которые в наибольшей степени влияют на перенос загрязнителя с течением времени, являются коэффициенты фильтрации трех тектонических нарушений Шумихинского, Безымянного, Верхнешумихинского и инфильтрационное питание. Остальные параметры влияют в меньшей степени. Другой вывод заключается в том, что основная миграция происходит в пределах трех тектонических нарушений и знания о фильтрационных характеристиках данных структур является важной с точки зрения долговременной безопасности.

Знания об этих разрывных нарушениях основываются в том числе и на данных геофизических исследований. Однако, необходимо верифицировать истинное положение данных разрывных нарушений и выяснить взаимосвязь с другими разрывами, такая комплексная работа поможет детализировать существующие модельные представления и приблизиться к более точным оценкам.

Инфильтрационное питание является важной балансовой составляющей модели, больше половины входящего объема воды приходится на инфильтрационное питание, см. таблицу 5.4. В дальнейшем планируется учитывать распределенное инфильтрационное питание по площади с учетом метеоклиматических, ландшафтных, гидрогеологических и других характеристик.

## Заключение

В рамках диссертационного исследования разработаны и обоснованы расчетными, аналитическим и экспериментальными методами трехмерные модели, обеспечивающие возможность дальнейшего развития обоснования долговременной безопасности первого в России пункта глубинного захоронения РАО на примере участка «Енисейский».

В результате выполнения диссертационной работы были:

1. Разработаны, параметризованы и верифицированы модели для обработки и интерпретации результатов опытно-фильтрационных работ (откачек и опытных нагнетаний в скважинах, пакерных поинтервальных исследований). На их основе установлено, что:

- в пределах кустов скважин 2Ц – Р-2 – 2-2 и 7Ц – Р-7 – 7-2 коэффициент фильтрации вмещающей среды (гнейсов) оценивается величиной от 2 до 3 раз меньшей, по сравнению со значениями, полученными на основе традиционной аналитической обработки. Это обеспечивает существенное снижение консерватизма ранее имеющихся представлений.

- двухпакерный снаряд при использовании в кристаллических породах обеспечивает надежную изоляцию изучаемых интервалов, что исключает перетоки подземных вод и даёт наиболее достоверную величину при определении фильтрационных характеристик;

2. Разработан алгоритм анализа гидрогеологических условий с применением численного моделирования (на основе плановой и профильной геофильтрационных моделей) для определения значимых для обоснования долговременной безопасности характеристик потока подземных вод, позволяющий оценить влияние структурных элементов геологической среды, определяемых на основе опытных работ, в том числе:

- обнаружены закономерности для значений проницаемости различных структурных элементов, связанные с уровнем трещиноватости;

- на основе использования плановой геофильтрационной модели выявлено существенное влияние структурных элементов на поток подземных вод.

3. На основе анализа чувствительности трехмерной модели к фильтрационным свойствам основных разрывных нарушений обоснован перечень гидрогеологических параметров кристаллической среды, наиболее значимых для обоснования долговременной безопасности пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Параметрами, в наибольшей степени влияющими на интенсивность переноса загрязнителя из области размещения РАО, являются: коэффициенты фильтрации трех тектонических нарушений Шумихинского, Безымянного, Верхнешумихинского и показатели инфильтрационного питания.

4. Определено, что основная миграция происходит в пределах трех тектонических нарушений, знания о фильтрационных характеристиках которых являются важными для

долговременной безопасности. Время миграции (пиковые значения) несорбируемого радионуклида до потенциальной зоны разгрузки составляет около 36 000 лет;

5. Показано, что для параметрического обеспечения расчетных моделей и последующего обоснования безопасности пунктов глубинного захоронения радиоактивных отходов необходимо применять трехмерное моделирование. Разработанные модели позволяют проводить прогнозные расчеты геомиграции загрязнителей в подземных водах и использоваться для таких задач, как расчет долговременных последствий реализации сценариев эволюции геологической среды на данной территории.

## Список сокращений

БД – база данных
ВАО – высокоактивные отходы
ГРР – геолгоразведочные работы
ГЭС – гидроэлектростанция
ДСП – для служебного пользования
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы
ЗАТО – закрытое административно-территориальное образование
МАГАТЭ – международное агентство по атомной энергии
МАЭ – метод аналитических элементов
НАО – низкоактивные отходы
НИОКР – Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НТС – Научно-технический совет
ОДБ – обоснование долговременной безопасности
ОИАЭ – объект использования атомной энергии
ООБ – отчет по обоснованию безопасности
ОФР – опытно-фильтрационные работы
ПГЗ ЖРО – пункт глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов
ПГЗРО – пункт глубинного захоронения радиоактивных отходов
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПЗРО – пункт захоронения радиоактивных отходов
ПИЛ – подземная исследовательская лаборатория
ППЗРО – пункт приповерхностного захоронения РАО
ПС – программное средство
РАО – радиоактивные отходы
РК – расчетный код
РОСНЕДРа – Федеральное агентство по недропользованию

САО – среднеактивные отходы
СДТ – модель системы дискретных трещин
СПС – модель сплошной пористой среды
ФГУП – Федеральное государственное унитарное предприятие
ФЗ – Федеральный закон
ФЦП – Федеральная целевая программа
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭГДА – электрогидродинамическая аналогия
ЭСПС – модель эквивалентной сплошной пористой среды
ЯРОО – ядерные и радиационно опасные объекты
СРМ– Continuous Porous Medium
DFM – Discrete Fracture Matrix
DFN – Discrete Fracture Network
EDZ – excavation damage zone
ЕРМ – Equivalent Porous Medium

#### Список использованных источников

1. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14 // Ядерная и радиационная безопасность. – 2015. № 4 (78). – С. 59–87.
2. Глоссарий МАГАТЭ по вопросам безопасности. Терминология, используемая в области ядерной безопасности и радиационной защиты. Издание 2007 года. – Международное агентство по атомной энергии. – Вена. – 2008. – 303 с.
3. Norris S. Radioactive waste confinement: clays in natural and engineered barriers– introduction // Geological Society, London, Special Publications. – 2017. – Vol. 443. – №. 1. – С. 1-8. DOI: 10.1144/SP443.26.
4. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, Specific Safety Guide No SSG-14, IAEA Safety Standards. – IAEA, Vienna, 2011. – 81p.

5. Radioactive Waste Management and Decommissioning. International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3: NEA/RWM/R(2019)1. – Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency, 2019. – URL: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_19906](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_19906).
6. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities: Review and enhancement of safety assessment approaches and tools. – Vienna, Austria: 2004. – URL: <https://www.iaea.org/publications/6971/safety-assessment-methodologies-for-near-surface-disposal-facilities>.
7. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste: Outcomes of the NEA MeSA Initiative : Radioactive Waste Management; NEA No. 6923 – Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency, 2012. – URL: [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_14608](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14608).
8. Цебаковская Н. С., Уткин С. С., Линге И. И., Пронь И. А. Зарубежные проекты захоронения ОЯТ и РАО. Часть I Актуальное состояние проектов создания пунктов глубинного захоронения в Европейских странах. Препринт / ИБРАЭ РАН, № ИБРАЭ-2017-03 М: ИБРАЭ РАН. – 2017.
9. Schwartz, M. O. Modelling groundwater contamination above a nuclear waste repository at Gorleben, Germany //Hydrogeology Journal. – 2012. – Т. 20. – №. 3. – С. 533-546. DOI:10.1007/s10040-011-0825-z.
10. Kirchof A. M. East-West German Transborder Entanglements through the Nuclear Waste Sites in Gorleben and Morsleben //Journal for the History of Environment and Society. – 2018. – Vol. 3. – P. 145-173.
11. Klinge H et al. Standortbeschreibung Gorleben, Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben [Description of the Gorleben site, part 1: hydrogeology of the cover rock of the Gorleben salt dome] // Geologisches Jahrbuch Reihe C. –2007. – Vol 71. – P. 5–147
12. Köthe A et al. Standortbeschreibung Gorleben, Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben [Description of the Gorleben site, part 2: the geology of the cover rock and country rock of the Gorleben salt dome]. Geologisches Jahrbuch Reihe C. – 2007. – Vol 72. – P. 5–201.
13. Bornemann O. et al. Standortbeschreibung Gorleben, Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars [Description of the Gorleben site, part 3: results of the

surface and underground exploration of the salt formation]. Geologisches Jahrbuch Reihe C 2008. – Vol 73. – P.5–211.

14. Oldenburg CM, Pruess K. Dispersive transport dynamics in a strongly coupled groundwater-brine flow system //Water Resources Research. – 1995. – Vol. 31. – №. 2. – P. 289-302.

15. Oldenburg C. M., Pruess K., Travis B. J. Reply to Comment on “Dispersive transport dynamics in a strongly coupled groundwater-brine flow system”. //Water Resources Research. – 1996. – Vol. 32. – №. 11. – P. 3411-3412.

16. Johns R. T., Rivera A. Comment on “Dispersive transport dynamics in a strongly coupled groundwater-brine flow system” by Curtis M. Oldenburg and Karsten Pruess //Water resources research. – 1996. – Vol. 32. – №. 11. – C. 3405-3410.

17. Konikow L. F., Sanford W. E., Campbell P. J. Constant-concentration boundary condition: Lessons from the HYDROCOIN variable-density groundwater benchmark problem //Water Resources Research. – 1997. – Vol. 33. – №. 10. – P. 2253-2261.

18. Mills R. T. et al. Simulating subsurface flow and transport on ultrascale computers using PFLOTRAN //Journal of physics: conference series. – IOP Publishing, 2007. – Vol. 78. – №. 1. – P. 012051.

19. Abdel-Karim A. A. M. et al. Experimental and modeling investigations of cesium and strontium adsorption onto clay of radioactive waste disposal //Applied Clay Science. – 2016. – Vol. 132. – P. 391-401.

20. Landais P. Advances in geochemical research for the underground disposal of high-level, long-lived radioactive waste in a clay formation //Journal of Geochemical Exploration. – 2006. – Vol. 88. – №. 1-3. –32-36.

21. Румынин В. Г. Опыт изучения глинистых толщ и кристаллических массивов как геологических сред для окончательной изоляции РАО //Радиоактивные отходы. – 2017. – №. 1. – С. 44-55.

22. Huysmans M., Dassargues A. Stochastic analysis of the effect of spatial variability of diffusion parameters on radionuclide transport in a low permeability clay layer //Hydrogeology Journal. – 2006. – Vol. 14. – №. 7. – P. 1094-1106.

23. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности N SSR-5. Серия изданий МАГАТЭ по нормам безопасности / МАГАТЭ. – Вена, 2011 г.

24. Wakasugi K. et al. A methodology for scenario development based on understanding of long-term evolution of geological disposal systems //Journal of nuclear science and technology. – 2012. – Vol. 49. – №. 7. – P. 673-688.
25. Vigfusson J. et al. European Pilot Study on The Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste. Case Study: Uncertainties and their Management. – 2007.
26. IAEA. Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste. IAEA TRS-391. – International Atomic Energy Agency, Vienna. –1999.
27. SKB R-12-04, Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
28. Абалкина И. Л., Большов Л. А., Капырин И. В., Линге И. И., Савельева Е. А., Свительман В. С., Уткин С. С. Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № 2019-03 – М: ИБРАЭ РАН, 2019. – 40 с.
29. Ромм Е. С. Структурные модели порового пространства горных пород. М.: Недра, 1985. – 240 с.
30. Гупало Т.А. и др. Гидрогеология Нижнеканского гранитоидного массива // Разведка и охрана недр. – 2004. – № 5. – С. 26–30.
31. Озерский А. Ю., Караулов В. А. Гидрогеологические исследования при изысканиях для подземного строительства в пределах массива кристаллических пород в южной части Енисейского кряжа // Инженерные изыскания. – 2012. – № 11. – С. 52–59.
32. 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.
33. Озерский, А.Ю. Отчет «Геологические исследования (поисковая стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском массиве (участок «Енисейский»)». / А. Ю. Озерский, К. А. Заблоцкий. – Красноярск, ОАО «Красноярскгеология», 2010.
34. Озерский А. Ю., Заблоцкий К. А. Геологические исследования (оценочная стадия) объекта окончательной изоляции радиоактивных отходов на Нижне-Канском

массиве (участок “Енисейский”), Книга 6. Текстовое приложение 24.5 – Данные опытно-фильтрационных работ в скважине Р-8, Красноярск, 2011.

35. Haitjema H.M. Analytic Element Modeling of Groundwater Flow. Academic Press, Inc. – 1995.

36. Butler Jr J. J., Hyder Z. An Assessment of the Nguyen and Finder Method for Slug Test Analysis // Groundwater Monitoring & Remediation. – 1994. – Т. 14. – №. 4. – С. 124-131.

37. Strack, O.D.L. Groundwater Mechanics. Prentice Hall. – 1989.

38. Бреббия К. и др. Методы граничных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 524 с.

39. Отчёт о результатах комплексной гидрогеологической съёмки масштаба 1:50000 на участке «Б». // Гончаров А.В., Носухин А.В. Второе гидрогеологическое управление, Железногорск, 1965.

40. Линге И. И., Уткин С. С., Свительман В. С., Дерябин С. А. Расчетное обоснование долговременной безопасности и оптимизация решений по захоронению РАО и выводу из эксплуатации: тенденции, потребности, возможности // Радиоактивные отходы. 2020. – № 2 (11). – С. 85 – 98. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-2-85-98.

41. Расчетный код MOUSE [Электронный ресурс]. – URL: <http://ibrae.ac.ru/contents/MOUSE>.

42. Gandomi A. H., Yang X. S., Alavi A. H. Cuckoo search algorithm: a metaheuristic approach to solve structural optimization problems // Engineering with computers. 2013. – Vol. 29. – № 1. – P. 17–35.

43. Ayvaz M. T. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management models // Advances in Water Resources. – 2009. – Vol. 32. – №. 6. – P. 916-924.

44. Капырин И.В. и др. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал. – 2015. – № 10. – С. 44–50. DOI: 10.17580/gzh.2015.10.08.

45. Fetter C.W. Contaminant hydrogeology. Second Edition. Prentice-Hall, New Jersey, 1999. – 500 p.

46. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. – Москва: КДУ, 2009. – 334 с.

47. Theis C. V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions, American Geophysical Union, 1935. – № 2 (35). – С. 519–524.
48. Holub J. et al. Evaluation of a pumping test with skin effect and wellbore storage on a confined aquifer in the Bela Crkva, Serbia // International Journal of Water. – 2019. – № 1 (13). – С. 1–11.
49. Leonard F. Konikow, George Z. Hornberger, Keith J. Halford R.T.H. Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW Ground-Water Flow Model Techniques and Methods 6 – A30 // Methods. 2009. С. 80.
50. Боровский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек / Б. В. Боровский, Б. Г. Самсонов, Л. С. Язвин. – Москва: Недра, 1973. 304 с.
51. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. – М.: Изд-во МГУ, 1979.
52. GMS 10.4 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction>.
53. Harbaugh, A.W. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model – the Ground-Water Flow Process. – Reston, VA, USA : US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.
54. Verkaik J., van Dam A., Lourens A. MT3DMS, A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model. User Guide to the Massively Parallel Processing (MPP) Package and PETSC (PET) Package – Deltares, 2011.
55. Cooper Jr H. H., Jacob C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history //Eos, Transactions American Geophysical Union. – 1946. – Vol. 27. – №. 4. – P. 526-534.
56. Walger E. et al. Single-hole injection tests and pressure pulse tests in borehole KFM08A. P-06-94. – SKB, 2006
57. Ludvigson J.-E. et al. Method evaluation of single-hole hydraulic injection tests at site investigations in Forsmark. P-07-80. – SKB, 2007.
58. Enachescu C. et al. Hydraulic injection tests in borehole KLX16A, P-07-120, SKB, 2007.

59. Шержуков Б. С., Алексеев В. С., Курманенко А. Д. Рекомендации по определению параметров горных пород и грунтов методом экспресс-налива в несовершенные скважины. – ВНИИ ВОДГЕО, 1979.
60. Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект) / Б. Т. Кочкин, В. И. Мальковский, С. В. Юдинцев. – Москва: ИГЕМ РАН, 2017. – 384 с.
61. Diersch, H. J. G. FEFLOW – Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. – Berlin: Springer, 2014 – 996 p.
62. Hartley L. J., Holton D. CONNECTFLOW (Release 2.0) Technical Summary Document. SERCO/ERRA-C/TSD02V1. – 2003.
63. Pollock, D.W., 2016, User guide for MODPATH Version 7. – A particle-tracking model for MODFLOW: U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, 35 p. – DOI: 0.3133/ofr20161086.
64. Pruess K., Oldenburg C., Moridis G. TOUGH2 User's guide. v.2.0. – LBLN-43134. 1999.
65. Румынин В. Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. – СПб.: Наука, 2011. – 1158 с.
66. Walton, W.C., Practical Aspects of Groundwater Modelling, 3rd ea., National Water Well Association, Worthington, Ohio (1988).
67. Saveleva E. et al. Sensitivity analysis and model calibration as a part of the model development process in radioactive waste disposal safety assessment //Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – Vol. 210. – P. 107521. – DOI: 10.1016/j.res.2021.107521
68. Савельева Е. А. и др. О выборе метода оценки чувствительности модели к ее параметрам при обосновании безопасности пунктов захоронения РАО //Радиоактивные отходы. – 2021. – №. 2. – С. 73-89. – DOI: 10.25283/2587-9707-2021-2-73-89.
69. Swiler L.P. et al. Sensitivity Analysis Comparisons on Geologic Case Studies: An International Collaboration: Technical Report SAND2021-11053. – Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 2021. – 169 P. – DOI: 10.2172/1822591.
70. Sobol I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates //Mathematics and computers in simulation. – 2001. – Vol. 55. – №. 1-3. – p. 271-280.

**Основные публикации по теме диссертации**

1. Неуважаев Г.Д., Капырин И.В., Болдырев К.А., Сускин В.В. Применение расчётного кода GeRa в практических задачах оценки безопасности пунктов захоронения радиоактивных отходов различных типов. Тезисы докладов VI научного семинара «Моделирование технологий ядерного топливного цикла», РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск. 2017. с. 17.
2. Разработка геофильтрационной модели для участка «Енисейский» и оптимизация ее параметров при помощи гибридного оптимизационного алгоритма. Валетов, Г. Д. Неуважаев, В. С. Свительман. // Известия РАН. Энергетика, 2020, № 1, стр. 128-137.
3. Неуважаев Г.Д. Моделирование миграции радионуклидов в скальных породах. Школа-семинар. Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач. 2017, электронный сборник.
4. Неуважаев Г.Д. Гидродинамические расчеты для оценки безопасности Нижнеканского массива. Сборник трудов XVIII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2017. с. 114-118.
5. Неуважаев Г.Д. Разработка геофильтрационно-геомиграционной модели пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов на Нижнеканском массиве. Сборник трудов XVII научной школы молодых учёных ИБРАЭ РАН. 2016. с. 134-135.
6. Валетов Д.К., Неуважаев Г.Д., Свительман В.С. Модификация эвристического оптимизационного алгоритма Harmony Search в применении к задаче калибровки профильной фильтрационной модели. Сборник трудов 61 научной конференции МФТИ. – 2018.
7. D.K. Valetov, G.D. Neuvazhaev, V.S. Svitelman, E.A. Saveleva. Hybrid Cuckoo Search and Harmony Search Algorithm and Its Modifications for the Calibration of Groundwater Flow Models. Proceedings of the 11th International Joint Conference on Computational Intelligence: IJCCI 2019. – Springer, 2020.
8. Substantiation of the rock massif permeability based on packer tests Georgii Neuvazhaev and Alexandr Rastorguev E3S Web Conf., 98 (2019) 10004
9. Неуважаев Г. Д., Савельева Е. А., Свительман В. С. Вариационный метод оценки чувствительности миграционной модели // Радиоактивные отходы. — 2019. — № 1(6). — С. 69—76.

10. К вопросу выбора инженерных барьеров пунктов приповерхностного захоронения РАО на примере сценария переполнения. Богатов С.А., Неуважаев Г.Д., Коновалов В.Ю. Вопросы радиационной безопасности. 2019. № 3 (95). С. 3-14.
11. Neuvazhaev G. et al. 3D hydrogeological modeling of Deep Geological Disposal in the Nizhnekansky Rock massif //EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2020. – С. 21509.
12. 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: 10.25283/2587-9707-2020-4-30-41.