

ИНСТИТУТ «ЯКУТНИПРОАЛМАЗ»  
АК АЛРОСА (ПАО)

*На правах рукописи*

**Янников Алексей Михайлович**

**Структурная гидрогеология коренных алмазных месторождений Западной  
Якутии**

Специальность: 1.6.6. Гидрогеология

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

**Том 1**

МИРНЫЙ – 2026

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## ТОМ 1

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. Постановка проблемы и методы исследований.....	12
1.1 Состояние изученности проблемы .....	12
1.2 Методы исследований .....	19
1.3 Исторический очерк открытия основных месторождений Якутской алмазонасной провинции, краткая характеристика кимберлитовых тел и способов их отработки.....	22
1.4 Выводы – обоснования научных и прикладных задач, решаемых в рамках диссертационного исследования .....	39
ГЛАВА 2. Геокриологические, криогидрогеологические условия и структурно- гидрогеологические модели Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей.....	43
2.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле .....	55
2.2 Далдынское кимберлитовое поле.....	66
2.3 Мирнинское кимберлитовое поле .....	74
2.4 Накынное кимберлитовое поле .....	80
ГЛАВА 3. Пластовые газы в пределах зон динамического воздействия кимберлитовых трубок: типизация, формы нахождения в коллекторах, проблемы опережающей дегазации при проходке.....	89
3.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле .....	91
3.2 Далдынское кимберлитовое поле.....	95
3.3 Мирнинское кимберлитовое поле .....	98
3.4 Накынное кимберлитовое поле .....	125
3.5 Технические решения по дегазации коллекторов вмещающих пород, применяемые на кимберлитовых трубках Западной Якутии.....	127
ГЛАВА 4. Крупномасштабные структурно-тектонические условия и водопритоки в пределах шахтных полей кимберлитовых трубок Якутии .....	136
ГЛАВА 5. Проблемы утилизации дренажных рассолов, и их связь с криогидрогеологическими условиями кимберлитовых полей.....	163
5.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле .....	165
5.2 Далдынское кимберлитовое поле.....	173
5.3 Мирнинское кимберлитовое поле .....	186
5.4 Накынное кимберлитовое поле .....	202

ГЛАВА 6. Изменения гидродинамического режима подземных вод при отработке коренных месторождений алмазов и формирование природно-техногенных водонапорных систем в процессе откачка-закачка .....	206
6.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле .....	207
6.2 Мирнинское кимберлитовое поле .....	226
6.3 Накынское кимберлитовое поле .....	231
6.4 Далдынское кимберлитовое поле.....	233
ГЛАВА 7. Изменения геотермического режима пород при отработке коренных месторождений алмазов в результате формирования природно-техногенных систем.....	246
7.1 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков первой группы .....	249
7.2 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков второй группы .....	255
7.3 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков третьей группы .....	258
7.4 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков четвертой группы ..	264
7.5 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков пятой группы .....	270
ГЛАВА 8. Геохимия рассолов кимберлитовых трубок как потенциал гидроминерального сырья и проблемы выбора систем осушения и защиты от затопления.....	280
8.1 Дренажные рассолы и их потенциал использования в качестве гидроминерального сырья	280
8.2 Критерии влияния криогидрогеологических условий на выбор системы осушения и защиты от затопления обрабатываемых месторождений.....	290
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	299
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	305

## **ТОМ 2. ПРИЛОЖЕНИЯ**

Приложение 1. Геолого-гидрогеологический разрез по талику оз. Травянистое... ..	3
Приложение 2. Динамика изменения дебита пластовых газов в процессе бурения скважин.....	4
Приложение 3. Динамика изменения дебита газа и рассола в разрезе верхнекембрийского водоносного комплекса.....	5
Приложение 4. Динамика изменения дебитов газа и рассолов на заданных глубинах коллекторов среднекембрийского водоносного комплекса.....	6
Приложение 5. Коллекторы толбачанской свиты, сгруппированные по величине пластового давления в неразгруженном массиве.....	7
Приложение 6. Динамика изменения дебита пластовых газов и природных рассолов по сети скважин, пробуренных на гор. -790 рудника тр. Интернациональная.....	8
Приложение 7. Химический состав водорастворенных газов.....	9
Приложение 8. Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса в пределах шахтного поля тр. Интернациональная.....	12

Приложение 9. Коэффициент водопроницаемости, рассчитанный по скважинам режимной сети в пределах шахтного поля тр. Интернациональная.....	14
Приложение 10. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте..	15
Приложение 11. Модельное распределение уровня подземных вод подозерных таликов оз. Травянистое и оз. Проточное на конец 2022 года.....	16
Приложение 12. Расчетное распределение уровня подземных вод нижнеордовикского водоносного комплекса в пределах карьерного поля тр. Юбилейная.....	18
Приложение 13. Расчетное распределение уровня подземных вод верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса на конец 2022 года в пределах карьерного поля тр.Юбилейная.....	19
Приложение 14. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте в пределах карьерного поля тр. Юбилейная.....	20
Приложение 15. Прогнозное распределение уровня подземных вод в метегеро-ичерском водоносном комплексе в пределах Мирнинского кимберлитового поля.....	21
Приложение 16. Модельное распределение уровня подземных вод межмерзлотного и подмерзлотного верхнекембрийских водоносных комплексов в пределах карьерного поля тр. Нюрбинская (состояние на сентябрь 2022 г.).....	23
Приложение 17. Прогнозное положение уровней водоносных комплексов на участках закачки дренажных вод Далдынского кимберлитового поля.....	25
Приложение 18. Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при одновременной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».....	29
Приложение 19. Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при эксплуатации скважин участка «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».....	30
Приложение 20. Криогидрогеологический разрез участков Ноябрьский и Ботубинский.....	32
Приложение 21. Осреднённые кривые изменения температуры по стволам закачных скважин в пределах участков второй группы.....	34
Приложение 22. Криогидрогеологический разрез участков Левобережный и Киенгский.....	35
Приложение 23. Характеристические осреднённые кривые изменения температуры по стволам наблюдательных скважин в пределах участков четвертой группы.....	37
Приложение 24. Профили по накопителю Тымтайдах.....	40
Приложение 25. Ресурсный потенциал дренажных вод кимберлитовых трубок Западной Якутии.....	43

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Активное промышленное освоение Западной Якутии началось с момента открытия коренных месторождений алмазов и продолжается по настоящее время. Разработку коренных и большинства россыпных месторождений осуществляет АК АЛРОСА (ПАО) открытым и подземным способами в сложных горно-геологических, геокриологических, гидрогеологических и газодинамических условиях. Отработка таких уникальных алмазных месторождений кимберлитовых трубок, как Айхал, Интернациональная, Мир, Удачная, Юбилейная уже производится (Айхал, Интернациональная, Удачная) или будет производиться в ближайшем будущем (Мир, Юбилейная) подземным способом, поэтому изучение криогидрогеологических условий является очень важной составляющей изучения. Вмещающий массив коренных месторождений Западной Якутии, как правило, сложен нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными породами. Большинство выделяемых коллекторов в основном приурочено к карбонатным разностям: известнякам и доломитам. Несмотря на некоторые их литологические отличия, есть ряд общих черт, а именно: - карбонатные породы характеризуются трещинно-пористым и трещинно-карстовым типом проницаемости; - выделяемые водоносные комплексы находятся в зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, имеют высоконапорный характер и содержат высокоминерализованные хлоридные рассолы различной степени насыщения с минерализацией от 80 до 520 г/литр.

Используя принципы и подходы, изложенные в работах В.М. Степанова по структурной гидрогеологии Восточной Сибири, автор применяет их к Якутской алмазоносной провинции, где криогидрогеологические условия существенно отличаются не только от аналогичных криоартезианских бассейнов из-за влияния зон динамического воздействия ультраосновных и основных интрузий, но и характеризуются вариативностью в пределах кимберлитовых полей и отдельных месторождений.

С точки зрения горно-геологического и структурно-гидрогеологического строения, практически любая кимберлитовая трубка, её тело и близлежащий массив вмещающих пород в радиусе (зависящем от её площади и, как правило, составляющем от 200 до 1500 м), является локальной структурой сложного строения из-за невыдержанности коллекторов, наличия «гидравлических окон» по зонам эндо- и экзоконтактов, влияния микроблочных структур и малоамплитудной тектоники, а также зон вторичной минерализации и массопереноса, возникших на гидротермальном этапе развития.

Выявление структурных особенностей месторождений и их взаимосвязи с последующей локализацией в рамках отдельных кимберлитовых полей заключается в учёте фактической гидрогеологической и газодинамической ситуации в нижнепалеозойских кембрийских

вмещающих породах в зонах динамического воздействия ультраосновного и основного магматизма, в том числе в отдельной оценке выделяемых в толще многолетнемерзлых пород (ММП) пластов-коллекторов, расположенных в отметках отработки.

Таким образом, развивая подходы В.М. Степанова, автор обосновывает выделение структурной гидрогеологии как обособленного направления в рамках гидрогеологии криолитозоны алмазоносных провинций Восточной Сибири.

**Цель работы** – структурно-гидрогеологический анализ формирования локальных и региональных современных гидрогеологических условий в пределах кимберлитовых полей и трубок, обусловленных совокупностью природных и техногенных факторов для обоснования дальнейшей устойчивой открытой и подземной отработки алмазных месторождений, утилизации и использования дренажных вод.

**Задачи исследований.** Для достижения поставленной цели автору потребовалось решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ, провести исследования по оценке криогидрогеологических и геокриологических условий Западной Якутии с последующей схематизацией в пределах кимберлитовых полей и детализацией до уровня отдельных обрабатываемых месторождений и эксплуатируемых участков закачки. Рассмотреть основные аспекты криогидрогеологических условий формирования глубоких горизонтов месторождений Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского, Накынского кимберлитовых полей.

2. Систематизировать имеющиеся материалы по криогидрогеологическим и газодинамическим условиям коренных месторождений алмазов и дать характеристику газодинамическим условиям кимберлитовых полей на всю глубину отработки месторождений.

3. Выявить и охарактеризовать факторы, влияющие на гидродинамический режим основных водоносных комплексов и горизонтов региона, в пределах карьерных и шахтных полей ключевых алмазоносных трубок.

4. Провести систематизацию структурно-тектонических и структурно-гидрогеологических условий коренных месторождений алмазов и установить степень влияния разрывных нарушений на гидрогеологические режимы шахтных и карьерных полей кимберлитовых трубок, включая формирование техногенных водоносных горизонтов в зонах закачки.

5. Оценить характер, объёмы и интенсивность техногенного влияния на геологическую среду в связи с выбранным вариантом обращения с дренажными водами, в зависимости от криогидрогеологических условий конкретного кимберлитового поля.

6. Выявить динамику и установить закономерности трансформации криогидрогеологических условий в результате техногенного воздействия, связанного с

формированием природно-техногенных систем от разрабатываемых месторождений и участков закачки.

7. Изучить влияние разномасштабных техногенных нагрузок на криогидрогеологические условия кимберлитовых полей и локальные изменения геотермического режима, а также определить ключевые процессы и границы их воздействия.

8. Рассмотреть возможность применения дренажных рассолов отработываемых месторождений в качестве гидроминерального сырья для добычи лития и оценить ресурсный потенциал на всем «жизненном цикле» отработки. Разработать критерии, позволяющие обосновывать необходимость и возможность строительства систем водозащиты карьеров и рудников, с наименьшим техногенным воздействием на геологическую среду.

**Объект исследования** – водоносные комплексы и горизонты криогидрогеологических бассейнов Западной Якутии, в том числе природно-техногенного происхождения, приуроченные к нижнепалеозойским, преимущественно кембрийским породам и отложениям, слагающим осадочный чехол в отметках техногенного воздействия в пределах Якутской алмазоносной провинции.

**Фактический материал, методы исследований.** За последние десять лет в процессе работ, выполненных лично автором или под его непосредственным руководством, была получена дополнительная информация, позволяющая охарактеризовать факторы формирования природных рассолов, изучить влияние структурно-тектонических и литолого-фациальных условий на гидрогеологические параметры, выявить закономерности динамических изменений в результате формирования природно-техногенных систем и сопутствующего антропогенного воздействия на геологическую среду.

В основу диссертации легли результаты десятилетней работы автора в АК АЛРОСА (ПАО) в качестве рядового, а затем и ведущего гидрогеолога Западно-Якутской геологоразведочной партии Мирнинской ГРЭ АК «АЛРОСА» ПАО в 2012-2017 гг.; руководителя проекта Октябрьской геологоразведочной партии Вилуйской ГРЭ АК «АЛРОСА» ПАО в 2017-2018 гг.; главного гидрогеолога Айхальского ГОКа в 2018-2020 гг.; заведующего лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений в 2020-2022 гг. В результате был проведен весь комплекс гидрогеологических исследований, как в полевых условиях, так и в подземных и открытых горных выработках.

Работы, выполненные автором, включали: – документацию керна по сети опытных скважин, сооружаемых с дневной поверхности и из подземных горных выработок (автором лично в полевых условиях задокументировано и изучено более 20 тыс. погонных метров керна по скважинам различного назначения); – автором в условиях подземных горных выработок рудников Айхал, Интернациональный, Мир и Удачный, а также непосредственно на участках

закачки было выполнено порядка 5 тыс. замеров температуры закачиваемых и дренируемых рассолов, а также проведение термометрии с применением термоманометров на закачных и наблюдательных скважинах участков Ботуобинский, Заречный, Ноябрьский и Тымтайдахский. Замеры выполнялись, как непосредственно на участках закачки по режимным сетям скважин, так и в накопителе минерализованных вод, шахтных водосборниках, накопительных емкостях. Полученные материалы использовались при написании глав научно-производственных отчетов; – проведение режимных наблюдений по сети опытных скважин: замеры уровней, расходов рассолов, газов, компрессионные испытания; автором лично в полевых условиях и в подземных горных выработках выполнено более 120 тыс. замеров; – в период с 2013 по 2020 гг. автором выполнялись полевые работы по выявлению водопроявлений и их схематизации на месторождениях Айхал, Интернациональная, Мир, Нюрбинская и Юбилейная; – в период 2019–2022 гг., являясь сначала научным сотрудником 2019–2020 гг. (по совмещению с должностью главного гидрогеолога Айхальского ГОКа), а затем 2020–2022 гг. заведующим лабораторией горно-геологических проблем разработки месторождений, при непосредственном руководстве и участии были построены гидрогеологические модели всех ключевых месторождений и участков закачки в пределах Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского кимберлитовых полей.

Анализы выполнялись в специализированных сертифицированных лабораториях аккредитованных организаций – ОАО НПП ВНИИГИС и «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА (ПАО).

Автор являлся ответственным исполнителем целого ряда (более 80) производственных отчетов и заключений по проведенным работам и исследованиям, в том числе глав о гидрогеологических, инженерно-геологических и газодинамических условиях месторождений трубок Айхал, Ботуобинская, Деймос, Заполярная, Заря, Зарница, Интернациональная, Комсомольская, Комсомольская-Магнитная, Майская, Мир, Новинка, Нюрбинская, Сытыканская, Удачная, Юбилейная.

**Научная новизна** результатов исследований заключается в следующем:

1. В работе впервые на всю глубину отработки проанализированы криогидрогеологические и газодинамические условия глубоких горизонтов трубок Айхал, Ботуобинская, Заря, Зарница, Интернациональная, Комсомольская, Майская, Новинка, Нюрбинская, Удачная, Юбилейная. Определены границы распространения основных водоносных комплексов, осложняющих отработку месторождений алмазов.

2. Установлено влияние распределения разрывных нарушений на водообильность вмещающих пород в рамках карьерных и шахтных полей. Выявленные закономерности прослеживаются по всей осадочной толще в интервале фактической и планируемой отработки.

3. Впервые для коллекторов в зонах динамического воздействия ультраосновного и основного магматизма установлены закономерности распределения углеводородных газов, выявлена их зависимость от фильтрационных свойств.

4. Выявлены и охарактеризованы техногенные и природные факторы, влияющие на гидродинамический и геотермический режимы криолитозоны, а также региональных водоносных горизонтов и комплексов.

5. Впервые выявлены закономерности трансформации криогидрогеологических условий и геотермического режима в пределах природно-техногенных систем, сформированных в результате функционирования карьерных, шахтных водоотливов и сопряжённых узлов, и участков закачки. Разработаны основы количественного прогноза криогидрогеологических обстановок и динамики их изменения в результате техногенного воздействия.

6. По результатам изучения влияния техногенных нагрузок на криогидрогеологические условия и геотермический режим в пределах узлов и участков закачки предложена авторская классификация участков закачки. Определено, что ключевым фактором, определяющим локальные криогидрогеологические условия, являются системы разломов третьего порядка.

7. Обоснованы принципы дегазации коллекторов, опережающего водопонижения, а также разработаны критерии строительства систем осушения и защиты рудников и карьеров от затопления в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород.

8. Оценена возможность и перспективность использования дренажных рассолов всех коренных месторождений алмазов, приуроченных к пяти кимберлитовым полям: Алакит-Мархинскому, Верхне-Мунскому, Далдынскому, Мирнинскому и Накынскому, с учётом прогнозируемого изменения притоков, в качестве гидроминерального сырья для добычи лития.

**Практическая значимость** криогидрогеологического изучения Якутской алмазоносной провинции заключается в обеспечении безопасных промышленных и экологических условий на эксплуатируемых коренных и россыпных месторождениях, обоснования способов инженерной защиты выработок рудников и карьеров от возможного затопления и загазованности, а также в накопления опыта, необходимого при последующей отработке других месторождений (в том числе алмазоносных трубок и углеводородов).

**Защищаемые положения:**

1. С позиций структурной гидрогеологии водообильность коллекторов во вмещающих породах определяется разломно-блоковым строением месторождений, сформированным распределением разрывных нарушений в границах карьерных и шахтных полей. При этом наиболее проводящие зоны по всему разрезу осадочной толщи приурочены к северным и северо-восточным флангам кимберлитовых трубок, а площадь максимально обводнённых участков обусловлена рангом и количеством разрывных нарушений в пределах каждого блока шахтного поля конкретного месторождения.

2. Динамика трансформации криогидрогеологических условий в районах разработки кимберлитовых полей Западной Якутии имеет комплексную природу. Интенсивность изменений определяется взаимодействием доминирующих техногенных факторов: режимом и интенсивностью закачки дренажных рассолов с региональными природными условиями: структурно-тектоническое строение, гидрогеологический режим. Установлено, что в результате современного техногенного воздействия на Алакит-Мархинском, Далдынском, Мирнинском и Накынском полях уже произошли необратимые разнонаправленные изменения криогидрогеологических условий на площади порядка 800 км<sup>2</sup>. Расчеты, основанные на текущей динамике, показывают, что к середине XXI века эта площадь увеличится до 2100 км<sup>2</sup>.

3. Отработка месторождений алмазов и закачка дренажных рассолов во второй и третий ярусы криолитозоны сформировали сложные природно-техногенные криогидрогеологические системы с локальным изменением геотермического поля, составляющего от  $-3,0$  до  $+0,85$  °С, создав в криогенной толще рассолонасыщенные интервалы техногенных водоносных горизонтов. Их формирование, контролируемое теплотой фазового перехода, уже привело к плавлению 180 млн м<sup>3</sup> жильных и конституционных подземных льдов. Дальнейшая закачка высокоминерализованных вод увеличит площадь этих систем до 250 км<sup>2</sup>, а объем талых подземных вод к середине XXI века достигнет 550 млн м<sup>3</sup>.

4. Разработанная совокупность прогнозных гидрогеологических моделей позволила обосновать криогидрогеологические критерии, определяющие способы осушения и защиты рудников от затопления подземными водами, рациональные методы сбора и утилизации дренажных вод, а также оценить их ресурсный потенциал, как литий содержащих промышленных вод, составляющий для всех кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции не менее 48 тыс. тонн.

**Апробация работы.** Результаты и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 38 российских и международных совещаниях и конференциях: в Воронеже (2018, 2019, 2024), в Екатеринбурге (2024), в Иркутске (2019, 2021, 2022, 2023), Мирном (2017, 2018, 2021), Москве (2021, 2022, 2023), Новосибирске (2018, 2021), Перми (2018, 2019, 2020, 2022), Петрозаводске (2018), Санкт-Петербурге (2022), Саратове (2018), Томске (2023), Улан-Удэ (2021, 2023), Чите (2018), Якутске (2018, 2019, 2021, 2022, 2023, 2024).

Автором лично и в соавторстве по теме диссертации опубликовано 88 печатных работ (более 55 п.л.), в том числе 38 статей в рецензируемых научных журналах, из перечня ВАК. Опубликовано 4 монографии (одна в соавторстве). Основные идеи и положения изложены в 18 публикациях (объемом 17,1 п.л.) опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ имени М.В. Ломоносова по специальности 1.6.6 – Гидрогеология.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация содержит два тома. Том 1 изложен на 345 страницах, состоит из введения, восьми глав, заключения и списка литературы, насчитывающего 504 наименования. Текст иллюстрирован 127 рисунками, содержит 47 таблиц. Том 2 (Приложения) имеет общий объём 48 страниц и состоит из 25 приложений.

#### **Благодарности.**

Автор выражает глубокую благодарность за постоянное внимание и консультации д.г.-м.н., профессору, академику АН РС (Я) В.В. Шепелёву. За ценные замечания и помощь при подготовке работы автор благодарит д.г.-м.н. С.В. Алексеева, д.г.-м.н. А.В. Толстова. За помощь и поддержку автор благодарен и признателен д.г.-м.н., профессору В.Л. Бочарову, д.г.-м.н., профессору В.М. Ненахову, д.т.н. С.А. Великину.

## ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ<sup>1</sup>

### *1.1 Состояние изученности проблемы*

Формирование уникальных криогидрогеологических условий в рамках карьерных и шахтных полей отдельных месторождений, обусловлено особенностями кимберлитовых трубок, имеющих промышленные содержания природных алмазов. По текущим представлениям [291; 295; 297] глубина формирования макрокристаллов алмазов составляет 150-250 км, что и определяет нижнюю границу формирования мантийных плюмов, приводящих к их образованию. Рассматриваемые расплавы имеют низкую вязкость, позволяющую им проникать в зоны локальных растяжений (палеорифты) и формировать незначительные по площади очаги кимберлитовой магмы. В периоды тектонических активизаций, региональные межблоковые глубинные разломы древних платформ (кратонов), соединяют такие локальные очаги с дневной поверхностью, и служат кимберлит-контролирующими каналами для их исключительно быстрого подъёма, который, по оценке Похиленко Н. П., может составлять первые часы. Предполагаемая скорость подъёма может составлять 60-70 км/ч, что позволяет захваченным алмазам не перейти в графит в процессе изменения параметров давления и температуры. Когда до дневной поверхности остаётся порядка 2-5 км, кимберлитовый расплав, насыщенный водяным паром и углекислым газом, начинает вскипать, что инициирует взрыв, который формирует раструб будущей кимберлитовой трубки. Учитывая, что многие уникальные месторождения (трубка Мир, Удачная, Юбилейная и др.) состоят из нескольких фаз внедрения, процесс локального изменения, в том числе гидрогеологических условий, носит циклический и определяющий характер для распределения зон повышенной водопроницаемости.

---

<sup>1</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО:

Загоруйко А.А., Янников А.М. Отчёт о результатах геологического изучения глубоких горизонтов трубки «Интернациональная» в интервале абсолютных отметок -1050 - -1250м с подсчетом запасов алмазов по состоянию на 01.01.2017г в 6-ти книгах (Объект «Глубокий-4») Лицензия ЯКУ № 15827 КП. Книга 4. Текст. Результаты бурения скважины № 307 с комплексом гидрогеологических и геофизических исследований в районе трубки «Интернациональная» в 2015-2017 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах бурения гидрогеологических скважин №1 и №2 на горизонте +85 рудника «Интернациональный» по состоянию на 11.01.2016г. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Янников А.М. Информационный отчёт о выполненных гидрогеологических работах с МГОК за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Янников А. М. Информационный отчёт о проведённых гидрогеологических работах по объектам Айхальского ГОКа в 2018 г. / Фонды АГОК. Айхал, 2019.

Янников А. М. Информационный отчёт о проведённых гидрогеологических работах по объектам Айхальского ГОКа в 2019 г. / Фонды АГОК. Айхал, 2020.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Удачная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Левобережный-2»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Дополнительным фактором выступает уникальность каждого месторождения по ряду параметров: – количество фаз внедрения; – типы слагающих трубку кимберлитов (порфиновый кимберлит, автолитовая кимберлитовая брекчия, кимберлитовая брекчия и др.); – процентное соотношение различных типов кимберлитов в трубке и их минеральный состав; – площади кимберлитовых тел; – наличия/отсутствия крупных региональных разломов в пределах шахтных или карьерных полей, особенно в случае их интродуирования дайками основного состава; – характер взаимодействия между магматическими телами основного и ультраосновного магматизма (порядок внедрения).

Кимберлитовые трубки или проявления кимберлитового магматизма в настоящее время выявлены в пределах всех трёх типов (лавразийский, гондванский и переходный) древних платформ: Австралийской, Антарктической, Африканско-Аравийской, Восточно-Европейской, Индостанской, Северо-Американской, Сибирской, Сино-Корейской и Южно-Американской. Однако из более чем 2 тыс. кимберлитовых тел статус месторождений имеют менее 10%, а мировые запасы и ресурсы алмазов распределены крайне неравномерно (рис. 1.1, 1.2).

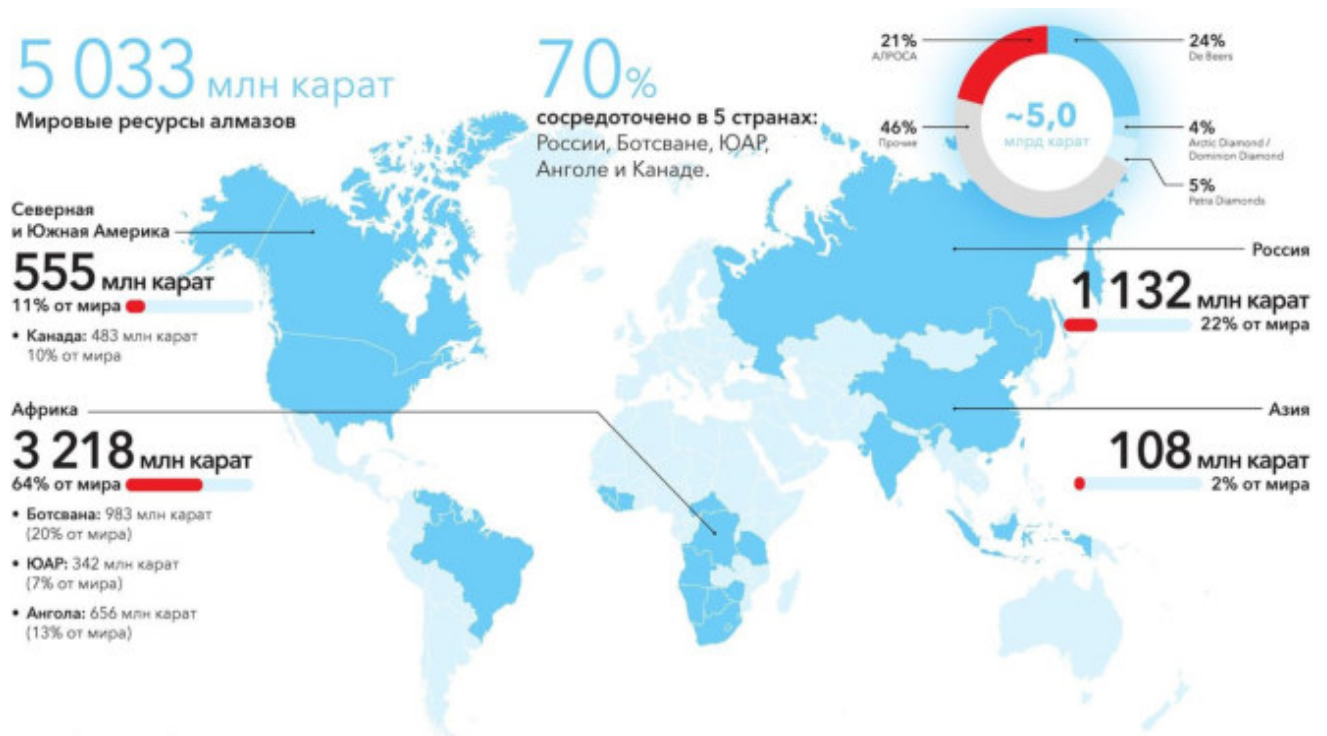


Рис. 1.1. Мировые ресурсы природных алмазов (по данным геологической службы АК АЛРОСА, автор Гаранин К.В.)

Т.к. в настоящее время кимберлитовые трубки являются доминирующим источником для добычи природных алмазов, изучение их гидрогеологических условий, с последующей характеристикой и систематизацией является основополагающей задачей, необходимой для обеспечения безопасных условий добычи, а также минимизации техногенного воздействия на среду, с сопутствующим снижением экологических рисков.

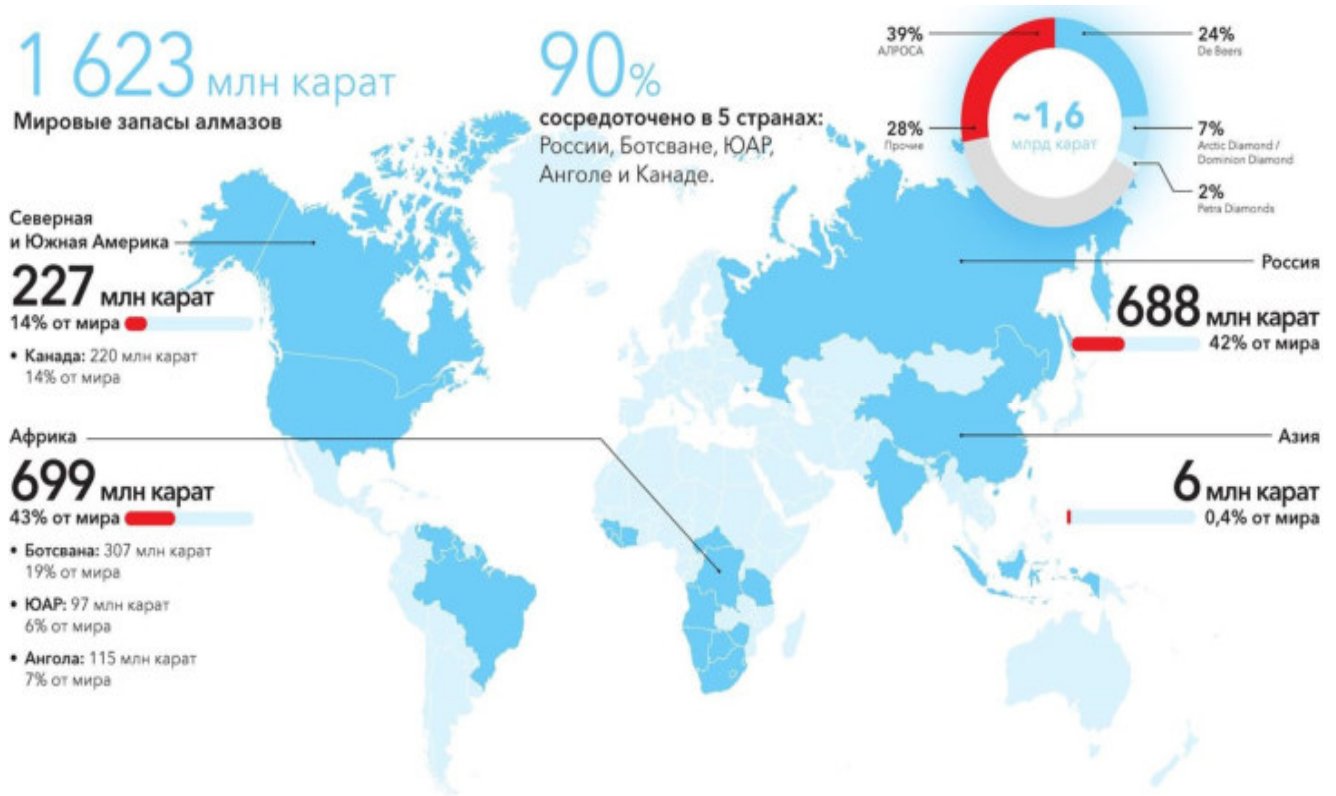


Рис. 1.2. Мировые запасы природных алмазов (по данным геологической службы АК АЛРОСА, автор Гаранин К.В.)

Учитывая количество коренных месторождений алмазов, и их ценность для добывающей промышленности, детальность изучения геологических, структурно-тектонических и гидрогеологических условий каждого из них в отметках добычных блоков осуществляется с высокой степенью детализации

Все без исключения кимберлитовые трубки имеют ряд общих черт [77; 96; 258; 336]:

- являясь крутопадающими телами, они прорывают отложения различных возрастов, в том числе и интервалы коллекторов, водоносных горизонтов и т.д.;
- приуроченность к палеорифтовым системам, характеризующимся развитой сетью разрывных нарушений различного заложения и мощности;
- формированием локальных геологических, геохимических, гидрогеохимических и гидрогеологических аномалий, связанных с фазами внедрения кимберлитовых расплавов и последующими гидротермальными процессами.

Вместе с общими чертами выделяется ряд существенных отличий:

- возраст алмазоносных кимберлитовых трубок значительно отличается, например, месторождения Якутии палеозойские: девонского и каменноугольного периодов, а крупнейшая трубка Анголы – Луеле мезозойского возраста (меловой период);

- различные, в зависимости от принадлежности и территориальной приуроченности, гидрогеологические условия: количество вскрываемых водоносных горизонтов, обводнённость месторождений и т.д.

Необходимо отметить, что кимберлитовые трубки Западной Якутии особенно сильно отличаются по геологическим, геокриологическим, гидрогеологическим и гидрохимическим условиям, в том числе от месторождений, выявленных в пределах Восточно-Европейской (Архангельская область) и Северо-Американской (Канада) платформ. Ключевые отличия заключаются в следующем:

1. Территориальная приуроченность всех месторождений Якутской алмазоносной провинции к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород, мощностью от 200-250 до 400-450 м [356]. Наличие мощной толщи мерзлых пород делает невозможным формирование региональных пресных водоносных горизонтов, соответствующих зонам активного водообмена [156], что в свою очередь упрощает отработку верхних эксплуатационных блоков месторождений. В зависимости от кимберлитового поля, вскрытие подземных вод (природных рассолов) происходит на глубинах от 150–170 до 400–470 м [283; 285; 286; 288; 287; 432-436]. Необходимо отметить, что на месторождениях Канады мощность зоны мерзлых пород гораздо меньше – первые десятки метров, она более просто устроена, в ней не описаны переходные зоны, линзы рассолов вымораживания и т.д. [262; 448; 456].

2. Большая часть эксплуатационных блоков зон раструба и диатремы большинства месторождений находятся в зоне отрицательных температур, т.к. в пределах выделенных кимберлитовых полей нулевая изотерма проходит на глубине 650-720 м. Криогенные процессы оказывают влияние на протекание термодинамических, тепломассообменных и физико-химических процессов в системе вода-порода, что подробно рассмотрено в исследованиях Алексева С. В. и Алексеевой Л. П. [22; 23; 25; 26; 27; 29; 30; 31; 32; 34; 43; 49; 51; 427; 429; 430; 439; 441-443 и др.].

3. Наличие в разрезе на всех без исключения месторождениях коллекторов, насыщенных природными рассолами с минерализацией до 520 г/л.

4. Отсутствие в разрезе региональных водоносных горизонтов и комплексов, содержащих воды питьевого назначения.

5. Наличие коллекторов смешанной флюидной насыщенности, в том числе с формированием неструктурных залежей углеводородных газов, что обусловлено рядом факторов: литолого-фациальным, структурно-тектоническим и криогидрогеологическим.

6. Толща вмещающих пород для кимберлитовых трубок Западной Якутии сложена терригенно-карбонатными и карбонатными породами кембрия, ордовика и силура, тогда как,

например, трубки Африканской платформы: республики Ангола (Катока, Луеле и др.), Южной Африки (Венеция и др.) прорывают верхнепротерозойские кристаллические и метаморфические породы: биотитовые гнейсы, биотитовые сланцы, амфиболиты, полевошпатовые кварциты, резе мраморы и др. [450; и др.], а трубки Канады верхнепротерозойские и архейские граниты (рис. 1.3).

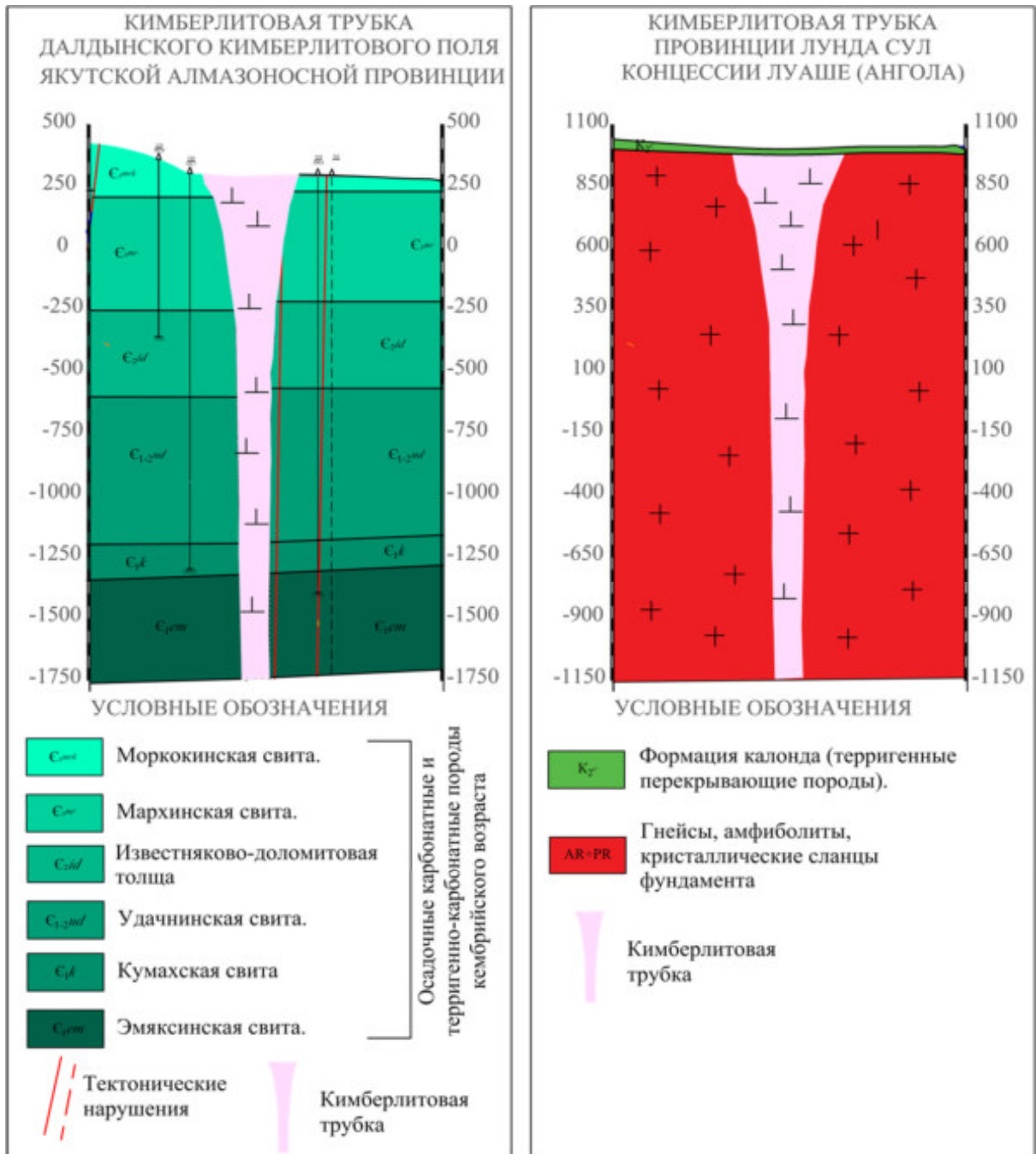


Рис. 1.3. Схематичный разрез кимберлитовых трубок Далдынского кимберлитового поля Якутской алмазодобывающей провинции (Россия) и концессии Луаше (Ангола) (сост. А.М. Янников по данным геологической службы АК АЛРОСА)

Отдельным вопросом является техногенное влияние отработки месторождений Западной Якутии на криогидрогеологическую среду заключающееся не только в образовании из-за работы систем опережающего водопонижения и разгрузки массива вмещающих пород депрессионных воронок, характерных для всех территорий интенсивного промышленного освоения, но и в формировании от процесса обратной закачки репрессионных куполов, компенсирующих и ограничивающих развитие депрессий, а также техногенных водоносных горизонтов в толще многолетнемерзлых пород (ММП), с последующим вертикальным массопереносом, приуроченным к зонам динамического воздействия региональных разрывных нарушений в ниже залегающие водоносные комплексы.

Зоны динамического воздействия ультраосновного магматизма, могут быть встроены и описаны в рамках рассматриваемых классификаций, с теми или иными допущениями. Однако по мнению автора представляемого диссертационного исследования, с точки зрения геолого-гидрогеологического строения непосредственно кимберлитовая трубка и близлежащий массив вмещающих пород в радиусе от 400 до 1500 м от неё (в зависимости от размеров тела и количества фаз внедрения кимберлитового расплава), по своей сути из-за локальной невыдержанности коллекторов, наличия «гидравлических окон» по зонам эндо- и экзоконтактов, влияния микроблочных структур и малоамплитудной тектоники, а также зон вторичной минерализации и массопереноса на гидротермальном этапе развития участка, является структурой сложного строения, и требует более подробного изучения, и как следствие, детально поставленных исследований.

Целенаправленные исследования гидрогеологических условий кимберлитовых трубок Западной Якутии были начаты во второй половине 50-х годов XX века, практически сразу после их открытия. Работы выполнялись сотрудниками Амакинской ГРЭ и Западной экспедицией Института мерзлотоведения АН СССР. В ходе этих исследований были охарактеризованы основные аспекты криогидрогеологического строения пород верхнего и среднего кембрия, до глубины 300-500 м от дневной поверхности.

Последующая добыча алмазов, потребовала дальнейшего планомерного изучения подмерзлотных рассолов и гидрогеологической характеристики вмещающих пород главных месторождений. Исследования были продолжены многими исследователями: Абрамов В.Ю., Авдеева В.И., Агринский А.В., Акишев А.Н., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Андреева С.М., Анисимова Н.П., Анциферов А.С., Асташкин В.А., Атрощенко Ф.Г., Афанасенко В.Е., Балашов Л.С., Балашов Ю.А., Балобаев В.Т., Баранов И.Я., Басков Е.А., Бобров А.К., Борисов В.Н., Ваганов В.И., Васильчук Ю.К., Вахромеев А.Г., Великин С.А., Вельмина Н.А., Власов Н.А., Всеволожский В.А., Втюрин Б.И., Гавич И.К., Гензель Г.Н., Гиниятулин И.М., Гинсбург Г.Д., Дроздов А.В., Ершов Э.Д., Ефимов А.И., Иванов А.В., Иост Н.А., Карцев А.А.,

Кирюхин В.А., Климентов П.П., Климовский И.В., Колганов В.Ф., Косыгин Ю.А., Крайнов С.Р., Лобанов В.В., Мельников П.И., Милашев В.А., Мироненко В.А., Овчинников А.М., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Толстихин Н.И., Хаин В.Е., Харьков А.Д., Шварцев С.Л., Швецов П.Ф., Шепелев В.В. и др. В результате этих фундаментальных исследований были охарактеризованы криогидрогеологические условия месторождений. Полученные результаты позволили выполнить классификацию выделенных водоносных комплексов, провести стратификацию подмерзлотных рассолов до глубин 500-800 м от дневной поверхности [162].

Дальнейшее развитие горных и добычных работ на рассматриваемых месторождениях потребовало доизучения гидрогеологических и газодинамических условий, причём мощность впервые изучаемых и характеризующихся отложений в зависимости от месторождения составляла от 300 до 1000 м. Работы по изучению были выполнены непосредственно Янниковым А. М. в 2014-2017 гг., либо под его прямым руководством в 2017-2022 гг. в рамках разведочных объектов: «Глубокий-3», «Глубокий-4», «Мир-глубокий», «Глубокий-Удачный», «Юбилейный», а также в процессе эксплуатационно-разведочных работ на данных объектах в тот же период и прямого гидрогеологического и научно-методического сопровождения проводимых работ на рассматриваемых месторождениях.

Помимо целевых исследований гидрогеологических условий коренных месторождений алмазов Западной Якутии, вопросы взаимодействия в рамках природно-техногенных систем поднимались Альковой Е.А. [56], Андреевым М.Н. [57], Великиным С.А., Ксенофоновой М.И., Легостаевой Я.Б., Поповой В.Ф. и др. в процессе своих научных изысканий в следующих работах: [100; 101; 102; 233; 309; 451; и др.]

Однако в части работ, выполненные исследования базировались на уже известных фактах, и не могли быть распространены на глубины от 350 до 1000 м от дневной поверхности (в зависимости от месторождения), а в других - рассматривались факторы, влияющие на предлагаемые технические решения при отработке месторождений.

Анализ публикаций и научных работ Буровой И.А. [92]; Лукьянова А.Е. [241]; Потехиной И.А. [294]; Серебрякова Е.В. [306]; Тагильцева С.Н. [314], рассматривающих взаимосвязи разрывных нарушений и гидрогеологических условий, на других объектах аналогах или сопряжённых территориях, как правило, указывают на недостаточную проработку данного фактора. Они применимы к локальным условиям изучаемых объектов. Это, в свою очередь, делает необходимым изучение и выделение коррелирующих связей между гидрогеологическими условиями и структурно-тектоническими факторами для полускальных вмещающих пород в зонах воздействия пликтивных дислокаций, применительно к территориям сплошного распространения многолетнемерзлых пород, в частности, применительно к кимберлитовым трубкам.

Вопросы изучения газодинамических явлений на коренных месторождениях алмазов являются наиболее малоизученным фактом, однако, их влияние на горно-геологические условия глубоких горизонтов трубок Интернациональная, Мир и Удачная очень значительны. Вопросы газоносности вмещающих пород, выделение коллекторов являются определяющим фактором обеспечения продолжения безопасной отработки данных трубок подземным способом. Исследования в данном направлении начались в 2017 г. и выполняются совместными усилиями институтов ИПКОН (Захаров В.Н. и др.), УрО РАН (Андрейко С.С. и др.), «Якутнипроалмаз» (Янников А.М., Янникова С.А. и др.). Несмотря на уже достигнутые успехи в вопросе дегазации карбонатных коллекторов, природа и формы существования пластовых газов в пределах шахтных полей требуют дополнительного изучения, для последующего успешного прогнозирования и выделения опасных зон.

Представленная научная работа является логическим продолжением изучения не только гидрогеологических и газодинамических условий кимберлитовых полей, но и процесса изменения гидродинамического режима из-за постоянно возрастающей техногенной нагрузки на недра и геологическую среду в результате формирования природно-техногенных систем «рудник/карьер-участок закачки в толщу ММП/участок обратной закачки». Дополнительно были осуществлены корреляция разрывных нарушений, и выявление их воздействия на водообильность и газоносность коллекторов, для последующего выполнения локальных прогнозов и составления соответствующих карт месторождений. Отдельно необходимо отметить зачастую пионерный характер исследования условий в интервалах предполагаемой отработки месторождений (на глубинах от 400 до 1830 м от дневной поверхности), выполненного автором лично, что и явилось основой для представляемой диссертационной работы.

### ***1.2 Методы исследований***

Решение поставленных задач осуществлялось на основе полевых, лабораторных и теоретических исследований. Основными полевыми методами являлись эксперименты, проводимые автором данной работы самостоятельно в отметках изучаемых интервалов, включающих толщи осадочных пород преимущественно кембрийского возраста. В их состав входило:

- проведение натуральных поинтервальных экспериментов по скважинам, пробуренным как с поверхности, так и из подземных горных выработок для оценки водообильности, газообильности и проницаемости толщ осадочных пород в пределах Мирнинского кимберлитового поля для холомолохской, мирнинской, метегерской, ичерской, чарской, олекминской, толбачанской, эльгянской, нелбинской и юрегинской свит. В пределах Алакит-Мархинского, Далдынского, Накынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей для

башенной, машковской, олдонинской, моркокинской, мархинской, удачнинской, кумахской, эмьяксинской и манькайской свит на основе поинтервальных постановок пласто-испытателей, выпусков пластовых вод и газов, компрессионных испытаний, газового каротажа;

- изучение литологических разностей осадочных пород в пределах Мирнинского кимберлитового поля для холомолохской, мирнинской, метегерской, ичерской, чарской, олекминской, толбачанской, эльгянской, нелбинской и юрегинской свит. В пределах Алакит-Мархинского, Далдынского, Накынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей для башенной, машковской, олдонинской, моркокинской, мархинской, удачнинской, кумахской, эмьяксинской и манькайской свит полевыми и лабораторными методами;

- оценка фильтрационных параметров осадочных пород в пределах Мирнинского кимберлитового поля для холомолохской, мирнинской, метегерской, ичерской, чарской, олекминской, толбачанской, эльгянской, нелбинской и юрегинской свит. В пределах Алакит-Мархинского, Далдынского, Накынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей для башенной, машковской, олдонинской, моркокинской, мархинской, удачнинской, кумахской, эмьяксинской и манькайской свит с использованием опытных откачек, режимных наблюдений по сети скважин, в том числе пробуренных из подземных горных выработок;

- отбор проб воды, газа, керна на разные виды анализов при бурении разведочных, дегазационных, геомеханических и опытных скважин;

- изучение разрывных нарушений, проявлений малоамплитудной тектоники, их картирование, вынесение на планы, выполняемое непосредственно в подземных горных выработках рудников «Айхал», «Интернациональный», «Мир», «Удачный»; карьеров «Ботубинский», «Заря», «Комсомольская», «Нюрбинский» и «Юбилейный»;

- режимные наблюдения за расходами пластовых вод и газов по сети скважин, пробуренных из подземных горных выработок, необходимые для определения изменения гидродинамического режима.

При анализе полученных результатов широко использовались методы гидродинамики и гидравлики водонасыщенных сред в условиях неустановившегося и квазистационарного режимов. В ходе решения поставленных задач использовались общепринятые методики проведения гидрогеологических, геофизических, газовых и других исследований [137; 143; 187; 197; 203; 253; 296; 316; 328; 422; и др.].

Лабораторные работы по химическому анализу подземных вод, растворённых и свободных пластовых газов, выполнялись в институте Якутнипроалмаз с использованием количественных и полуколичественных методов. Лабораторные определения физико-механических свойств горных пород осуществлялись в лаборатории геомеханики института

Якутнипроалмаз. Определение коллекторских свойств литологических разностей осадочных пород выполнялось ОАО НПП ВНИИГИС.

Для изучения структурно-группового состава выделенных экстрактов (битуминозной части пород, растворимой в хлороформе) был использован метод инфракрасной спектроскопии (ИК-Фурье спектроскопии). В процессе аналитических исследований проведена холодная экстракция пород хлороформом и рассчитан выход хлороформенного экстракта (битумоида) – ХБ в % на породу, т.е. количество битуминозной составляющей пород. Для всех проб получены ИК-спектры ХБ на ИК-Фурье спектрометре “Protege 460” фирмы “Nicolet”.

Работы по совместимости закачиваемых вод с толщиной ММП и природными рассолами выполнялись силами ИЗК СО РАН (Алексеев С.В., Алексеева Л.П. и др.). Определение теплофизических свойств пород выполнялось в ИМЗ СО РАН и ООО «Корунд».

В работе использовались результаты наземных геофизических исследований, выполненных методами зондирования переходных процессов (ЗМПП) и электротомографии. Как правило, для решения поставленных задач выполнялись методом ЗМПП разнесенной установкой 100×100 м. Методика проведения геоэлектрических исследований и интерпретация полученных данных соответствовали: Инструкции по электроразведке... и Методическим рекомендациям по применению точечных зондирований для построения геоэлектрического разреза. Для определения температурного режима подмерзлотных, морозовых и многолетнемерзлых пород в разные периоды проведения работ по участку выполнены геофизические исследования (ГИС). Комплекс ГИС определялся поставленными задачами и включал в себя: термометрию для определения геотермического градиента и расходомерию для выделения интервалов коллекторов. Геофизические исследования в скважинах проводились с использованием каротажной станции, оборудованной на автомобиле УРАЛ-4320. Базовая стандартизация геофизической аппаратуры проводилась с периодичностью согласно метрологическим требованиям. Геофизические исследования выполнялись в масштабе 1:200 и точно. В процессе записи кривых комплекса ГИС применялись цифровые регистраторы, что позволило одновременно выполнить визуальный оперативный контроль качества записи регистрируемого параметра. Контроль над стабильностью работы аппаратуры всех методов осуществлялся в процессе работы по перекрытиям при повторных измерениях. Замеры температуры проведены по всем закачным и наблюдательным скважинам. Метод термометрия выполнялся аппаратурой СТЛ-28, ЭТС-10У и РТГ- 42-3, максимальная (абсолютная) погрешность работы аппаратуры при измерении предельных значений (-20...+80 °С) не превышает 0,5°С или (2%). Для изучения термодинамического режима накопителя, а также неглубоких (до 200 м) термометрических скважин, использовались термоманометры АМТ-10С и АМТ-10Л., погрешность измерения температуры которых составляет 0,1°С.

Отбор проб рассолов из накопителя и опытных скважин производился от дна с шагом в один метр (накопитель) и от 10 до 50 м (в зависимости от глубины скважины). Определение показателей химического состава и минерализации выполнено лабораторией анализа состояния окружающей среды института Якутнипроалмаз АК «АЛРОСА».

Теоретические исследования сводились к аналитическому решению задач по определению влияния выделенных природных и техногенных факторов на режим и интенсивность излива природных рассолов, методами сопоставления, корреляции, временного, планового и комбинированного прослеживания, статистического анализа. Оценка фильтрационных свойств выделенных коллекторов, определение гидродинамических параметров осуществлялась графоаналитическими и гидродинамическими методами.

Определение влияния зафиксированных разрывных нарушений на гидрогеологические условия месторождения, а именно фильтрационные свойства коллекторов, производилось путем аналитического решения, методами сопоставления, а также методами статистического анализа. Определение основных гидродинамических коэффициентов выполнялось методами временного и комбинированного прослеживания, в том числе с применением программного комплекса Ansdimat.

Для оценки техногенного воздействия, процесса осушения и закачки активно применялись методы гидрогеологического и гидродинамического моделирования в ПО Modflow и Feflow. Причём при схематизации гидрогеологических месторождений применялись различные методы и граничные условия, в зависимости от конкретных условий и моделируемого водоносного комплекса или горизонта, как правило, оценка прогнозных притоков проведена с использованием специализированного ПО, реализующего пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных разностей в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися граничными условиями, при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, инфильтрации. Все модели реализованы в многослойной постановке, количество слоев, определялось согласно сложности конкретных криогидрогеологических условий моделируемого объекта: карьерное поле месторождения, участок закачки и др.

### ***1.3 Исторический очерк открытия основных месторождений Якутской алмазонасной провинции, краткая характеристика кимберлитовых тел и способов их отработки***

Геолого-гидрогеологическое изучение территория Западной Якутии началось во второй половине 30-х годов XX века, после проведённого сопоставительного анализа с алмазонасными районами Южной Африки. Результатом первых рекогносцировочных исследований, организованных Тунгусской геологоразведочной алмазной экспедиции при Иркутском

геологическом управлении, стало обнаружение в 1948 г. на одном из притоков Нижней Тунгуски первого сибирского алмаза. Последующие исследования в бассейне реки Вилюй, привели к обнаружению алмазов в 1949 г. на косе Соколиная [126].

Для расширения поиска и увеличения детализации исследований в 1947 г. была создана Амакинская ГРЭ, специалисты которой открыли в среднем течении реки Марха несколько россыпей алмазов, без открытия коренных источников.

Одновременно изысканиями алмазоносных месторождений занимались ленинградские ученые-геологи из Научно-исследовательского института геологии Арктики и Всесоюзного геологического института. Среди них была и потомственный геолог Наталья Сарсадских, которая еще в 1942 г., оказавшись в эвакуации на Урале, занималась поисками алмазов. В 1945 г., вернувшись в Ленинград, она стала работать полевым минералогом в Центральной экспедиции 3-го геологического управления Министерства геологии СССР. В 1948 г. экспедиция Сарсадских отправилась в Якутию на поиск минералов пироба и пикроильменита - спутников алмазов. Поскольку пироба и пикроильменита в кимберлитах почти всегда в сотни раз больше, чем алмаза, естественно, что и в россыпях рек, размывающих кимберлиты, его обнаружить значительно легче, чем алмаз [146]. Находка в россыпях пироба - важнейшее открытие, вызвавшее революцию в методике поисков алмазных месторождений.

Обобщив материалы «пиробовой съемки» и нанеся их на геологическую карту, Н.Н. Сарсадских и Л.А. Попугаева установили, что наибольшие скопления пироба приурочены к району устья и приустьевой части левого притока Далдына - ручья Дьяха, и пришли к выводу, что наиболее вероятное местоположение источника сноса - территория в районе этого ручья. В июне 1954 г. отряд Л.А. Попугаевой начал работу, и уже 21 августа 1954 г. Л.А. Попугаева обнаружила первую кимберлитовую трубку в СССР. В сентябре 1954 г. в тогдашней «столице» якутских алмазов пос. Нюрба Амакинская экспедиция провела совещание, посвященное открытию первой в Советском Союзе кимберлитовой трубки, названной «Зарница». Открытие первой в нашей стране кимберлитовой трубки Зарница проложило путь к открытию новых кимберлитовых трубок в нашей стране. В поисках коренных месторождений алмазов в Якутии в конце 40-х - середины 50-х – начала 70-х гг. можно выделить несколько этапов:

1 этап (1948-1950 гг.) - изучение алмазоносности р. Вилюй.

2 этап (1950-1953 гг.) - расширение территории поисков месторождений алмазов, изучение алмазоносности р. Оленек, изучение алмазоносности правых притоков р. Вилюй и верхних притоков р. Мархи Амакинской экспедицией.

3 этап. Открытие в 1953 г. в бассейне р. Далдын своеобразной пироб-ильменитовой шлихоминералогической ассоциации, которое перевернуло теоретические представления геологов о коренных источниках алмазов на Сибирской платформе. На основании этого пироб и

ильменит были выдвинуты как возможные спутники алмазов. В результате проведенных работ 21 августа 1954 г. Л.А. Попугаевой была открыта первая кимберлитовая трубка Зарница.

4 этап. В 1953 г. Н.В. Кинд установила алмазоносность нижнего течения р. Малая Ботуобия. В 1955 г. геологи открыли несколько коренных месторождений, среди которых легендарные трубки «Мир», «Удачная», «Сытыканская».

5 этап. 1955-1971 гг. Период массовых дифференцированных поисков и разведки богатых алмазоносных районов в Якутии, промышленного освоения открытых коренных месторождений алмазов. Открытие трубок «Айхал», «Амакинская», «Таежная», «Интернациональная», «Дачная» и др.

Всего в рамках Якутской алмазоносной провинции в период с 1954-2024 гг. было выявлено более 180 кимберлитовых тел (трубок взрыва, самостоятельные жил, даек и т.д.), которые, как правило, прорывают кембрийские, реже ордовикские и силурийские, терригенно-карбонатные отложения [78-80; 210]. Большинство кимберлитовых тел полностью перекрыты толщей мезозойских терригенных отложений, вулканогенных и магматических пород, мощностью от первых метров и до 100-150 м. Кимберлитовые трубки представляют собой сложно построенные магматические системы [170], сопровождаемые секущими дайками и жилами. Площадь тел варьирует 0,1 до 56,0 га.

Статус промышленных месторождений на территории Западной Якутии имеют 19 кимберлитовых тел. Это трубки Айхал, Ботуобинская, Дачная, Деймос, Заполярная, Заря, Зарница, Интернациональная, Комсомольская, Комсомольская-Магнитная, Майская, Мир, Новинка, Нюрбинская, Спутник, Сытыканская, Удачная, Юбилейная и XXIII съезда КПСС. Пять из них (Дачная, Комсомольская, Спутник, Сытыканская, и XXIII съезда КПСС) уже отработаны. Остальные 14 вовлечены в отработку подземным и открытым способами.

Основными месторождениями, повлиявшими на промышленное развитие Якутской алмазоносной провинции, являются кимберлитовые трубки Айхал, Ботуобинская, Интернациональная, Мир, Нюрбинская, Удачная и Юбилейная. Остановимся на способах освоения данных месторождений более подробно.

**Трубка Айхал приурочена к Алакит-Мархинскому кимберлитовому полю.** В период с 1961 по 1997 гг. отработывалась открытым способом (рис. 1.4, 1.5) при частичном вскрытии нижнеордовикского водоносного комплекса. [209; 210]. В 1999 г. на месторождении начата подземная добыча.

Для управляемого перепуска карьерных дренажных вод, образование которых связано с выпадающими на площадь карьера атмосферными осадками, разработан и введен в строй комплекс сооружений. Все рабочие горизонты изолированы путем возведения капитальных

железобетонных водонепроницаемых перемычек на прорывоопасных направлениях. Часть перемычек оборудована регулируемыми водовыпусками.



Рис. 1.4. Карьер трубки Айхал<sup>2</sup>

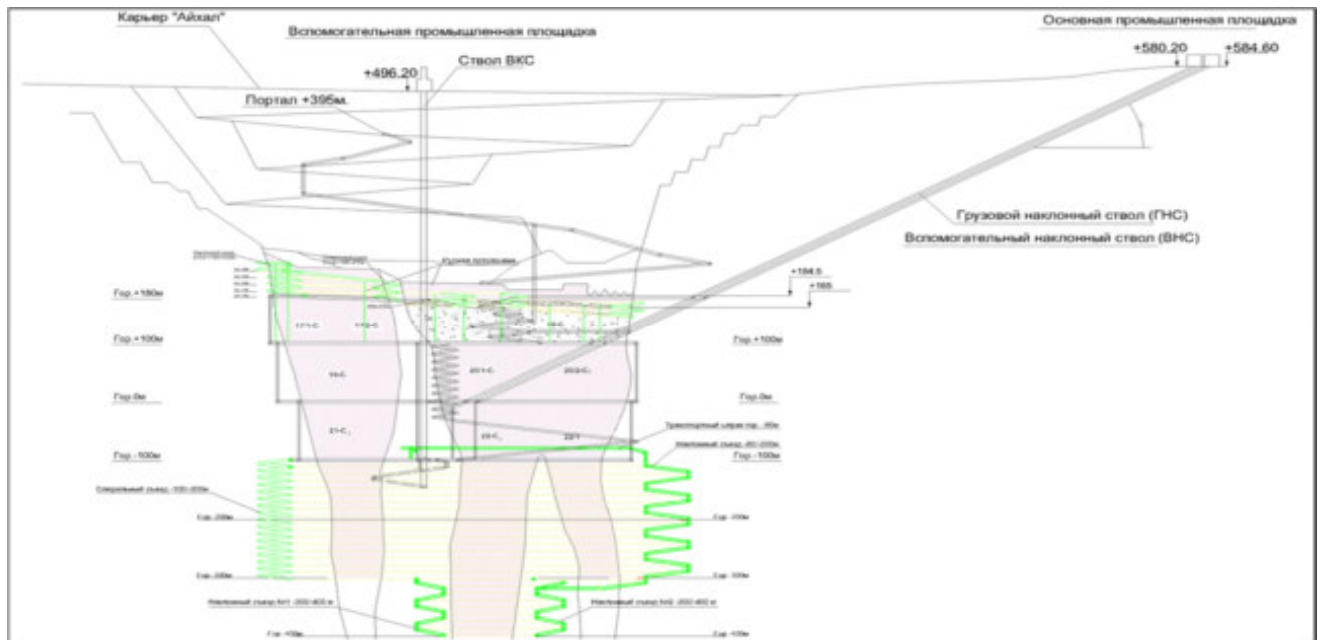


Рис. 1.5. Схема отработки месторождения трубки Айхал<sup>3</sup>

<sup>2, 3</sup> Янников А. М. Отчёт о гидрогеологических условиях месторождения до отм.-400 м рудника «Айхал». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2019.

Кимберлитовая трубка Айхал в дотриасовом эрозионном срезе представляет собой крутопадающее сплюснуто-трубчатое тело северо-восточного простирания и имеет протяженность по длинной оси – 510 м, при ширине 50-120 м, с пропорциями осей в плане 1:6,4. На отметке +374 м, кимберлитовая трубка разделяется на два обособленных кимберлитовых тела: юго-западное и северо-восточное [124]. Юго-западное тело в разрезе больше не претерпевает никаких изменений, закономерно сужаясь с глубиной. Северо-восточное тело на отметке +10 м, разделяется на два подводящих столба, которые в последующем уже закономерно сужаются с глубиной (рис 1.6)

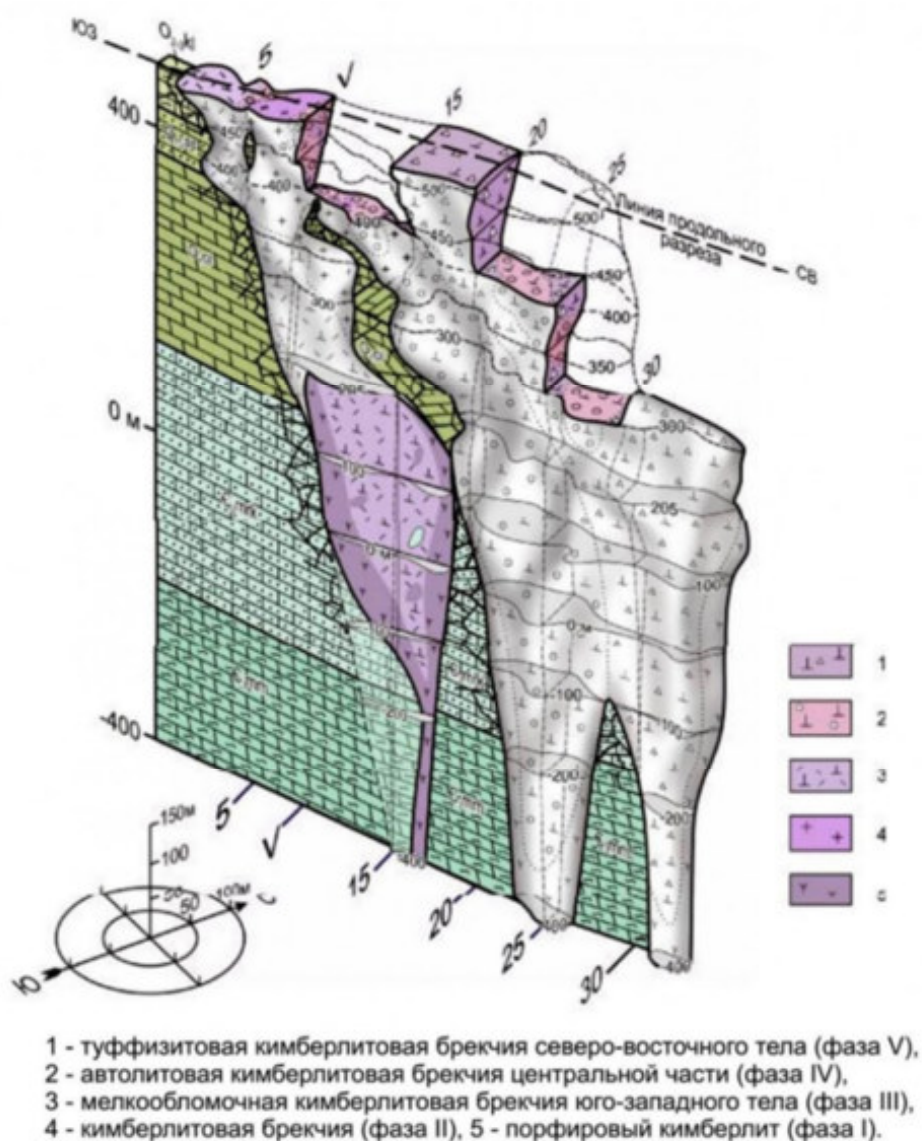


Рис. 1.6. Геологическая модель месторождения трубки Айхал [209]

**Трубка Айхал** прорывает субгоризонтально залегающие карбонатные и терригенно-карбонатные отложения нижнего палеозоя. С поверхности она была частично перекрыта толщей нижнемезозойских пород трапповой формации. Выполнена трубка разновозрастными кимберлитовыми брекчиями. Кимберлиты данного месторождения, по сравнению с породами других трубок Якутской алмазонасной провинции, характеризуются высокими содержаниями

карбонатов, апатита и барита [231]. Отличительной особенностью их является присутствие бадделеита – минерала карбонатитовых комплексов.

**Трубка Ботуобинская приурочена к Накынскому кимберлитовому полю.** В настоящее время отрабатывается открытым способом (рис. 1.7) [210]. Производительность карьера составляет 0,5-1,0 млн. тонн в год. Размеры карьера (проектные): по поверхности 1430×1100 м; по дну 320×45 м, при глубине 580 м [209; 210].

В процессе отработки карьера произойдёт полное вскрытие верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса (далее ПВВК).

Трубка Ботуобинская представлена всеми морфологическими элементами строения кимберлитовых тел: дайкой, диатремой и кратером, выполненными соответственно порфировыми кимберлитами (ПК) – первой субвулканической фазы, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями (АКБ) и кимберлитовыми туфо-брекчиями (КТБ) – второй вулканической фазы внедрения. Трубка залегает на глубине 78–110 м под толщей рыхлых мезозойских образований, прорывая карбонатные и терригенно-карбонатные породы ордовика и кембрия.



Рис. 1.7. Карьер трубки Ботуобинская<sup>4</sup>

**Трубка Интернациональная приурочена к Мирнинскому кимберлитовому полю.** Отрабатывалась открытым способом [10] в два этапа (рис. 1.8). Первый этап был осуществлён

<sup>4</sup>Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Интернациональная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнiproалмаз». Мирный, 2021.

1971-1981 гг. до глубины 284 м. Второй этап – реконструкция карьера с увеличением глубины отработки до 315 м. Вскрытие метегеро-ичерского водоносного комплекса открытой горной выработкой не произошло. [210].



Рис. 1.8. Карьер трубки «Интернациональная»<sup>5</sup>

В 1999 г начата подземная отработка месторождения (рис. 1.9).

---

<sup>5</sup>Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Интернациональная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

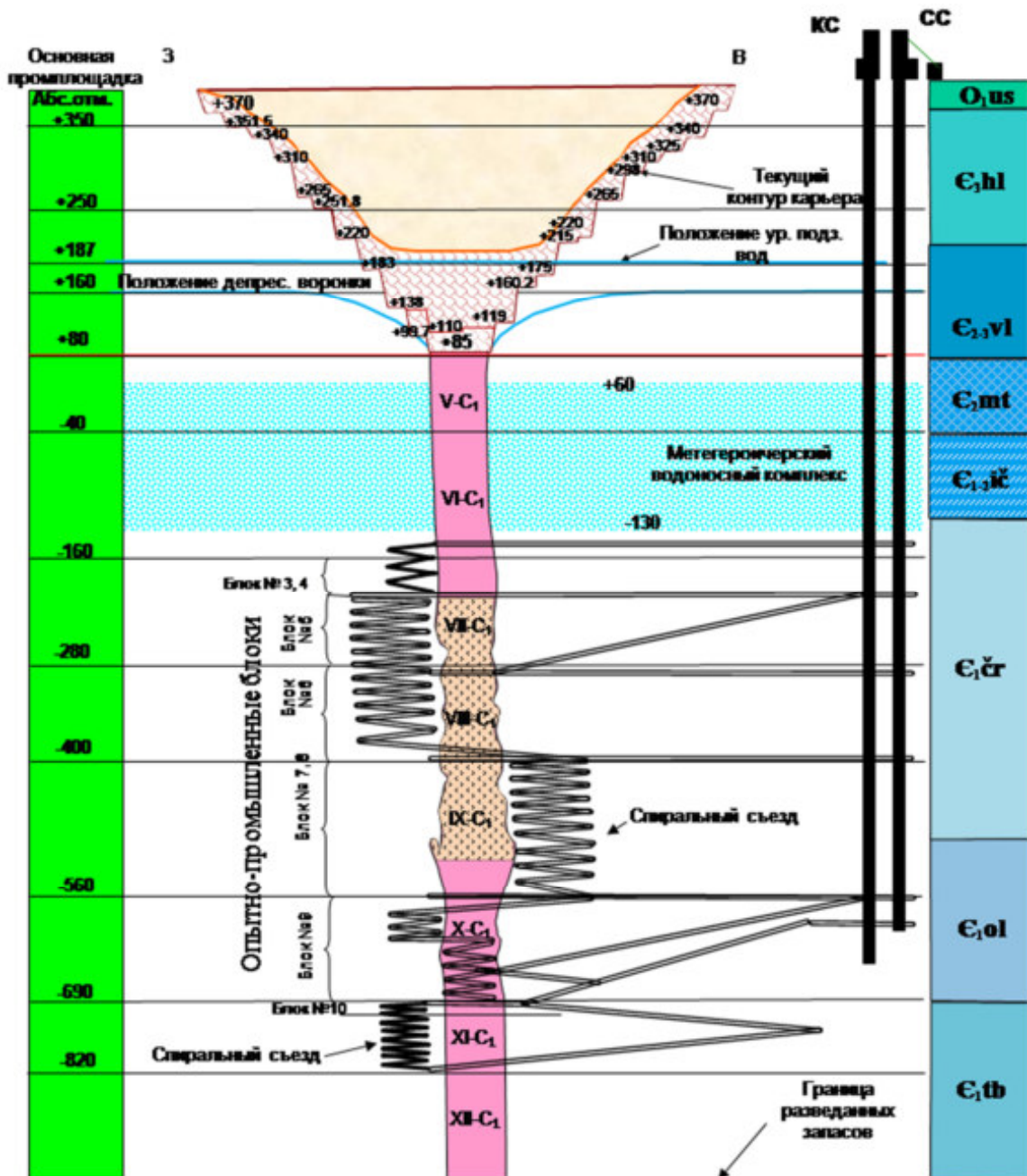


Рис. 1.9. Схема отработки трубки «Интернациональная» [209]

Трубка «Интернациональная» прорывает субгоризонтально залегающие галогенно-карбонатные и терригенно-карбонатные отложения нижнего палеозоя. С поверхности она была перекрыта маломощной (до 9,2 м) толщиной нижнемезозойских отложений (рис. 1.10). Кимберлитовые породы состоят из псевдоморфоз серпентина и кальцита по оливину, единичных зерен пирропа, хромшпинелида и пикроильменита, сцементированных карбонат-серпентиновым агрегатом. Из ксенолитов распространены обломки карбонатных пород нижнего палеозоя (5-15%, редко 30%), в небольших количествах присутствуют траппы, обнаружены единичные обломки кристаллических сланцев фундамента сибирской платформы [210].

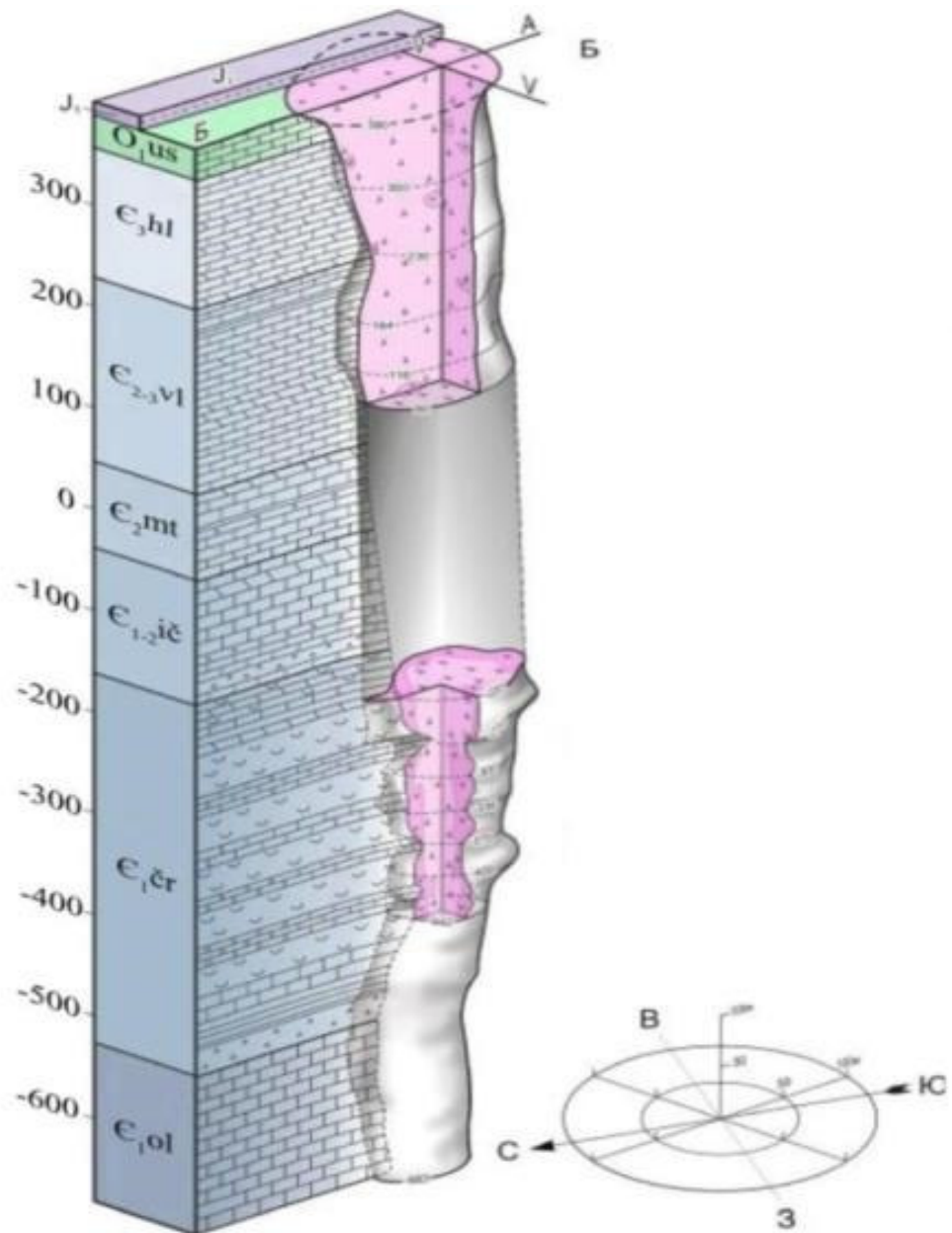


Рис. 1.10. Геологическая модель трубки Интернациональная [210]

*Трубка Мир* приурочена к *Мирнинскому кимберлитовому полю*. Отрабатывалась открытым способом [7, 210] 1957-2000 гг. до глубины 525 м при полном вскрытии метегероичерского водоносного комплекса (рис. 1.11) [210].

После завершения работ открытым способом, было принято решение о продолжении отработки месторождения подземным способом. Строительство рудника началось в 2004 г.



Рис. 1.11. Карьер трубки «Мир»<sup>6</sup>

Добычные работы на месторождении в период с 2009 по август 2017 года реализовывались согласно проекту «сухой» консервации [8; 9; 11] (рис. 1.12).

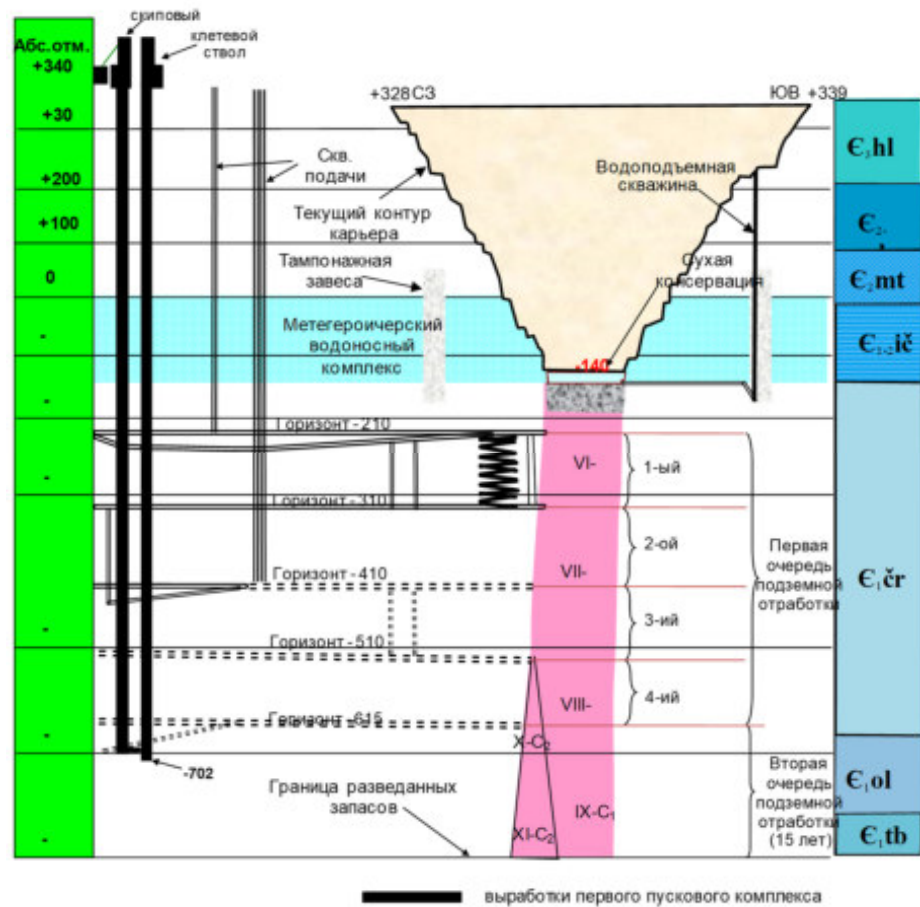


Рис. 1.12. Схема отработки трубки «Мир» [210]

<sup>6</sup> Янников А. М. Отчёт «Технические решения по осушению затопленных запасов месторождения трубки «Мир» в интервале -190 м/-447 м (и защите от затопления)». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

В плане трубка «Мир» имеет форму неправильного овала, вытянутую в северо-западном направлении. Кимберлитовая трубка прорывает силл и дайку диабазов. Размеры рудного тела на дневной поверхности составляли: по длинной оси 487 м, по короткой – 330 м. Вмещающие породы представлены двумя группами формаций – осадочных и магматических пород.

Осадочные породы включают в себя терригенно-карбонатные, сульфатно-карбонатные и галогенно-карбонатные отложения кембрийского возраста, магматические отложения – вулканогенную и трапповую формации (рис. 1.13). Кимберлитовая трубка сложена однообразными по составу породами: среднеобломочным кимберлитом [210; 255].

В настоящий момент, после произошедшей в августе 2017 г. аварии, рудник находится на реконструкции. Ведётся разработка проектных решений, позволяющих отработать месторождение до границы разведанных запасов [401; 403].

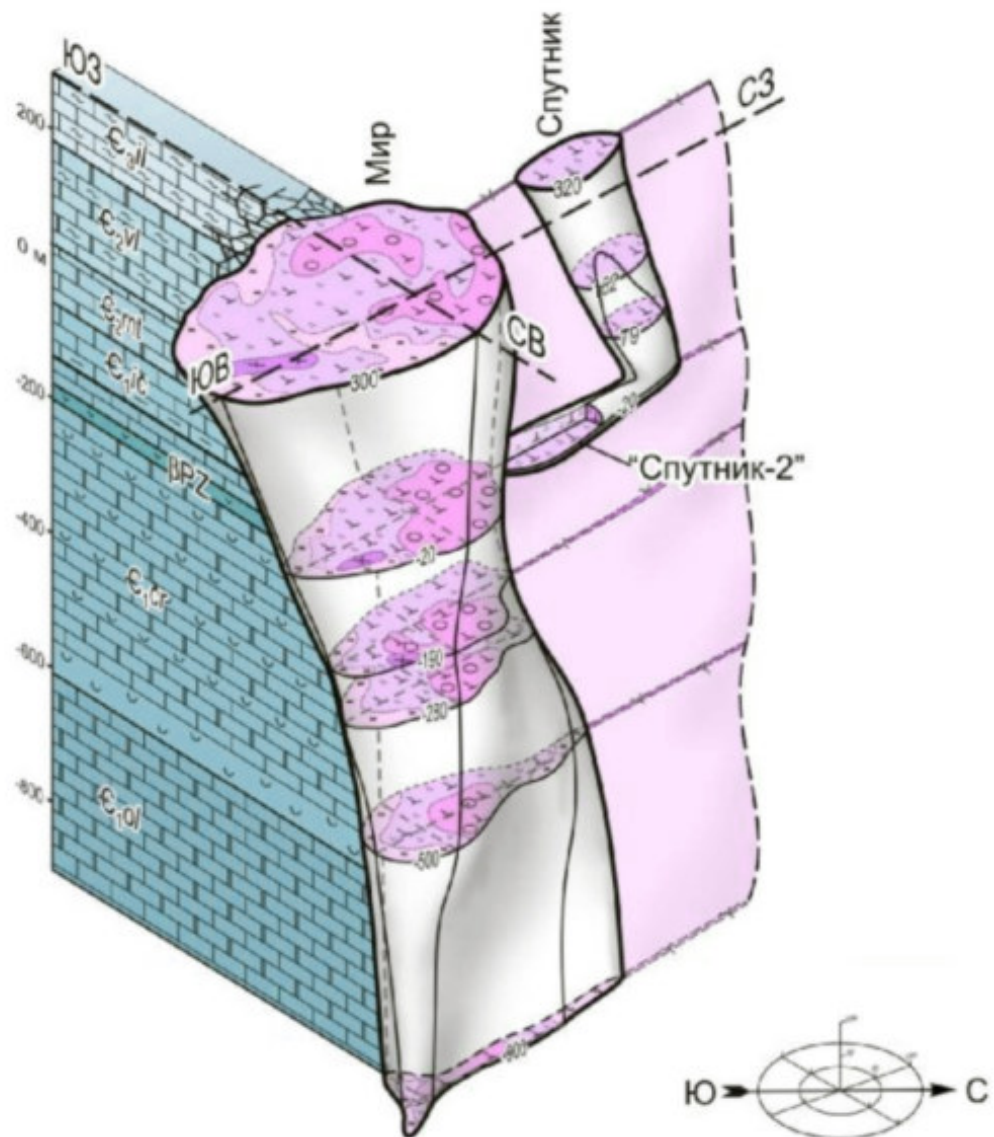


Рис. 1.13. Геологическая модель месторождения трубки Мир [210].

*Трубка Нюрбинская приурочена к Накынскому кимберлитовому полю.* В настоящее время обрабатывается открытым способом (с 2002 г.). Глубина карьера превысила 400 м (рис. 1.14) [210, 209].

В процессе обработки карьера произошло полное вскрытие межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (далее МВВК), и частичное верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса (далее ПВВК).



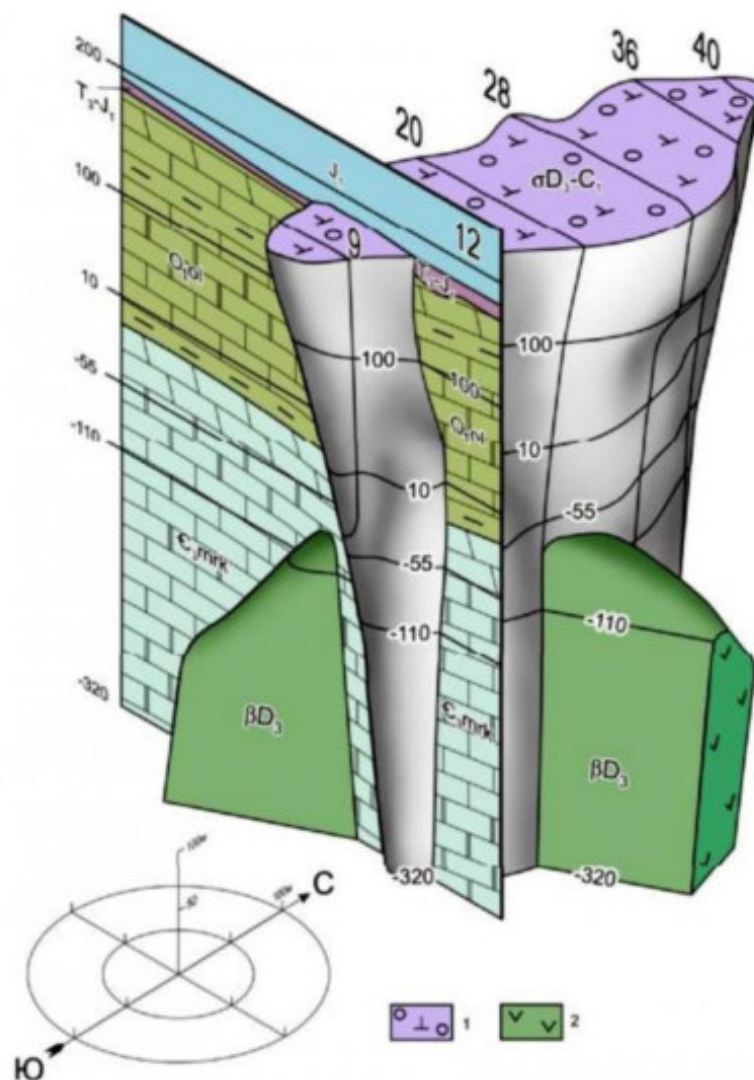
Рис. 1.14. Карьер трубки «Нюрбинская»<sup>7</sup>

Трубка «Нюрбинская» имеет двухфазное строение (рис. 1.15). Автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) представляют вторую вулканическую фазу внедрения и практически полностью слагают кимберлитовую трубку с палео поверхности и до глубины 718 м. Порфировые кимберлиты (ПК) первой - субвулканической фазы внедрения, в коренном залегании, в пределах трубки вскрыты скважинами в интервалах: 718-946 м; 456,8-470,5 м и 367,5-403,0 м. Кроме того, ПК образуют маломощные дайки (0,2-1,5 м), простирающиеся к югу на расстоянии 120 м и северу на расстоянии 40 м. Ксеногенный материал представлен в основном ксенолитами вмещающих терригенно-карбонатных пород.

В контуре кимберлитовой трубки «Нюрбинская» отмечается интрузия щелочных базитов. Её мощность в пределах горизонта -80 м абс. составляет 40-50 м. Простираение его северо-восточное (65–70°), по данным сейсморазведки соответствующее оси Ботубинского разлома, падение достаточно круто (80°–85°) до вертикального. Корневая часть интрузии уходит на

<sup>7</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021

глубины, превышающие по абсолютным отметкам -600 м. Породы слагающее тело представлены призматически-офитовыми субщелочными долеритами.



1 - автолитовая кимберлитовая брекчия, 2 - основные породы дайки.

Рис. 1.15. Геологическая модель трубки Нюрбинская [210].

*Трубка Удачная приурочена к Далдынскому кимберлитовому полю.* Отрабатывалась открытым способом 1971-2015 гг. до глубины 640 м при полном вскрытии верхнекембрийского водоносного комплекса и частичном вскрытии среднекембрийского водоносного комплекса.

После завершения работ открытым способом, было принято решение о продолжении отработки месторождения подземным способом (рис. 1.17) [210]. Система подземного водоотлива построена по принципу централизованного водосбора всех постоянных и временных водопритоков в водосборник главной насосной станции гор. -580 м, с последующей закачкой минерализованных вод в толщу ММП и в нижнекембрийский водоносный комплекс [12; 13].



Рис. 1.16. Карьер трубки Удачная<sup>8</sup>

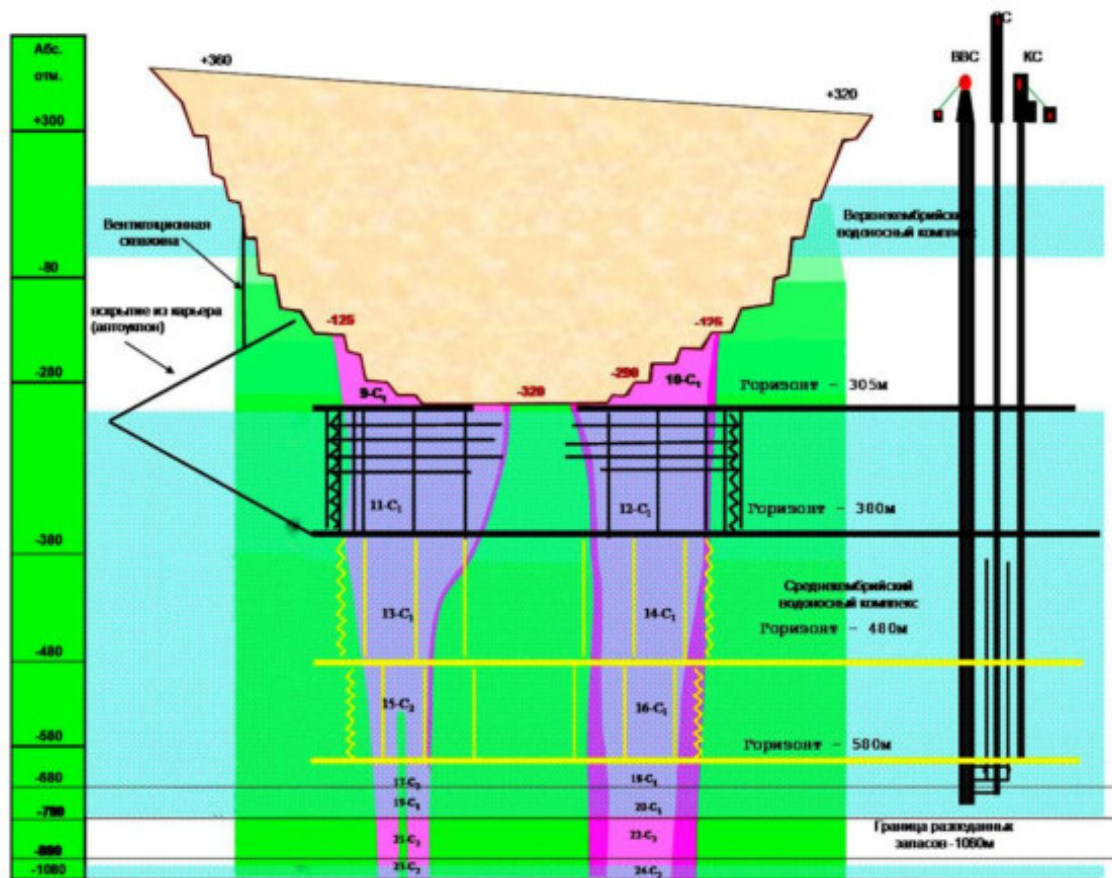


Рис. 1.17. Схема отработки месторождения трубки Удачная [210].

<sup>8</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водоприитоками на месторождении трубки «Удачная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Трубка «Удачная» приурочена к пересечению субширотной системы разломов с разломами северо-западного и северо-восточного простирания. Месторождение состоит из двух кимберлитовых трубок, обособление которых происходит с глубины 250 м, в верхней части на глубинах 0-250 м (в настоящее время отработанной карьером), объединённых в одно кимберлитовое тело (рис. 1.18). Расстояние между обособленными кимберлитовыми телами (западное и восточное) с глубиной возрастает: на отм. -480 м оно составляет 193 м, на отм. -680 м – 304 м, на отм. -880 м – 317 м, на отм. -1080 м – 325 м, увеличение расстояния между телами происходит вследствие сужения кимберлитовых диаметров [336; 337].

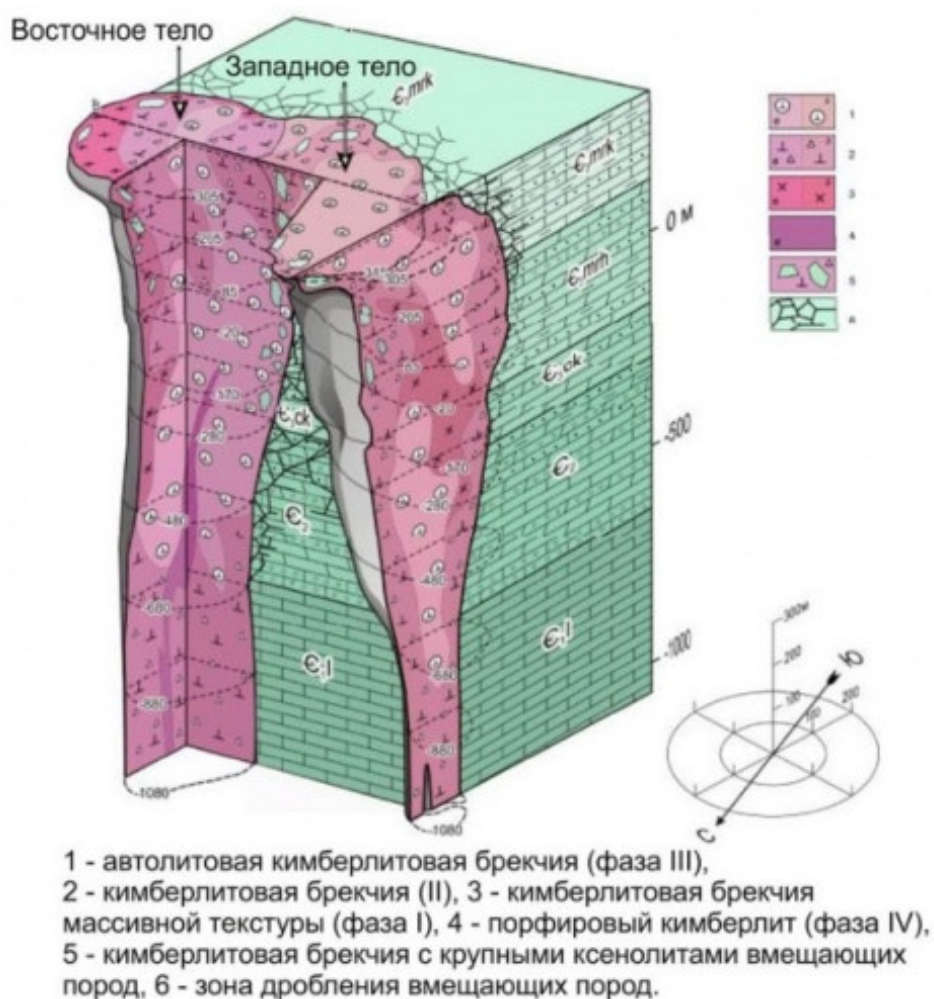


Рис. 1.18. Геологическая модель месторождения трубки Удачная [210]

Западное тело характеризуется несколько вытянутой в северо-западном направлении эллипсоидной формой, с глубиной форма тела меняется, приобретая изометричные формы. Контакты с вмещающими породами в основном резкие, четкие и лишь в редких случаях отмечаются «плавающие» контакты, коррелирующие с зонами брекчирования вмещающих пород. Строение Западного тела достаточно неоднородное, тело в основном сложено автолитовой кимберлитовой брекчией, в краевых частях встречаются реликты порфирового кимберлита. Восточное тело имеет эллипсоидную форму, вытянутую в северо-восточном

направлении. Контакты с вмещающими породами в основном резкие, четкие и лишь в редких случаях отмечаются «плавающие» контакты, коррелирующие с зонами брекчирования вмещающих пород. Строение Восточного тела также достаточно неоднородное, преобладающим типом является автолитовая кимберлитовая брекчия, в краевых частях встречаются реликты порфирированного кимберлита [125].

*Трубка Юбилейная приурочена к Алакит-Мархинскому кимберлитовому полю.* Месторождение отрабатывается открытым способом с 1985 г. Текущим проектом предусмотрена отработка месторождения до глубины 720 м (абсолютная отметка -100 м) при полном вскрытии в верхней части карьера (отм. +620/+470 м) водоносных горизонтов, приуроченных к подозерным таликам, в средней части (отм. +155/+70 м) – НоВК и частичном вскрытии в отм. -20/-100 м – ВВК (рис. 1.19). [210].



Рис. 1.19. Карьер трубки «Юбилейная» (фото А.М. Янникова)

Трубка «Юбилейная» представляет собой удлинённый, неправильной формы, близкой к грушевидной, овал. Простирается по длинной оси северо-восточнее. Размер кимберлитового тела под перекрывающими породами составляет  $1293 \times 741$  м; площадь поверхности составляет около 56 га. С глубиной трубка существенно сужается. При этом в восточной части ее сужение с глубиной происходит более умеренно, чем в центральной и западной. Глубина разведанных запасов – 1300 м от дневной поверхности [210]. Поверхность кимберлитовой трубки «Юбилейная» неровная вследствие неравномерного эрозионно-денудационного среза в докаменноугольно-пермское время. Относительное превышение менее срезанных северной и северо-восточной частей трубки над южной и юго-западной составляет

44–48 м. В западной и центральной частях до глубины 230 м от поверхности (до горизонта +320 м абс.) трубка «Юбилейная» представляет собой типичную трубку взрыва с пологопадающими контактами к центру диатремы с углами падения 30–60°. Глубже 230 м, начиная от основания чашеобразного расширения (горизонт +320 м), контакты трубки приобретают более крутое (70–85°) залегание, придавая рудному телу штокообразную форму (рис. 1.20).

В восточной (суженной) части трубки незначительный раструб наблюдается лишь в приповерхностной части рудного тела до глубины 130 м (+420 м абс.) с падением контактов к центру тела под углами 50–70°. Глубже контакты с вмещающими породами более крутые и падают к центру трубки под углами 75–85° (до 90°). С глубины 430 м от поверхности рудного тела (ниже горизонта +120 м абс.) трубка превращается в дайкообразное тело с субвертикальным залеганием и крутопадающими (85–90°) контактами. Преобладающим является направление падения контактов в сторону рудного тела.

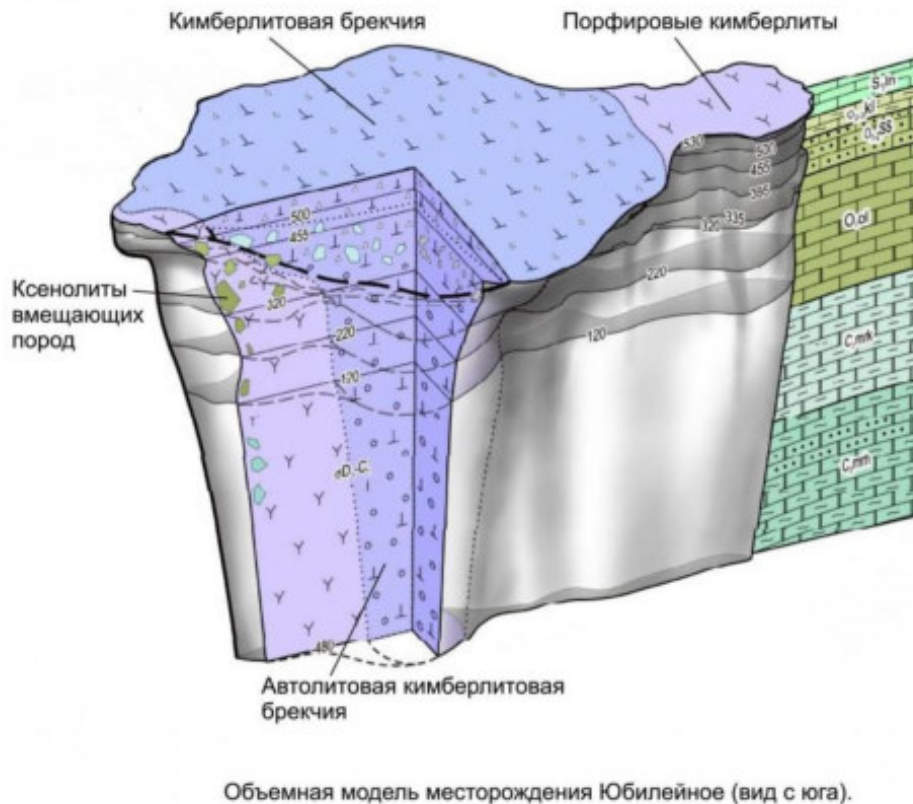


Рис. 1.20. Геологическая модель трубки Юбилейная [210]

Трубка «Юбилейная» имеет сложное внутреннее строение, обусловленное двумя основными фазами внедрения кимберлитов. Представлена тремя кимберлитовыми телами - Центральным, Западным и Восточным, сложенными несколькими разновидностями кимберлитов, различающимися по текстурно-структурным особенностям, вещественному составу и степени алмазоносности.

По параметрам водопроницаемости и проницаемости неизменённые кимберлиты данного месторождения относятся к слабопроницаемым породам, имеющиеся в кимберлитовом теле трещины полностью залечены. Однако в интервалах залегания коллекторов нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносного комплекса отмечаются интервалы, характеризующиеся коллекторскими свойствами.

Трубка «Юбилейная» полностью перекрыта туфогенными породами верхней перми – нижнего триаса и маломощными полого-секущими телами долеритов, залегающими в верхних частях разреза терригенной толщи.

#### ***1.4 Выводы – обоснования научных и прикладных задач, решаемых в рамках диссертационного исследования***

Особенности криогидрогеологических условий кимберлитовых трубок Западной Якутии, перечисленные ранее, требуют постоянного изучения и актуализации. Это прежде всего связано с формированием природно-техногенных динамических систем, которые существенно влияют на изменение локальных криогидрогеологических обстановок в шахтных полях месторождений и на участках закачки. Дополнительным фактором выступает постоянное и планомерное увеличение глубины отработки, связанное с морфологией обрабатываемых кимберлитовых тел, которые, по сути, являются крутопадающими дайкообразными или штокообразными телами.

Детальное криогидрогеологическое изучение Якутской алмазоносной провинции в целом и в пределах шахтных полей уникальных кимберлитовых трубок в частности, обусловлено необходимостью обеспечения промышленной и экологической безопасности при ведении горных и добычных работ, защиты выработок рудников и карьеров от возможного затопления и загазованности. Данное диссертационное исследование будет способствовать накоплению опыта, необходимого для разработки других месторождений и устойчивого развития алмазодобывающей отрасли РФ.

Ключевыми проблемами, возникающими в процессе отработки кимберлитовых трубок и рассмотренными автором в рамках представленной работы, являются:

1. Недостаточное количество информации о криогидрогеологических и газодинамических условиях крупнейших месторождений на глубинах свыше 800–900 м от дневной поверхности. Данный факт требует дополнительного изучения гидрогеологических и газодинамических условий кимберлитовых полей, а также ключевых месторождений, в интервалах, не изученных ранее, т.к. развитие горных работ определяет необходимость увеличения глубины гидрогеологической стратификации разрезов, выделения интервалов коллекторов, изучения их флюидной насыщенности и др.

2. Строительство таких сложных инженерных сооружений, как алмазные рудники и сопряженных инфраструктурных объектов, размещаемых, в том числе, на глубинах более 1000 м от дневной поверхности в уникальных горно-геологических условиях, требует существенной детализации гидрогеологических условий, составления соответствующих прогнозных карт притоков, необходимых не только для обеспечения безопасной отработки всего месторождения, но и для рационального размещения насосных станций, слепых скиповых стволов и др. Недостаточно детальное изучение криогидрогеологических условий и особенностей динамики изменений гидродинамического режима, применительно к конкретным кимберлитовым трубкам и шахтным полям, чревато повторением аварийных ситуаций и инцидентов, сопровождающихся не только существенными экономическими издержками, но и гибелью людей, потерями активов и возникновению очагов социальной напряженности.

3. Оработка целого ряда месторождений требует проведения опережающего водопонижения, что, в свою очередь, приводит к формированию дополнительной техногенной нагрузки на геологическую среду в пределах изучаемой территории. Сопутствующая закачка дренажных рассолов в недра, реализованная на горных предприятиях, формирует предпосылки для создания сложных природно-техногенных систем, требующих не только текущего изучения, но и последующего прогнозирования, т.к. они являются новыми объектами, не имеющими полных аналогов, по ряду ключевых показателей: наличие криогенной толщи, литолого-фациальные и структурно-тектонические условия, а также химический состав вод, находящихся в обращении.

4. Использование недр для закачки дренажных вод создаёт предпосылки для изменения геотермического режима в пределах участков закачки. Степень техногенного воздействия напрямую связана с интенсивностью эксплуатации, типом используемых коллекторов, а также начальными криогидрогеологическими условиями в пределах отдельно взятого участка. Изучение динамики изменений геотермического режима, является одной из самых важных составляющих для определения и разработки наиболее эффективного и безопасного способа обращения с высокоминерализованными дренажными и оборотными водами.

5. Повсеместное наличие природных рассолов, характерное для коренных месторождений алмазов Западной Якутии, влияет не только на проектируемые системы водозащиты рудников, но также ставит вопросы о перспективах их использования в качестве гидроминерального сырья по ряду ценных компонентов, а также их влияния на применяемые технические решения по осушению и водоотведению.

Проводимые исследования были направлены на доизучение и сопутствующий анализ криогидрогеологических и газодинамических условий отработки целого ряда ключевых коренных месторождений: трубок Айхал, Ботуобинская, Интернациональная, Мир, Нюрбинская,

Удачная и Юбилейная, находящихся в пределах четырёх кимберлитовых полей, составляющих основу всей алмазодобывающей промышленности РФ. Необходимо отметить, что мощность впервые изучаемых толщ вмещающих пород по отдельным месторождениям была значительна, а именно:

– Для месторождений Алакит-Мархинского кимберлитового поля были уточнены криогидрогеологические и газодинамические условия, а также проведена соответствующая стратификация (выделение коллекторов и др.). Для трубки Айхал в интервале глубин 600/1100 м от дневной поверхности; и 720/1500 м для трубки Юбилейная.

– В рамках Далдынского кимберлитового поля, криогидрогеологические условия отработки месторождений были охарактеризованы до глубины 1830 м от дневной поверхности. Исследования были проведены как по новым скважинам, пробуренным в условиях подземного рудника Удачный, так и с дневной поверхности в пределах участков закачки Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный. Результатом явилась детализация и уточнение гидрогеологических и газодинамических условий в интервале 830/1830 м.

– Изучение криогидрогеологических и газодинамических условий Мирнинского кимберлитового поля было выполнено не только в пределах межсолевой формации – породах олекминской, толбачанской, эльгянской, нелбинской и юрегинской свит, но и в интервале первого подмерзлотного регионального метегеро-ичерского водоносного комплекса. Гидрогеологические условия были уточнены до глубин 1000 м от дневной поверхности и впервые детально изучены в интервале 1000/1750 м.

– По Накынскому кимберлитовому полю был проведен полный комплекс исследований, позволивший выполнить соответствующую характеристику до глубин 800 м от дневной поверхности.

Дополнительным фактором, требующим отдельного рассмотрения, является влияние структурно-тектонического строения шахтных полей отдельных месторождений на локальные вариации криогидрогеологических условий, прежде всего заключающиеся в плановом распределении параметра водообильности вскрываемых коллекторов. Определение степени влияния, и сопутствующее изучение планового распространения являются областью практического применения. Т.к. одной из задач является составление карт прогнозных притоков, позволяющих повысить качество прогнозирования изменения условий в процессе отработки месторождений и улучшить планирование горных, проходческих и добычных работ без потери главного условия – общей промышленной безопасности и нетерпимости к аварийным ситуациям и т.д.

Дальнейшая разработка проектов гидрогеологического мониторинга, являющихся краеугольными камнями обеспечения безопасности ведения добычных и горных работ, также

требует более детальной информации о структурно-тектонических и криогидрогеологических условиях, как самих месторождений, так и сопряженных участков закачки, и их взаимного влияния друг на друга.

Формирование в результате отработки месторождений сложных и динамических природно-техногенных систем требует применения современных программных продуктов моделирования для своевременного построения «цифровых двойников» изучаемых объектов, позволяющих выполнять прогнозирование изменения гидродинамического режима как на локальном, так и в ряде случаев региональном уровне.

При этом в процессе построения «цифрового двойника» изучаемого объекта важной проблемой является реализованный способ утилизации дренажных рассолов, в зависимости от его территориального расположения и определяемые криогидрогеологическими особенностями конкретного кимберлитового поля. Дополнительным фактором является прогнозирование изменения геотермического и гидродинамического режимов выделенных в разрезе водоносных горизонтов и комплексов в результате оказываемого техногенного воздействия на протяжении всего жизненного цикла разрабатываемых месторождений.

Другими словами, проводимые исследования были направлены на получение актуализированной и зачастую пионерной информации о криогидрогеологических и газодинамических условиях объектов изучения (кимберлитовых трубках), достаточной для последующей их эксплуатации, как минимум, до середины XXI века.

Учитывая во многом новаторский характер работы, данное диссертационное исследование является источником достоверной информации для научных сотрудников специализированных организаций, геокриологов и специалистов в области гидрогеологии и инженерной геологии.

## ГЛАВА 2. ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЕ, КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И СТРУКТУРНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО, ДАЛДЫНСКОГО, МИРНИНСКОГО И НАКЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЕЙ<sup>9</sup>

Формирование и последующие изменения криолитозоны в пределах изучаемой территории в целом были обусловлены глобальными изменениями климата, которые, по текущим представлениям, начали происходить с конца неогена. Развитие мощной криогенной толщи по установленным закономерностям [70, 180] контролируется тремя основными параметрами: температурой поверхностного слоя, теплопроводностью горных пород и мантийным тепловым потоком. Все четыре изучаемых кимберлитовых поля расположены в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород, и характеризуются отрицательными среднегодовыми температурами воздуха (от -5 до -11°C), высокой теплопроводностью горных пород (2,0–4,2 Вт/(мК)) и достаточно низким тепловым потоком (21–30 мВт/м<sup>2</sup>) [29; 70; 180; 206; 302; и др.].

Изучение криолитозоны на территории Западной Якутии начались в 60-е годы XX века. По результатам глубокого бурения и сопряжённых геотермических наблюдений по скважинам Мархинская-1 и Мархинская-2, было установлено, что суммарная мощность горных пород, имеющих отрицательные температуры, достигает 1450 м [249]. Последующие наблюдения, проведенные коллективом авторов [70; 206], позволили определить границы толщи отрицательно температурных горных пород: замеренная температура, как правило, составляла от -2,9 до -8,75 °С (рис. 2.1), а мощность от 720 до 1100 м. Дополнительно были выявлены участки, характеризующиеся аномальным распределением температуры, приуроченные к зонам гидрогенных таликов. Геотермический градиент составлял 0,3–1,1°C/100 м [16; 17; 29; 178; 179; 180; 181].

---

<sup>9</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО: Потуроев А. А., Голубева Т. В., Борисов Г. К., Авраменко В. И., Мосиенко Б. А. и др. Отчёт о результатах работ по теме «Структура кимберлитовых полей и тектонический контроль размещения кимберлитов Далдыно-Алаakitского района» / Фонды АмГРЭ. Нюрба, 1974.

Потуроев А. А., Кружалова Е. Ф. и др. Отчёт о результатах работ по теме № 24 «Составление прогнозных карт для Далдыно-Алаakitского района за 1975-1977 гг.» / Фонды АмГРЭ, 1977.

Моров А. В. Отчёт определение таликовых зон на участке оз. Травянистое / Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2018.

Янников А.М. Гидрогеологические условия месторождения Майское (Накынское кимберлитовое поле). Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

Янников А.М. Информационный отчёт: «О результатах бурения гидрогеологических и инженерно-геологических скважин на горизонте - 480 рудника «Удачный». Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Янников А. М. Отчёт «Научно-методическое сопровождение бурения скважин на хвостохранилище ОФ 14». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

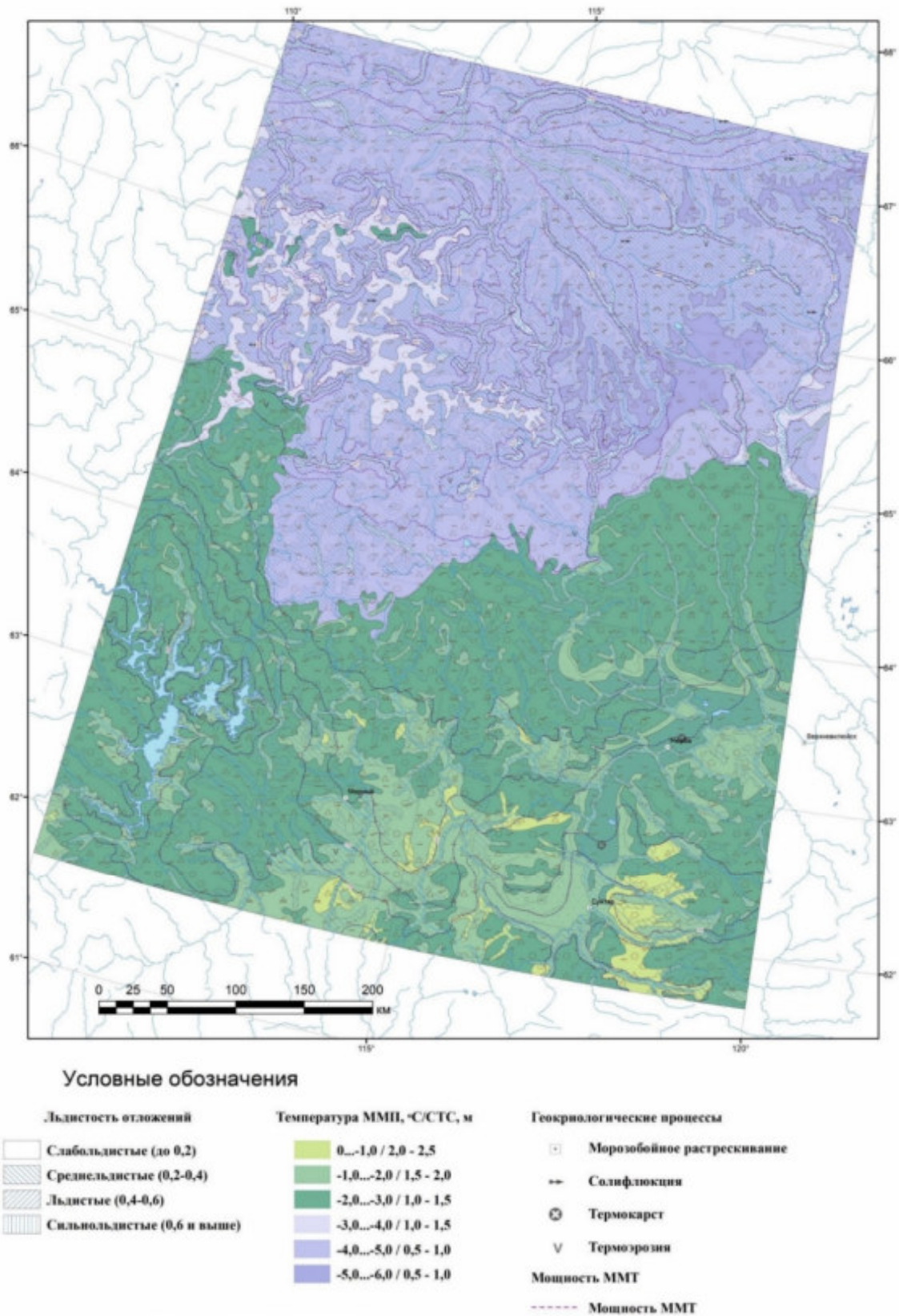


Рис. 2.1. Геокриологическая карта Западной Якутии М 1:1 000 000  
(по материалам ИМЗ СО РАН)<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Семенов В.П. Современное состояние и прогноз развития криолитозоны Западной Якутии. Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2024.

Проведенные ранее исследования позволили получить базовую информацию о региональных геокриологических условиях. Однако в настоящее время обращает на себя внимание недостаточная площадь наблюдательных станций: при площади территории исследований более 500 тыс. км<sup>2</sup>, функционирует порядка 10, когда оптимальным считается расстояние между станциями 50–60 (до 150) км. Недостаточное покрытие территории не позволяет в полной мере обеспечить изучение геокриологических условий территории в динамике, с учётом происходящих климатических изменений и техногенной нагрузки, возникающей по причине развитой горнодобывающей промышленности. Интенсивное техногенное воздействие, по мнению автора, прежде всего заключающееся, в перемещении за последние 25 лет в процессе «откачка-закачка» более 400 млн. м<sup>3</sup> высокоминерализованных дренажных вод, формирующихся в процессе отработки коренных месторождений алмазов, оказало существенное влияние на геокриологические условия территории и потребовало соответствующего изучения.

Отдельно необходимо отметить, что интенсивность техногенного воздействия и его площадь, крайне неравномерно распределены по территории исследований и характеризуются локальными особенностями, что, в свою очередь, требует отдельной характеристики каждого кимберлитового поля. В текущей главе приведена краткая характеристика геокриологических условий изучаемых кимберлитовых полей (рис. 2.2), в последующих главах рассмотрены условия отдельных шахтных, карьерных полей и сопряжённых участков закачки. Исследования, проводимые автором, безусловно, базировались на имеющейся обширной базе, как нормативной документации, так и на опубликованных и фондовых трудах учёных и специалистов (Абрамов В.Ю., Авдеева В.И., Агринский А.В., Акишев А.Н., Алексеев В.Р., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Андреева С.М., Анциферов А.С., Асташкин В.А., Атрощенко Ф.Г., Афанасенко В.Е., Балашов Л.С., Балашов Ю.А., Балобаев В.Т., Баранов И.Я., Басков Е.А., Бобров А.К., Борисов В.Н., Ваганов В.И., Васильчук Ю.К., Вахромеев А.Г., Великин С.А., Вельмина Н.А., Власов Н.А., Всеволожский В.А., Втюрин Б.И., Гавич И.К., Гензель Г.Н., Гиниятулин И.М., Гинсбург Г.Д., Готовцев С.П., Девяткин В.Н., Дроздов А.В., Ершов Э.Д., Ефимов А.И., Железняк М.Н., Иванов А.В., Иост Н.А., Карцев А.А., Кирюхин В.А., Климентов П.П., Климовский И.В., Колганов В.Ф., Косыгин Ю.А., Крайнов С.Р., Лобанов В.В., Мельников П.И., Милашев В.А., Мироненко В.А., Овчинников А.М., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Толстихин Н.И., Устинова З.Г., Хаин В.Е., Харьков А.Д., Шварцев С.Л., Швецов П.Ф., Шепелёв В.В. и др.).

Мирнинское кимберлитовое поле расположено в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП) [228; 229]. Формирование и развитие этой зоны связано с низким радиационно-тепловым режимом горных пород и особенностями природной обстановки, т.е. географическим положением [29; 32].

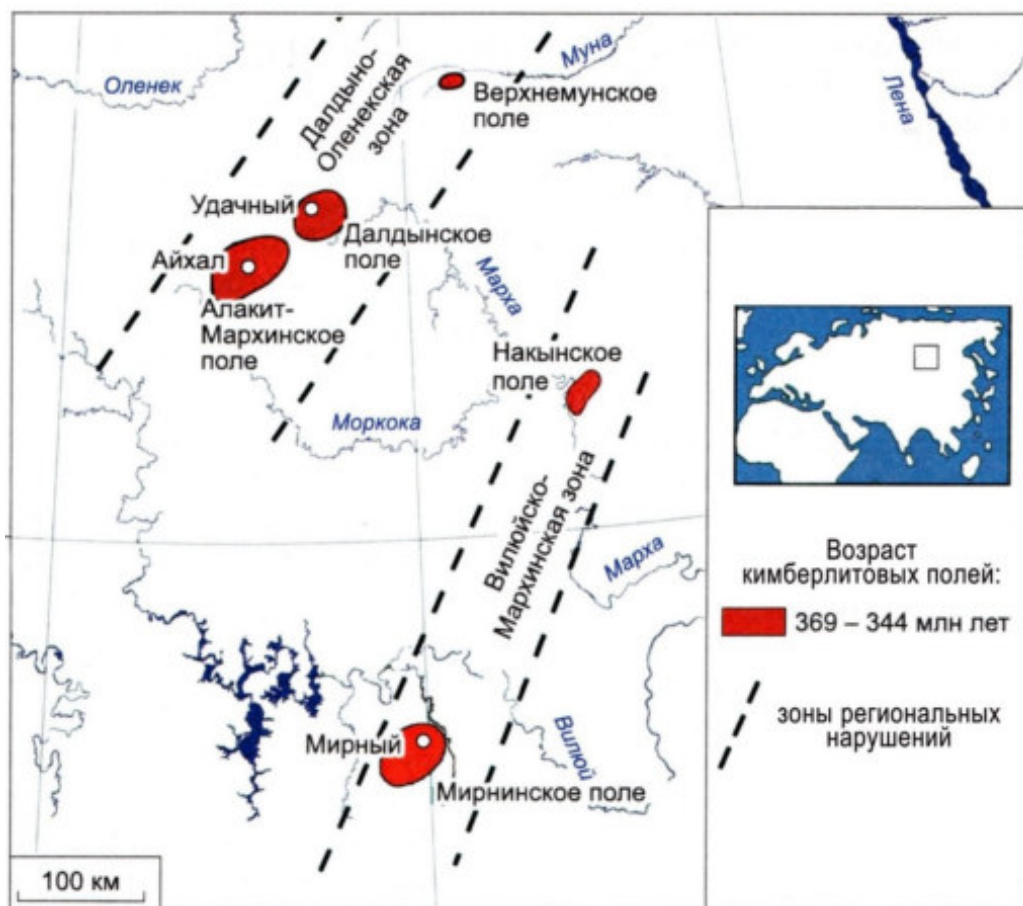


Рис. 2.2. Обзорная карта кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции (по Костровицкому и др. [62] с дополнениями)

Немаловажную роль играет высокая теплопроводность кембрийских отложений, представленных известняками, доломитами, мергелями, слоями каменной соли (табл. 2.1).

Таблица 2.1 - Коэффициенты теплопроводности кембрийских отложений (сост. А.М. Янников)

Название породы	Состояние пород	
	талое	мёрзлое
Глинистые известняки	2,1–2,3	
Песчанистые, песчано- и глинисто-алевритистые известняки	4,5	5,2
Доломит	3,5–5,1	4,6–5,1
Каменная соль	4,9–6,7	
Ангидрит	3,3–5,2	3,7–5,3
Гипс	0,9	
Долерит	2,05	
Кимберлит	2,2	
Мергели глинистые	~ 2,0	
Мергели известковистые доломитовые	~ 2,6	
Алевролит и аргиллит	2,8–3,1	

Приведенные в таблице значения были получены по керновым пробам, отобраным автором в процессе сопровождения глубокого бурения в пределах шахтных полей трубок Мир и Интернациональная. Определение коэффициента теплопроводности выполнялось в

специализированных лабораториях ООО Корунд, ОАО НПП ВНИИГИС и ИМЗ СО РАН. Необходимо отметить, что полученные данные в целом соответствуют (сходимость до 95%) результатам исследований В.Т. Балобаева и В.Н. Девяткина.

Мощность ММП определяется кровлей метегеро-ичерского водоносного комплекса и изменяется в довольно широких пределах: от 74 м на юго-западе района (Таас-Юряхская площадь) до 480 м на северо-западе. Максимальные мощности характерны для северной и северо-восточной половины площади и составляют в среднем 250–350 м. В юго-западной половине мощности уменьшаются до 200–100 и менее. В среднем течении р. Нюя (Ленский район) по данным бурения скважин мощность ММП составляет 30–100 м [28; 29; 395; и др.].

Под толщей многолетнемерзлых пород залегают охлаждённые породы третьего яруса криолитозоны, насыщенные высокоминерализованными рассолами. Мощность зоны отрицательных температур в пределах изучаемой территории превышает 600 м. Максимальная отмечена в районе трубок Мир и Интернациональная (720 м). Во всех направлениях от них она постепенно уменьшается, достигая минимальных значений на юге и юго-западе.

Границы залегания минимальной температуры горных пород не всегда постоянны, а изменяются во времени, что позволяет увязывать все изменения температурного поля с поверхностью (в зависимости от среднемесячных и среднегодовых колебаний температур). Максимум отрицательной температуры и глубина его залегания связаны с расчленённостью рельефа. Ниже максимума отрицательных температур наблюдается постепенное её увеличение. Средняя величина геотермических градиентов составляет  $0,35^{\circ}\text{C}$  на 100 м. Ниже нулевой изотермы с ростом глубины температура принимает положительные значения [398]. По результатам проведенных исследований 2012–2017 гг. (табл. 2.2) было установлено, что мощность первого и второго яруса криолитозоны и общей мощности криолитозоны коррелируют с геоморфологическим положением наблюдательных скважин.

Как правило, в долинах рек (Вилуей, Малая Ботуобия) отмечалась самая низкая замеряемая температура ( $-3/-4^{\circ}\text{C}$ ) регистрировалась на глубине 60–80 м. На склонах и водоразделах максимум отрицательной температуры ( $-2/-3^{\circ}\text{C}$ ) фиксировался на глубине 100–200 м.

Также в процессе проведенных исследований для Мирнинского кимберлитового поля была уточнена величина геотермического градиента, она составила от 0,12 до  $1,8^{\circ}\text{C}$  на 100 м. Ниже нулевой изотермы с ростом глубины температура горных пород принимает положительные значения. Величина геотермического градиента составляет от 0,4 до  $0,5^{\circ}\text{C}$  на 100 м.

Территория Далдынского кимберлитового поля входит в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы (североконтинентальная подзона), которая характеризуется [128; 299; 321]:

- сплошным распространением многолетнемерзлых пород (ММП);
- непрерывностью мощной криогенной толщи, составляющей до 800 м (в пределах перспективной площади Сугунахской структуры);
- температура пород первого яруса криолитозоны в неизмененных условиях составляет от -2 до -6 °С.

Таблица 2.2 – Геотермические параметры по скважинам (2012–2017 гг.)  
(сост. А.М. Янников с использованием данных Иост Н.А.<sup>11</sup> с дополнениями)

№ скважины	Абс. отметка устья скважины, м	Мощность первого и второго ярусов криолитозоны, м	Общая мощность криолитозоны, м	Глубина залегания минимальной температуры, м °С на подошве слоя
<b>83</b>	330,9	326,9	730	<u>40-80</u> -2,08
<b>503</b>	191,96	280,6	470	<u>80</u> -2,92
<b>301</b>	401,0	385,3	730	<u>180-200</u> -1,41
<b>501</b>	178,1	234,8	480	<u>60-80</u> -4,02
<b>506</b>	301,2	340,8	580	<u>60</u> -2,4
<b>508</b>	305,7	326,2	610	<u>60-80</u> -2,44
<b>514</b>	217,95	321,6	690	<u>40-60</u> -2,62
<b>557</b>	310,0	184,1	690	<u>180</u> -2,59
<b>М-8</b>	343,2	344,8	690	<u>160</u> -2,28
<b>549</b>	291,2	390,5	560	<u>120</u> -3,04
<b>97</b>	309,3	326,4	670	<u>80</u> -2,17
<b>102</b>	335,7	313,0	-	<u>160</u> -2,39
<b>107</b>	347,6	304,7	-	<u>120-140</u> -2,2

<sup>11</sup> Иост Н.А. Отчет по комплексному анализу работы системы обратной закачки дренажных вод карьера Мир за период 1990-2014 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

Основной чертой климата региона является резкая континентальность, северная часть территории Далдынского кимберлитового поля характеризуется субарктическим климатом. Низкая среднегодовая температура воздуха и отрицательный годовой радиационный баланс ( $-0,5 \dots -2,0$  ккал/см<sup>2</sup>·мес) благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию температурных полей мерзлых массивов. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности и формируется, кроме всего, под воздействием климатических, ландшафтных, геоморфологических и других факторов [317; 318; 349; 350; и др.].

Многолетнемерзлые породы представлены карбонатно-глинистыми отложениями моркокинской, реже мархинской свит, а на участке «Киенгский» еще и породами онхойюряхской свиты и олдондинской свиты нижнего ордовика [161]. Криогенная толща района имеет трехъярусное строение (табл. 2.3) [114; 352-354; 406].

Таблица 2.3 – Строение криолитозоны в пределах Далдынского кимберлитового поля (сост. А.М. Янников с использованием данных [166] с дополнениями)

Название толщи (мощность, м)		
Верхняя часть литосферы	Ярус	Водоносный комплекс
Криолитозона (620–850)	Мерзлых пород (60–250)	спорадически межмерзлотный (5–10)
	Морозных пород (20–50)	отсутствует
	Охлажденных пород (430–550)	Верхнекембрийский комплекс (ВВК)
		Среднекембрийский комплекс (СВК)

Верхний ярус слагают ММП, содержащие льды различных типов, заполняющих поры, каверны, трещины [47; 301; 322;]. Нижний ярус состоит из охлажденных пород, пустоты которых заполнены солеными водами и рассолами с отрицательной температурой – криопэгами [115; 119; 120; 121]. Промежуточное значение занимает ярус морозных недонасыщенных пород. Необходимо отметить, что в процессе различных исследований последних лет в регионе представление о строении верхнего яруса криолитозоны несколько изменилось. Некоторыми скважинами в толще ММП зафиксированы реликтовые линзы соленых вод и рассолов в нижнеордовикских отложениях. Изолированность и линзообразный характер таких водонасыщенных толщ доказан с помощью опытно-фильтрационных исследований. Наличие реликтовых линз послужило основанием для выделения межмерзлотного типа подземных вод [127; 132; 298]. Как правило, такие линзы межмерзлотных вод в кровельной их части сопровождаются талыми породами, не содержащими гравитационную воду. Они служат зоной

постепенного перехода от ММП к водонасыщенным и одновременно охлажденным породам, имеющим отрицательную температуру [199; 323; 324; 325]. Мощность этой переходной зоны незначительная и не превышает 10 м. Кроме того, в мерзлой толще встречаются единичные маломощные (до 1–5 м) линзы талых пород, не содержащие гравитационную воду. Они могут залегать на различных глубинах в зависимости от мощности яруса ММП [145].

Мощность верхнего яруса криолитозоны (ММП) в пределах территории исследований составляет не менее 150 м, и зависит преимущественно от рельефа и структурно-тектонических особенностей горных массивов [277; 278; 320]. Например, в центре Сугуннахского блока мощность первого и второго ярусов криолитозоны составляет более 600 м. Зафиксированная мощность является аномальной, т.к. обычно составляет 200–300 м.

Плотные породы (известняки, доломиты) разбиты вертикальными и наклонными трещинами скола шириной 0,5–2,0 см. Также фиксируются интервалы пористых и кавернозных известняков. Диаметр каверн составляет 0,2–0,5 см, а иногда достигает 1,5–2,0 см. Мерзлые породы имеют трещинные, пластово-трещинные и пластово-трещинно-карстовые криогенные текстуры. Лед в трещинах чистый, прозрачный, иногда в его массе заключены пропластки мергелей и известняков. Объемная льдистость пород изменяется по разрезу от 20 до 5 %. Влажность глинистых известняков составляет 6–14 %. В ряде случаев скважинами вскрыты пачки монолитных крепких известняков и доломитов мощностью 2–5 м. Пленки льда визуальны только на сколе образцов. Подошва ММП фиксируется на глубине 70–230 м. Влажность этих литологических разностей не превышает 1–2 %. Ниже по разрезу до кровли первого от поверхности водоносного комплекса прослеживается 40–60 - метровая толща морозных горных пород без включений льда.

Криогенное строение осадочных пород в зонах тектонических нарушений изучено по керну скважин глубиной 60–280 м. Установлено, что зоны дробления осадочного чехла отличаются интенсивной трещиноватостью и связанной с ней льдистостью. Породы в них местами превращены в щебень и сцементированы льдом. В приповерхностных интервалах в этом случае отмечаются расширенные трещинные, трещинно-жильные и базальные криогенные текстуры. Ниже по разрезу осадочные толщи разбиты вертикальными и наклонными трещинами шириной от 0,5 до 12,0 см. Лед в трещинах чистый, прозрачный. В его массе заключены обломки пород. Трещины напластования зафиксированы только в глинистых известняках и мергелях. В ряде случаев скважинами на глубинах 28, 35, 70 м вскрыты жилы льда мощностью 1,0–1,5 м. А иногда до 3,0 м. Как правило, лёд с большим количеством пузырьков газа. В интервале глубин 30–180 м породы также отличаются значительной нарушенностью и льдистостью, значения которой составляют 10–35%. Лёд в трещинах прозрачный с пузырьками воздуха. Ширина трещин

от 2 до 8 см. Кроме трещиноватости интервал характеризуется наличием каверн, заполненных льдом. Размеры каверн различные – от 1 до 8 см в диаметре [166].

В интервале 180–200 м трещиноватость заметно уменьшается. Величина объёмной льдистости составляет 5–10%, а ширина трещин не превышает 2 см. На глубине 200–220 м отмечены только каверны (0,5–1,0 см в диаметре), заполненные льдом. Ниже 220 м отмечается монолитная морозная толща, в которой включения льда не фиксируются. Подошва этого слоя соответствует кровле первого от поверхности подмерзлотного водоносного комплекса.

Криолитозона в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля имеет наибольшую мощность первого и второго ярусов в рамках изучаемой территории: превышающую на водоразделах 750 м, составляя в среднем от 500 до 700 м. Мощность третьего яруса охлаждённых рассолонасыщенных пород составляет 100–150 м. Существенное увеличение мощности первого и второго ярусов связано с геоморфологическими особенностями, а именно гипсометрическими отметками дневной поверхности, составляющими на водоразделах от 600 до 770 м. Нулевая изотерма в пределах кимберлитового поля залегает на глубинах от 700 до 1000 м [166; 393]. В пределах криолитозоны выделяется межмерзлотный нижнеордовикский водоносный комплекс, как правило, приуроченный к зонам динамического воздействия основных разрывных нарушений (региональных, кимберлитконтролирующих разломов и т.д.) [414].

Мощность первого и второго ярусов криолитозоны в пределах Накынского кимберлитового поля составляет от 300 до 400 м. и хорошо коррелируется с гипсометрическими отметками дневной поверхности. Нулевая изотерма в пределах Накынского кимберлитового поля залегает на глубине от 700 до 900 м [166; 406]. В пределах криолитозоны выделяется межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс, как правило приуроченный к зонам динамического воздействия основных разрывных нарушений (региональных, кимберлитконтролирующих разломов и т.д.).

Полученные в процессе исследований – проведения термометрии по наблюдательным скважинам Алакит-Мархинского, Далдынского и Накынского кимберлитовых полей, величины геотермических градиентов составили от 0,2 до 1,2°C, что соответствует полученным ранее параметрам [29; 166; 180; и др.].

Приведенная краткая характеристика геокриологических условий позволяет сделать следующие выводы:

– подземные воды зоны активного водообмена в пределах изучаемых кимберлитовых полей, за исключением гидрогенных таликов, полностью проморожены. Сформированные льды имеют различную минерализацию от 1 до 18 г/литр, при этом доминируют пресные и солоноватые – до 85% отобранных проб имели минерализацию 1-3,5 г/литр [29; 166; 406; и др.].

Минерализация вод криолитозоны, находящихся в твердой фазе, является определяющим фактором при формировании в толще ММП из-за закачки высокоминерализованных дренажных вод, техногенных водоносных горизонтов;

– формирование мощной пачки горных пород, имеющих отрицательную температуру, определило криогидрогеологические условия Западной Якутии, а именно отношение выделяемых в разрезе водоносных комплексов и горизонтов, а также способствовало формированию межмерзлотных криопэгов;

– экранирующая способность ММП способствовала накоплению углеводородных газов, особенно в отметках отрицательно температурных пород, а в ряде случаев, например, как на трубке Зарница, привела к формированию газогидратов [166; и др.];

– процессы криогенного метаморфизма наиболее интенсивно проявили себя в рамках Мирнинского кимберлитового поля, оказав влияние на формирование емкостных параметров 8-го коллектора ичерской свиты [386; 399].

Учитывая вышесказанное, в настоящей главе выполнен анализ криогидрогеологических условий и обоснование структурно-гидрогеологических моделей четырёх кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции: Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского. Криогидрогеологические условия определяются их расположением, относительно структур третьего порядка: антеклиз, синеклиз, выступов и седловин Сибирской платформы. Их сопоставление и построение структурно-тектонических моделей необходимо для обоснования способов утилизации дренажных вод и для решения задач по защите существующих и проектируемых карьеров и рудников от затопления.

Криогидрогеологические условия Западной Якутии, описанные по результатам съёмочных работ [71; 72; 118; 132, 133; и др.], не смотря на фундаментальность представленной информации, являлись региональными и нуждались в существенном уточнении и локализации, в виду сложных криогидрогеологических условий, как кимберлитовых полей, так и отдельных месторождений в частности. Проблемы, возникающие при гидрогеологическом районировании территории, отмечали многие учёные гидрогеологи: Антышко Б.Е., Зайцев И.К., Каменский Г.Н., Кирюхин В.А., Пиннекер Е.В., Степанов В.М., Толстихин Н.И., Шварцев С.Л. и др., также неоднократно подчёркивалась практическая значимость таких работ и их влияние на промышленное развитие и освоение территорий, проектирование карьеров и рудников, планирование добычных работ и т.д. С точки зрения гидрогеологической схематизации, геологическая среда разделяется на два вида пород: имеющих различного рода флюидное насыщение (коллекторы) и не содержащих гравитационно-свободных флюидов (гравитационных вод и др.). Выделяемые в разрезе коллекторы группируются в отдельные водоносные горизонты, объединяемые в водоносные комплексы, которые в свою очередь формируют

гидрогеологические этажи. Учитывая роль водовмещающих (флюидовмещающих) пород, становится очевидным, что для правильной оценки и характеристики криогидрогеологических условий, требуется подробное изучение и детальный анализ развития геологических структур, особенно динамики изменения структурно-тектонических условий в различные геологические периоды и сопутствующих обстановок осадконакопления, магматических активизаций и др. Так как в платформенных условиях именно структуры осадочного чехла, тесно связанные с блоковым строением кристаллического или складчатого фундамента, определяют условия залегания подземных вод, а также формирование их химического состава.

Важным вопросом остаётся масштаб изучаемого объекта. На наиболее низкоранговом уровне еще Пиннекером Е.В. были выделены два простых вида: поровый и трещинный, которые также определяются, типом коллекторов [279-289]. Дальнейшее усложнение рассматриваемого вопроса, во взаимоувязке не только с литологическим типом коллекторов, но и с условиями залегания, позволяет выделить ряд структурно-гидрогеологических подразделений (типов): порово-пластовый, регионально-трещинный, жильно-трещинный, пластово-жильный и др.

Классификация скоплений подземных вод, предложенная И.К. Зайцевым, Н.И. Толстихиным и В.А. Кирюхиным [182; 183], содержала три типа вод, с учётом магматических пород: пластовые, трещинно-жильные и лавовые. Указанные типы, в свою очередь, разделялись на классы. Пластовые воды разделялись на поровые, трещинно-поровые, порово-трещинные, трещинные и трещинно-карстовые. Трещинно-жильные воды на регионально-трещинные воды зон выветривания и зон тектонической и литологической трещиноватости, карстово-жильные и локально-трещинные воды зон тектонических нарушений. Лавовые воды были разделены на верхнелавовые, межлавовые и внутрилавовые.

Классификация Б.Е. Антыпко [59] позволяла выделять семь типов, критериями отнесения скоплений выступал литологический фактор (вид коллектора), а также наличие или отсутствие зон дробления, блоковая структура, и проницаемость массива.

Критериями выделения и описания гидрогеологических структур по Н.К. Игнатовичу [190] являются: степень закрытости, степень проточности и степень промытости.

С.Л. Шварцев при анализе существующих классификаций указывал на дуализм гидрогеологических структур, т.к. они одновременно являются «природной ёмкостью для подземных вод и водообменной системой» [341-347]. Указанные особенности делают необходимым выделение двух функций, которые выполняют гидрогеологические структуры, при их рассмотрении в виде геологического тела, т.е. неотъемлемой части геологической среды: 1-я функция – это вместилище воды, с этой точки зрения возможно выделение гидрогеологических бассейнов, массивов и т.д.; 2-я функция – транспортная «проводника воды», определяющая

характер водообмена, а также выделение геогидродинамических систем, с точки зрения напора и т.д.

Дальнейшая гидрогеологическая схематизация основана на сопоставлении с геологическими условиями, прежде всего с этажным строением верхней части земной коры. Для магматических и кристаллических пород, как правило, характерны трещинные и трещинно-жильные воды, для чехла – поровые и пластовые воды. Г.Н. Каменский, И.К. Зайцев, Н.И. Толстихин, В.А. Кирюхин и В.М. Степанов [183; 193-196; 200] выделили следующие типы гидродинамических структур: артезианские бассейны, гидрогеологические массивы, вулканогенные бассейны и обводнённые разломы. Артезианские бассейны, приурочены к синеклизам и склонам антеклиз в платформенных условиях и межгорным прогибам, котловинам – в горно-складчатых областях. Гидрогеологические массивы, как правило, формируются в пределах щитов и кристаллических массивов, т.е. выходах фундамента древних платформ на дневную поверхность и в пределах кристаллических массивов и террейнов горно-складчатых областей. В районах развития покровных эффузивных пород (трапповых плато и т.д.) выделяют вулканогенные бассейны. Обводнённые разломы – это зоны динамического воздействия разрывных нарушений. Гидрогеологические условия определяются морфологией структурно-тектоническими условиями, возрастом и т.д.

Последующая систематизация гидрогеологических структур тесно взаимосвязана с классификационными характеристиками. По В.М. Степанову [312; 313] классификационными элементами являются: – структурные (платформенные, орогенные и др.); – морфоструктурные (щиты, синклинали, моноклинали, зоны разломов и др.); – генетические (кристаллические, вулканогенные, морские, озерные и др.); – характер водообмена (раскрытые, погребённые, бессточные, транзитные и др.); – характер структурных связей (континентальные, прибрежные и др.).

Геологические условия Западной Якутии, а именно, наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла) определяются её положением в пределах древнего кратона – Сибирской платформы. Формирование особенностей осадочного чехла на разных этапах развития тесно коррелируется с развитием структур третьего порядка [222]: – для Алакит-Мархинского кимберлитового поля, это, прежде всего, Анабарская антеклиза и Тунгусская синеклиза; – для Далдынского кимберлитового поля – Анабарская антеклиза; – для Мирнинского кимберлитового поля это Непско-Ботуобинская антеклиза, Мирнинский выступ, а также частично Вилюйская синеклиза на северо-востоке и Тунгусская синеклиза на северо-западе; – для Накынского кимберлитового поля – Анабарская антеклиза и Вилюйская синеклиза.

Образования осадочного чехла также имеют отличия, обусловленные условиями осадконакопления и структурной позицией кимберлитовых полей.

### *2.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле*

Геологические условия изучаемой площади, а именно наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла) определяются её нахождением в пределах древнего кратона – Сибирской платформы, а именно в зоне сочленения северо-восточного борта Тунгусской синеклизы с юго-западным склоном Анабарской антеклизы. Осадочный чехол изучаемой площади сложен палеозойскими карбонатно-терригенными и карбонатными породами, относящимися к двум циклам седиментации, это вулканогенно-осадочные комплексы пермо-триаса, а также четвертичные отложения различных генетических типов. Общая мощность осадочной толщи изменяется от 2 200 до 3 600 м. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Нижнепалеозойские отложения перекрыты магматическими породами трапповой формации пермо-триасового возраста (рис. 2.3) [124; 468; 469].

Магматические образования, известные в районе работ, относятся к двум эпохам платформенного магматизма [94; 208]: среднепалеозойской (D3-C1) и позднепалеозойской-раннемезозойской (P2-T1). С первой эпохой связана ультраосновная с повышенной щёлочностью формация кимберлитов, слагающая трубки взрыва; со второй – внедрение базитовых магм: долеритов и габбро-диабазов трапповой формации, слагающих крупные пластовые тела интрузий и дайки [93].

Слагающие фундамент породы входят в анабарский гранулитовый комплекс, представленный далдынской, верхнеанабарской и хапчанской сериями архея. Выделяемые серии определены по ксенолитам из кимберлитовых трубок Алакит-Мархинского и Далдынского полей, а также по аналогии с Анабарским массивом [211; 212]. В фундаменте выделяется целый ряд разновозрастных глубинных разломов, обусловивших его блоковое строение. Глубинные разломы субмеридиональной ориентировки [154; 185; 240]. Глубинные разломы раннепротерозойского заложения, являющиеся краевыми разломами шовных зон, трассируются в известные субмеридиональные шовные зоны Анабарского массива. Субширотная система глубинных разломов рифейского заложения прослеживается по всей территории Далдино-Алакитского района. По разломам фиксируются смещения сдвигового и сбросо-сдвигового характера. Данная система разломов активизировалась в девон-каменноугольное и пост раннемезозойское время [185].

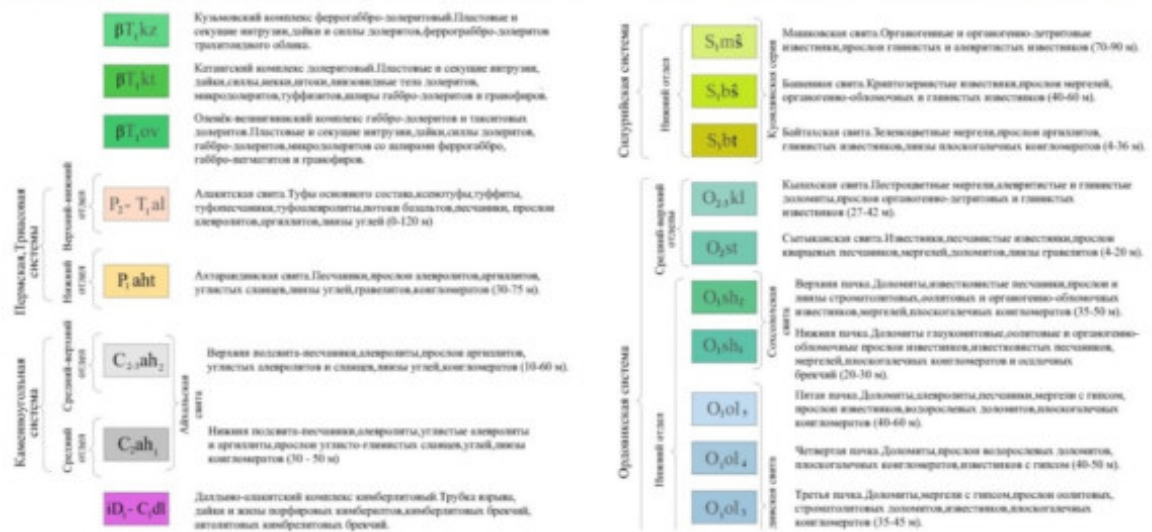
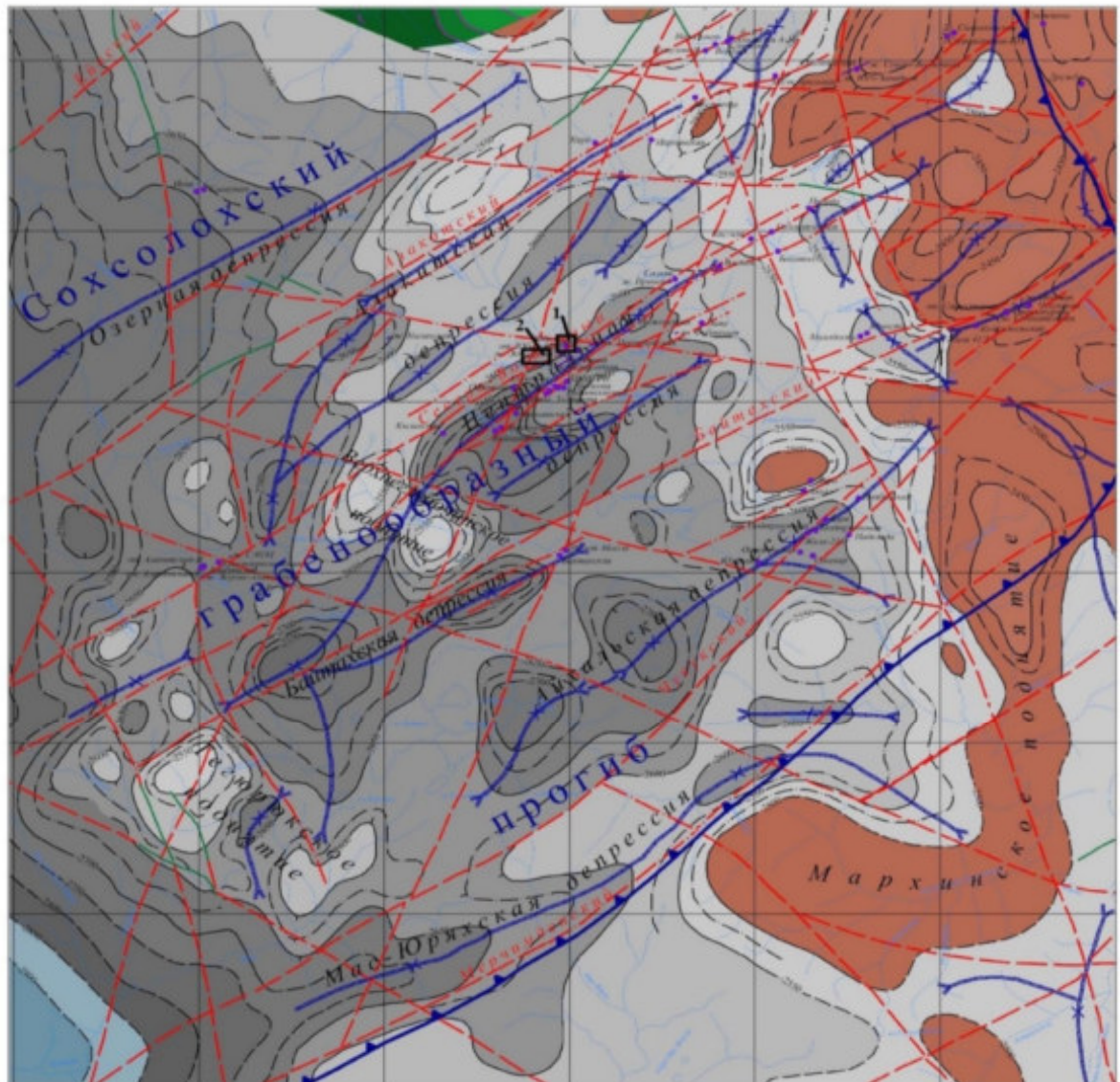


Рис. 2.3. Геологическая карта Алакит-Мархинского кимберлитового поля [406]

В строении осадочного чехла платформы в пределах района работ выделяются два структурных яруса: венд-нижнепалеозойский и верхнепалеозойский-нижнемезозойский, разделённые продолжительным перерывом в осадконакоплении и с характерными для каждого формациями [5; 326] (рис. 2.4).

Венд-нижнепалеозойский структурный ярус сложен карбонатной толщей отложений венда, кембрия, ордовика и силура, залегающих моноклинально с падением на юго-запад под

углом до  $1^\circ$ . Моноклиналильное залегание нарушается мелкими пологими брахискладками и рядом поднятий среднепалеозойского этапа развития: Чукуко-Мархинское, Верхне-Алаkitское, Мархинское, Тегюрюкское. Позднее, в среднекаменноугольно-раннепермское время, формируются Верхне-Мархинская впадина, расположенная к юго-западу от Чукуко-Мархинского поднятия, Таас-Юряхская впадина к юго-востоку от Тегюрюкского поднятия и Верхне-Моркокинская впадина южнее Тегюрюкского поднятия.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

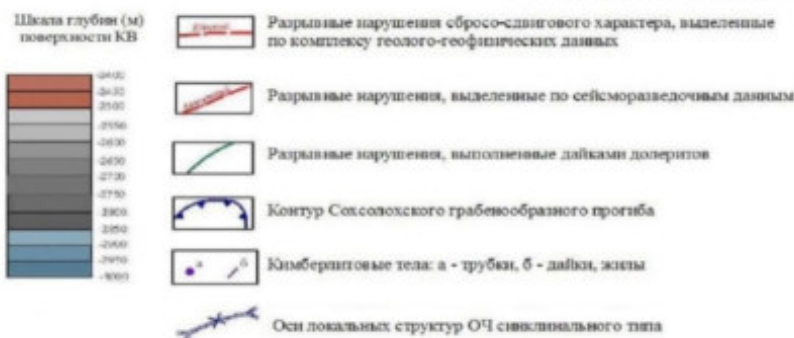


Рис. 2.4. Структурно-тектоническая карта изучаемого участка [406]

Амплитуда колебаний рельефа поверхности нижнепалеозойского яруса 60–80 м. В нижнем структурном ярусе осадочного чехла выявлены разрывные нарушения девон-каменноугольной активизации (Алакитский, Северо-восточный, Байтахский, Чужукский, Глубокий и другие разломы), протяжённостью до нескольких десятков километров. Все нарушения носят сбросовый характер и имеют амплитуду смещения до 20–50 м, редко более. В геологическом отношении они представляют собой зоны повышенной трещиноватости и дробления шириной 1–2 км [185]. К группе Чужукских разломов приурочены кимберлит контролирующие разломы северо-восточного простирания Айхальский и Ноябрьский и субширотного простирания – разлом Глубокий [189]. В зоне динамического влияния Ноябрьского разлома располагается участок закачки дренажных вод рудника «Айхал» [389].

Верхнепалеозойский-нижнемезозойский структурный ярус образован терригенными отложениями каменноугольно-пермского возраста, которые залегают на размытой поверхности нижнепалеозойского карбонатного цоколя, вулканогенно-осадочными образованиями позднепермского-раннетриасового возраста и породами трапповой формации. Современный структурный план платформенного чехла во многом определяется интрузивными телами пород трапповой формации, внедрившимися в позднепермское-раннетриасовое время. Площадное распространение пластовых интрузий сопровождается многочисленными дизъюнктивными и пликтивными нарушениями, отторжением и перемещением крупных блоков как терригенных, так и карбонатных пород осадочного чехла [185].

Гидрогеологические условия Алакит-Мархинского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к Тунгусскому криоартезианскому бассейну [265]. По причине незначительности влияния, а также отсутствия перспектив использования надмерзлотных и межмерзлотных вод, основным объектом изучения выступают подмерзлотные природные рассолы [60; 61; 183; 216; 405]. В пределах осадочного чехла выделяются следующие водоносные горизонты и комплексы:

1. *Надмерзлотные воды* существуют в пределах сезонно-талого слоя (СТС) и в несквозных подрусловых и подозёрных таликах [348-353; 473]. Воды сезонно-талого слоя питаются преимущественно за счёт атмосферных осадков [227]. Воды пресные с минерализацией 0,028–0,038 г/л в основном гидрокарбонатно-кальциевого состава. Водовмещающими породами для несквозных таликов, развивающихся из-за гидрогенного растепления от озёр и рек, являются терригенные образования пермо-карбона и кимберлиты [43; 84]. Фильтрационные свойства водовмещающих пород таликов отличаются большой анизотропностью. Коэффициенты фильтрации составляют от 1,5 до 15,8 м/сут. По химическому составу воды *несквозных таликов* гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриево-магниевые и сульфатные кальциево-магниевые с минерализацией 0,2–1,8 г/л. Мощности их в естественных условиях напрямую

зависят от размера сопряженного водного объекта, и, как правило, составляют от 50 до 200 м [375; 406].

*Межмерзлотные воды.* Нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс (далее НоВК) характеризуется спорадичностью распространения, наличием мёрзлых пород выше и ниже обводнённой части разреза, незначительным напором подземных вод и крайне низкой водообильностью отложений. Воды комплекса вскрываются на отметках +260/+70 м. Кровлей комплекса служит мощная толща замороженных пород от нижнего ордовика до пермо-карбона, а подошвой – многолетнемёрзлые породы верхнего кембрия. Водосодержащие пласты-коллекторы, приуроченные к нижнему ордовику, представлены песчанистыми доломитами, водорослевыми доломитами, известковистыми песчаниками, переслаивающимися с плотными непроницаемыми глинистыми доломитами и мергелями. Степень водообильности комплекса очень слабая, приток пластовой воды составляет 0,86–1,27 м<sup>3</sup>/сут, величина пластового давления не превышает 23,2 атм., коэффициент водопроницаемости равен всего 0,0014 м<sup>2</sup>/сут. Нижнеордовикский водоносный комплекс обладает незначительными естественными запасами, которые сформировались, по-видимому, лишь за счёт поступления напорных вод из нижележащих горизонтов по ослабленной зоне Северо-Восточного рудовмещающего разлома и ёмкостных запасов криопэггов - рассолов с отрицательной температурой [90; 91; 92; 121; 352]. По химическому составу межмерзлотные воды хлоридные натриево-кальциевые с минерализацией от 27,77 до 130 г/л, рН=7,7 [381; 383].

*Водоносные комплексы подмерзлотных вод.*

3. Верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс характеризуется повсеместным распространением, приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской (Є<sub>3mrk</sub>) и мархинской (Є<sub>3mrh</sub>) свит верхнего кембрия, характеризующихся частым тонким переслаиванием глинистых и карбонатных пород лагунной фации. Верхнекембрийские отложения вскрыты в интервале глубин 550–1 220 м, общая мощность их составляет 670 м. Породы верхнекембрийского водоносного комплекса характеризуются низкими коллекторскими свойствами, которые ухудшаются с глубиной в связи с уплотнением пород и увеличением их глинистости [217; 219]. Значения коэффициентов водопроницаемости колеблются в пределах 0,02–0,60 м<sup>2</sup>/сут с преобладанием величин более 0,1 м<sup>2</sup>/сут, коэффициентов пьезопроводности –  $n \cdot 10^3$  –  $n \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>/сут. Повышенными на порядок значениями параметров отличается лишь трещиноватая зона, приуроченная к Северо-Восточному рудовмещающему разлому [298]; значения коэффициента водопроницаемости здесь составляет 5,2 м<sup>2</sup>/сут, коэффициента пьезопроводности –  $1,5 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/сут. Подземные воды комплекса обладают напором, величина которого достигает 208–312 м. По химическому составу подмерзлотные воды относятся в

основном к хлоридным натриево-магниевым-кальциевым рассолам с минерализацией, повышающейся с глубиной от 144–166 до 348 г/л [404].

4. Среднекембрийский водоносный комплекс в пределах изучаемой территории вскрывается на глубинах порядка 1 300 м от дневной поверхности (абс. отм. -650/-700 м). Общая мощность комплекса достигает 600 м. Водопроницаемость изменяется в пределах от 0,01 до 0,35 м<sup>2</sup>/сут [298; 299; 300]. Подземные воды обладают напором над кровлей до 350 м. Они представлены хлоридными рассолами с минерализацией до 403 г/л. От подошвы верхнекембрийского водоносного комплекса среднекембрийский водоносный комплекс изолирован практически водоупорными породами нижней пачки мархинской свиты мощностью 90–110 м [206].

5. Нижнекембрийский водоносный комплекс был вскрыт в интервале 2 540–2 650 м от дневной поверхности. Водосодержащие коллекторы приурочены к карбонатно-терригенным породам эмяксинской свиты. Комплекс напорный, напор над кровлей составляет до 1 350 м (пластовое давление составляет порядка 170 атм.). Водопроницаемость изменяется в пределах от 0,01 до 0,2 м<sup>2</sup>/сут [401].

6. Протерозойский водоносный комплекс и переходная зона между осадочным чехлом и кристаллическим фундаментом вскрыты в интервале 2 868–3 102 м от дневной поверхности [141]. При проведении опытно-фильтрационных работ с данного интервала не было получено значимых притоков флюидов, что позволяет охарактеризовать данные коллекторы как «сухие» [166].

Из выше описанных водоносных комплексов и горизонтов наиболее изученным является верхнекембрийский водоносный комплекс в пределах моркокинской свиты, что связано с его доминированием (до 90 %) при формировании дренажных вод месторождений. Фильтрационные свойства вмещающих пород контролируются широко развитой системой глубинных разломов, зоны динамического воздействия которых имеют ширину от 300 до 600–700 м и характеризуются повышенными (на порядок и более) фильтрационными свойствами. Глубинные разломы также являются зонами внедрения интрузивных тел основного состава, образующих дайки и силлы [182; 201].

Сложное структурно-тектоническое строение территории определяет формирование в пределах общей гидродинамической системы отдельных зон и участков, особенности гидрогеологических условий которых требуют отдельного рассмотрения.

В качестве опорного месторождения, по мнению автора, лучше всего привести уточнённую по результатам проведённых исследований гидрогеологическую характеристику трубки Юбилейная.

Коренное месторождение алмазов – трубка «Юбилейная», является крупнейшим в Западной Якутии из известных в настоящее время кимберлитовых тел. С точки зрения геолого-гидрогеологического строения непосредственно месторождение и близлежащий массив вмещающих пород в радиусе до 800 м от месторождения по своей сути является микроструктурой сложного строения из-за локальной невыдержанности коллекторов, наличия «гидравлических окон» по зонам эндо- и экзоконтактов, влияния микроблочных структур и малоамплитудной тектоники, а также зон вторичной минерализации и массопереноса на гидротермальном этапе развития участка.

Основным гидрогеологическим объектом, осложняющим горнотехнические условия отработки кимберлитовой трубки «Юбилейная» в отм. +620 м/+470 м, являются несквозные талики озер Проточное и Травянистое, имеющие ограниченное площадное распространение. Перед началом отработки трубки «Юбилейная» карьером, в пределах изучаемой территории существовало четыре озера: Проточное, Безымянное, Травянистое и Мутное. Они были связаны между собой протоками. Глубина озёр колебалась от 1 до 3 м. Озёра влияли на режим реки Марха - с одной стороны они являлись регуляторами стока; с другой – повышали сток реки [388]. В процессе ведения горных работ озёра Безымянное, Проточное и Травянистое были осушены, а озеро Мутное было отداвлено телом центрального отвала на расстояние, обеспечивающее безопасную отработку месторождения. Несквозной талик озера Безымянное был полностью сработан карьером, а талики озер Проточное и Травянистое продолжили влиять на условия отработки. Плановое расположение таликов и карьера «Юбилейный» приведено на рисунке 2.5.

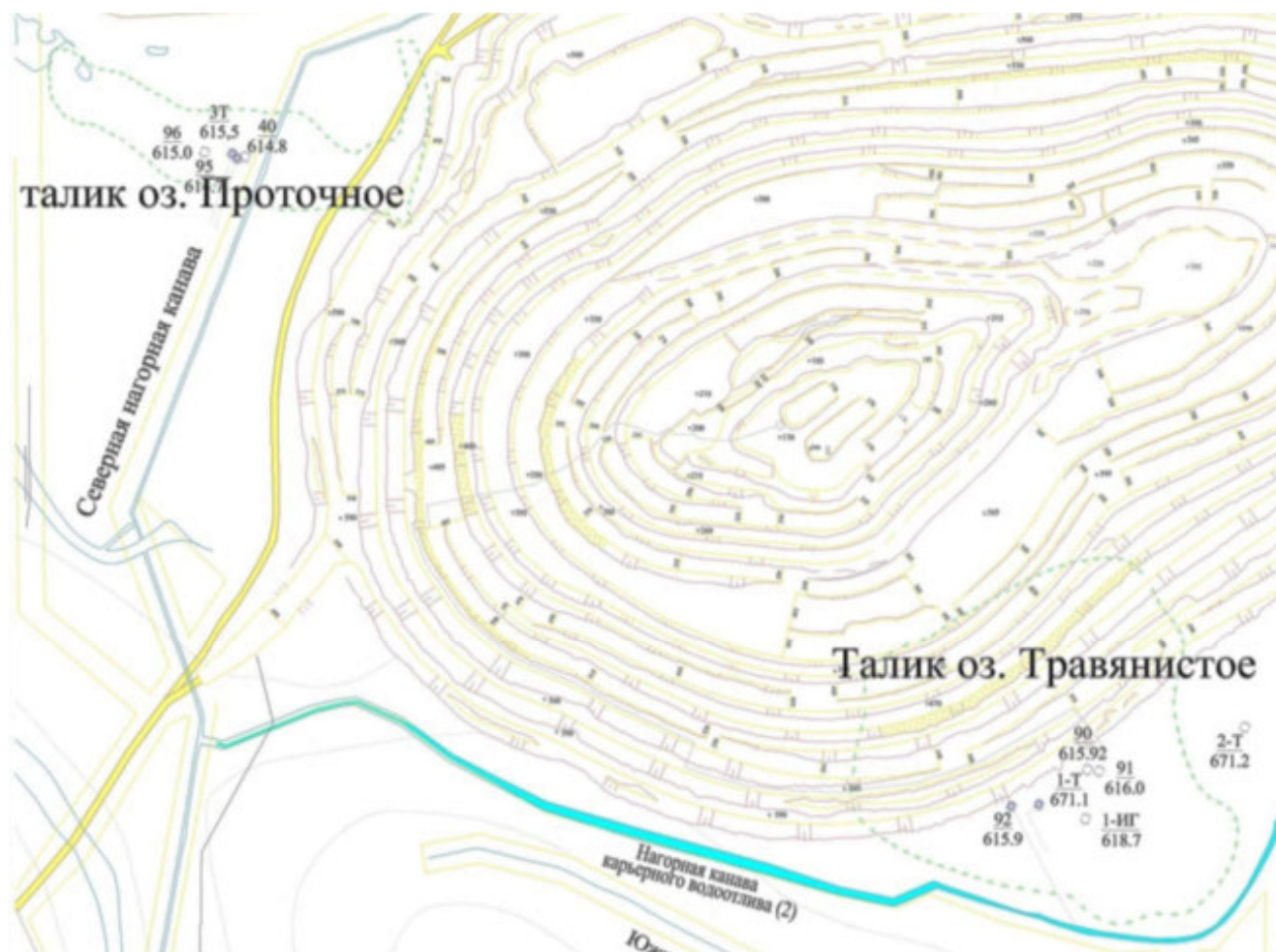


Рис. 2.5. Схема расположения таликов оз. Проточное и Травянистое [406]

#### *Талик озера Проточное*

Площадь талика составляет 85 тыс. м<sup>2</sup>. Талик развит в северо-западной части карьера «Юбилейный». Работы по изучению и опробованию разреза таликовой зоны озера Проточного были начаты в 1997 г. с целью определения наличия в разрезе таликовой зоны, а также для первичной оценки степени водообильности отложений. Мощность талика, определённая при помощи бурения и методов ГИС, ~ 70-90 м. Водовмещающими породами являются верхнепалеозойские (пермь-карбон) терригенные отложения и трещиноватые долериты. Подошвой талика являлись мерзлые известняки и доломиты силура (рис. 2.6).

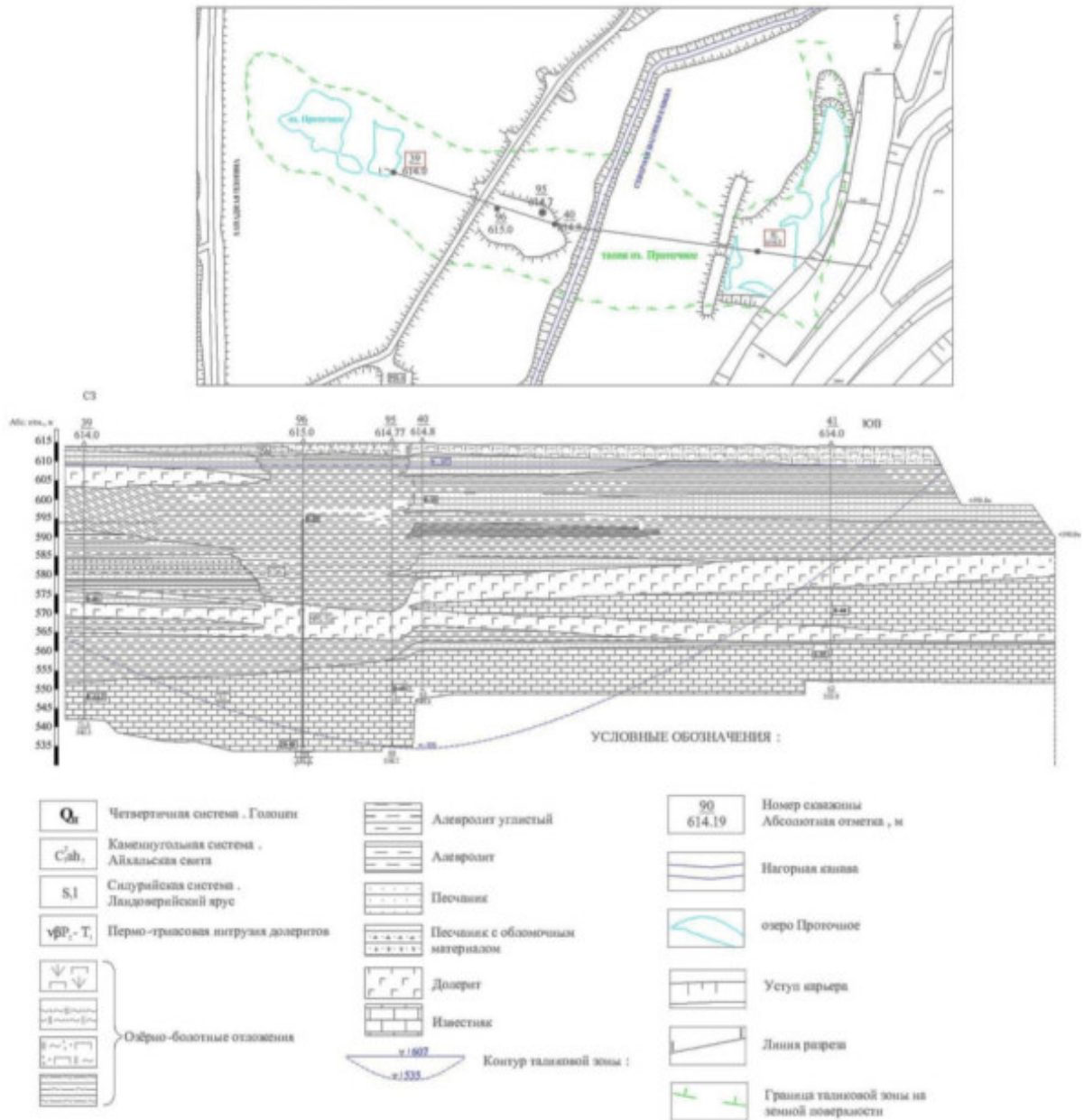


Рис. 2.6. Талик озера Протоchnое [406]

Таликовые воды *пресные* (минерализация 100-340 мг/л), *сульфатно-кальциевые*. Характеризуются повышенным содержанием железа (от 0,15 до 1,5 мг/л). Для недопущения формирования массивных наледей на верхних бермах карьера, работы по осушению талика непрерывно ведутся с 2005 г. Общий объём выкачанных вод за период 2005-2020 гг. составляет порядка 420 тыс. м<sup>3</sup>.

Для изучения состояния талика в 2019 г. был выполнен комплекс буровых, гидрогеологических, опробовательских и геофизических работ. Был уточён литологический состав пород: было доказано, что водосодержащими породами помимо глинисто-карбонатных отложений силура и карбона являются и трещиноватые долериты, т.е. все породы в интервале талика характеризуются коллекторскими свойствами. Общая пористость разреза от 6 до 15%. В

интервалах: 16,5-21,0, 25,0-34,5, 52,0-59,5 м породы характеризуются наличием систем открытых каверн [406].

#### *Талик озера Травянистое*

Начальные параметры талика оз. Травянистое определены по результатам гидрогеологических исследований, проведенных в 1976-1978 годах Северной экспедицией МГУ, площадь талика составляет 240 тыс. м<sup>2</sup>. Талик развит в южной части карьера «Юбилейный». Мощность талика, определённая при помощи бурения и методов ГИС ~ 90-156 м. Водовмещающими породами, являются верхнепалеозойские (пермь-карбон) терригенные отложения и трещиноватые долериты. Подошвой талика являлись мерзлые известняки и доломиты силура (прил. 1). На сегодняшний день площадь талика частично (на 60%) сработана карьером. Таликовые воды *пресные (минерализация 300-800 мг/л), сульфатно-гидрокарбонатно-кальциевые*. Характеризуются повышенным содержанием железа (от 0,15 до 1,5 мг/л). Работы по осушению талика непрерывно ведутся с 1998 г. Общий объём выкачанных вод за период 1998-2020 гг. составляет порядка 1,5 млн. м<sup>3</sup>. Откачка в настоящее время ведётся при помощи двух эксплуатационных скважин, расположенных последовательно в северной части талика, для создания депрессионной кривой, с целью недопущения формирования массивных наледей на южных берегах карьера в отм. +620/+450 м.

Для изучения состояния талика в результате интенсивного техногенного воздействия, в 2019 г. автором был выполнен комплекс необходимых исследований. В результате была уточнена мощность талика, с первоначально оценённых 130 м она увеличилась до 155,9 м. Также было подтверждено, что все породы в интервале талика характеризуются коллекторскими свойствами. Общая пористость разреза от 10 до 18%; - в интервалах: 55,0-76,0, 122,0-131,2, 134,8-142,5, 152,5-155,9 м породы характеризуются наличием систем открытых каверн [407].

*Нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс (далее НоВК)* в пределах карьерного поля бы вскрыт шестью геологоразведочными и тремя гидрогеологическими скважинами. Для комплекса характерно спорадическое распространение, приуроченность фиксируемых линз к разрывным нарушениям, и достаточно высокая иммобилизация природных рассолов [97]. Спорадичность его распространения не позволяет оценить его гидродинамический режим в целом. Каждая скважина характеризует, по сути, отдельно вскрытый криопэг. Результаты опробования приведём с учётом полученных новых данных.

На восточном фланге месторождения, в результате проведенной интерпретации, коллекторы НоВК были выделены в интервале глубин 493–556,5 м. Всего было выделено 18 пластов-коллекторов мощностью от 0,4 до 6,0 м. Все коллекторы приурочены к отложениям олдондинской свиты нижнего ордовика. По результатам, проведенной расходомерии интервалы поглощения были выделены в отметках глубин: 518-523 м; 544-553 м. Несмотря на то, что

суммарная мощность пород, обладающих коллекторскими свойствами составила 23,4 м, в интервале НоВК приток к опытной скважине не превысил 1 м<sup>3</sup>/сут.

На южном фланге месторождения НоВК вскрыт в интервале 390-430 м. В результате интерпретации проведенных опытно-фильтрационных работ, исчисленный параметр водопроницаемости не превысил 0,1 м<sup>2</sup>/сут.

Резюмируя выше сказанное, полученная в ходе исследований информация в целом согласуется с проведенными ранее исследованиями [166]. Природные рассолы НоВК в пределах карьерного поля трубки «Юбилейная» отмечаются на отметках +167,6 – +118,3 м. Кровлей комплекса служит мощная толща замороженных пород от нижнего ордовика до пермо-карбона, а подошвой – многолетнемерзлые породы нижнего ордовика и верхнего кембрия (+87,2 – +95,6 м абс.). Водосодержащие пласты-коллекторы, приуроченные к нижней части олдондинской свиты (O<sub>101</sub>), представлены песчанистыми доломитами, водорослевыми доломитами, известковистыми песчаниками, переслаивающимися с плотными непроницаемыми глинистыми доломитами и мергелями. Степень водообильности комплекса очень слабая, приток пластовой воды составляет 0,86-1,27 м<sup>3</sup>/сут, величина пластового давления не превышает 23,2 атм., коэффициент водопроницаемости не превышает 0,1 м<sup>2</sup>/сут. Нижнеордовикский водоносный комплекс обладает незначительными естественными запасами. Притоки природных рассолов при отработке месторождения не превысят 20 м<sup>3</sup>/сут.

Верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс (далее ВВК) является главным в интервале предполагаемой отработки месторождения. Характеризуется повсеместным распространением. Водоносный комплекс приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской (Є<sub>3</sub> *mrk*) и мархинской (Є<sub>3</sub> *mrh*) свит верхнего кембрия, характеризующихся частым тонким переслаиванием глинистых и карбонатных пород лагунной фации. Верхнекембрийские отложения вскрыты в интервале глубин 550-1334 м, общая мощность их составляет 784 м. Литолого-фациальными особенностями отложений предопределяется характер распространения пластов-коллекторов, как в плане, так и по разрезу и приуроченность их к наименее плотным и наиболее пористым и проницаемым прослоям карбонатных пород (известняков, доломитов). Водосодержащие коллекторы в плане и в разрезе распределены неравномерно. Характерной для распределения коллекторов в разрезе верхнекембрийских отложений является их приуроченность к двум интервалам, отвечающим по глубине приподошвенной части моркокинской свиты и верхней части мархинской свиты. Это позволяет выделить в разрезе верхнекембрийского водоносного комплекса два водоносных горизонта.

*Водоносный горизонт моркокинской свиты* выделяется в интервале глубин 653,6-732,4 м (- 40,2/-116,8 м). Его кровлей служит толща многолетнемерзлых пород мощностью от 570 м на южном и восточном флангах до 650-662 м на северном и западном флангах месторождения.

Общая мощность водоносного горизонта меняется от 60 м до 76,8 м. В пределах горизонта выделен целый ряд пластов-коллекторов от 10 до 18. Суммарная эффективная мощность коллекторов изменяется от 7,2 м до 16,2 м (12–26%) от общей мощности водоносного горизонта). Коллекторы в разрезе моркокинской свиты приурочены к тонким прослоям известковистых доломитов, реже – песчаных доломитов и доломитистых известняков, которые переслаиваются практически непроницаемыми разностями – плотными доломитами, глинистыми доломитами, мергелями. Коллекторы характеризуются гранулярно-каверновой и трещинной пористостью. Осредненные коэффициенты общей пористости не превышают 17,2-27,6%, открытой пористости 8,7-12,7%. При оценке водообильности получены незначительные притоки, колеблющиеся в пределах 0,2-13,8 м<sup>3</sup>/сут. Замеренные пластовые давления при этом составляли от 21,5-38,7 кгс/см<sup>2</sup>.

*Водоносный горизонт мархинской свиты* выделяется в интервале глубин 825-925 метров (-202,4/-302,7 м). От вышележащего горизонта он отделяется стометровой толщей плотных глинисто-карбонатных пород, представляющих собой водоупор. В пределах обводненной части мархинского водоносного горизонта при проведении предыдущих исследований выделялось от 2-х до 9-ти водосодержащих пластов-коллекторов с мощностью отдельных коллекторов от 0,4 до 2,4 м [166]. Суммарная эффективная мощность водосодержащих коллекторов меняется от 1,8 м до 7,8 м, что составляет от общей 100-метровой мощности водоносного горизонта лишь 2-8 %. Коллекторы распределяются по разрезу неравномерно, хотя большая часть из них приурочена к трем интервалам глубин: 830-835 м, 885-890 м и 918-925 м, и довольно четко коррелируются между собой практически по всем гидрогеологическим скважинам. Коллекторы приурочены к маломощным пропласткам карбонатных разностей: доломитам и доломитистым известнякам, имеющим гранулярно-каверновую пористость.

В целом верхнекембрийский водоносный комплекс обладает невысокими фильтрационными параметрами, прогнозные притоки природных рассолов данного водоносного комплекса при отработке месторождения не превысят 500 м<sup>3</sup>/сут.

## ***2.2 Далдынское кимберлитовое поле***

В пределах Далдынского кимберлитового поля геологические условия в разрезе существенно отличаются. Осадочный чехол сложен преимущественно карбонатными породами венда и кембрия, терригенно-карбонатные породы находятся в подчинённом положении, галогенные породы практически полностью отсутствуют (не более 0,1%). Общая мощность осадочной толщи в пределах Далдынского кимберлитового поля изменяется от 2 420 до 2 478 м [78-80]. Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +350/-1500 м коренных месторождений алмазов преимущественно представлены породами манькайской (Є<sub>1</sub> mn) в отм.

-1400/-1500 м, эмяксинской ( $\text{Є}_1 \text{em}$ ) в отм. -1200/-1400 м, кумахской ( $\text{Є}_1 \text{k}$ ) в отм. -1070/-1200 м, удачининской ( $\text{Є}_{1-2} \text{ud}$ ) в отм. -570/-1070 м, нерасчленённой известняково-доломитовой толщи ( $\text{Є}_2 \text{id}$ ) в отм. -170/-570 м, мархинской ( $\text{Є}_3 \text{mrh}$ ) в отм. +230/-170 м и моркокинской ( $\text{Є}_3 \text{mrk}$ ) в отм. +350/+230 м свит. Перекрывающие породы в отм. +370/+350 м представлены маломощными терригенными отложениями четвертичного возраста и частично, как правило, на водоразделах, вулканогенными породами триаса. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями.

Нижнепалеозойские породы частично перекрыты вулканогенными породами триаса и отложениями четвертичного возраста. Магматические образования пользуются незначительным распространением и представлены не выходящими на поверхность силлами и дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [83] (рис. 2.7).

Структурная позиция Далдынского кимберлитового поля определяется положением его в пределах Далдынской флексуры, разбитой на блоки Вилюйско-Мархинской зоной глубинных субмеридиональных разломов, контролирующих среднепалеозойский трапповый магматизм. В пределах флексуры выделяются разноплановые типы пликативных и дизъюнктивных дислокаций. Через всю территорию с северо-запада на юго-восток (по азимуту  $165^\circ$ ) протягивается Силигино-Мархинский разлом, выделенный в кристаллическом фундаменте по результатам геофизических исследований. Разлом прослеживается в фундаменте и нижней части осадочного чехла по штокообразным интрузиям основного состава.

Моноклираль осадочных пород осложнена крупной Далдынской флексурой, протягивающейся с северо-запада на юго-восток. Северо-восточное ее крыло приподнято, а юго-западное опущено; залегание пород на крыльях субгоризонтальное [256].

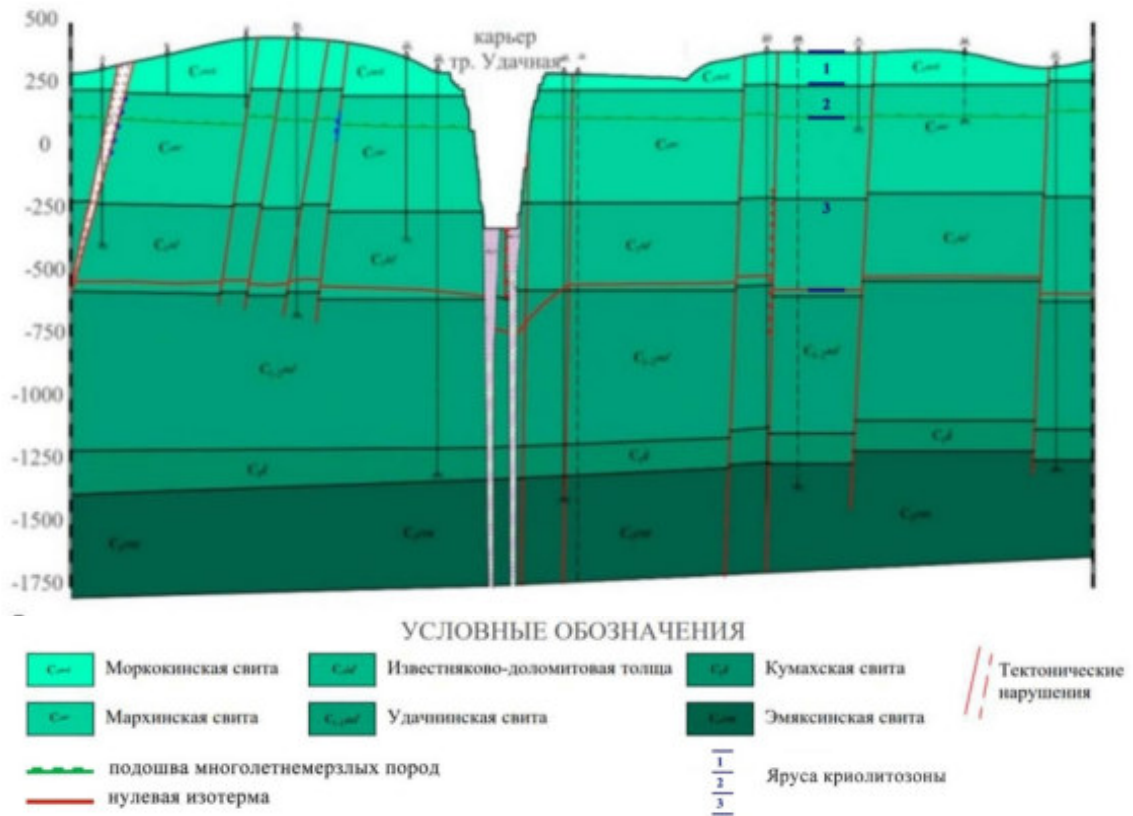
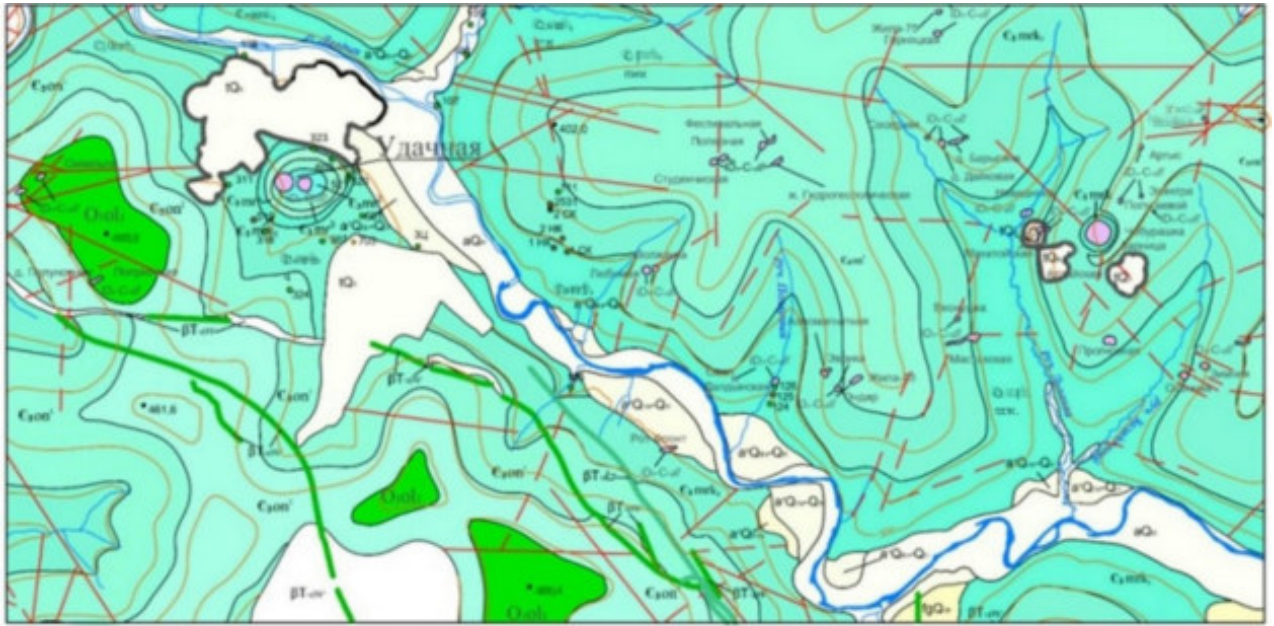


Рис. 2.7. Геологическая карта Далдынского кимберлитового поля [408]

Непосредственно трубка Удачная – главное месторождение Далдынского кимберлитового поля расположена в опущенном крыле Далдынской флексуры. Через трубку «Удачная» протягивается глубинный разлом северо-западного простирания, установленный по результатам бурения и сейсморазведочных работ (рис. 2.8).

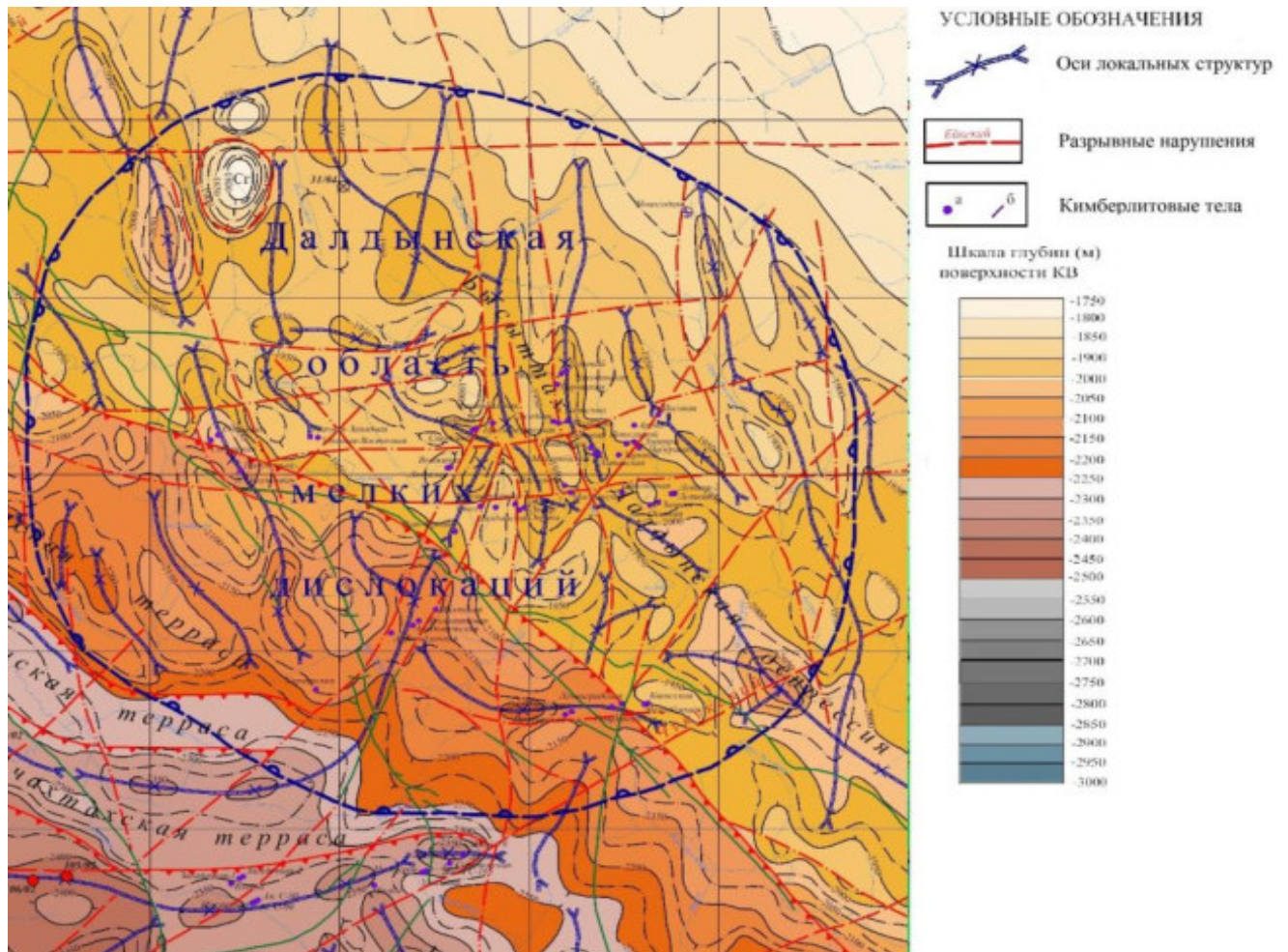


Рис. 2.8. Структурно-тектоническая карта Далдынского кимберлитового поля [408]

Разломы северо-западной ориентировки традиционно связывают с Вилуйско-Котуйской системой разломов, осложняющей строение северо-восточного борта Тунгусской синеклизы и контролирующей трапповый магматизм. Проведенный в ходе структурных построений анализ геолого-геофизических и структурно-тектонических данных показал, что некоторые разломы северо-западного простирания не имеют непосредственной связи с трапповым магматизмом и закладывались, на начальных этапах платформенного развития. Примером таких разломов является Октябрьский разлом, зоне его динамического воздействия, прослеживается через всю площадь по азимуту  $300-315^\circ$ , в отметках нижнекембрийских отложений представлена серией сближенных сбросов, суммарная амплитуда которых колеблется в пределах 50–150 м. Минимальные значения вертикальных амплитуд смещения и ширины зоны динамического влияния разлома отмечены на северо-западе территории. Вверх по разрезу амплитуда сбросов постепенно затухает. По кровле моркокинской свиты превышение северо-восточного блока над юго-западным по флекуре колеблется в пределах 50–60 м [387].

Дайковый комплекс закладывался в более поздний период, так как занимает текущее положение по отношению к упомянутым выше террасам, в том числе и в зоне Октябрьского разлома. На фоне преобладания дайковых интрузий северо-западного простирания наблюдаются

дайки всех других охарактеризованных выше направлений, то есть многие интрузии внедрялись по уже существующим разрывным нарушениям. Это утверждение подтверждается тем фактом, что дайки трапповой формации тяготеют к структурам древнего заложения. Залегают дайки почти вертикально ( $80-90^\circ$ ), что подтверждается сейсмическими материалами. По характеру взаимоотношения даек в узлах их пересечения отмечено, что дайки с положительным знаком намагниченности сформировались несколько раньше отрицательно намагниченных.

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к сочленению Оленекского и Верхневилуйского артезианских бассейнов [19; 265]. По причине незначительности влияния, а также отсутствия перспектив использования надмерзлотных и межмерзлотных вод, объектом изучения выступают подмерзлотные природные рассолы. В пределах осадочного чехла в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс является наименее водообильным водоносным комплексом в пределах изучаемой территории. На рисунке 2.9 приведён опорный разрез (схема коллекторов) в пределах участка закачки Среднекембрийский.

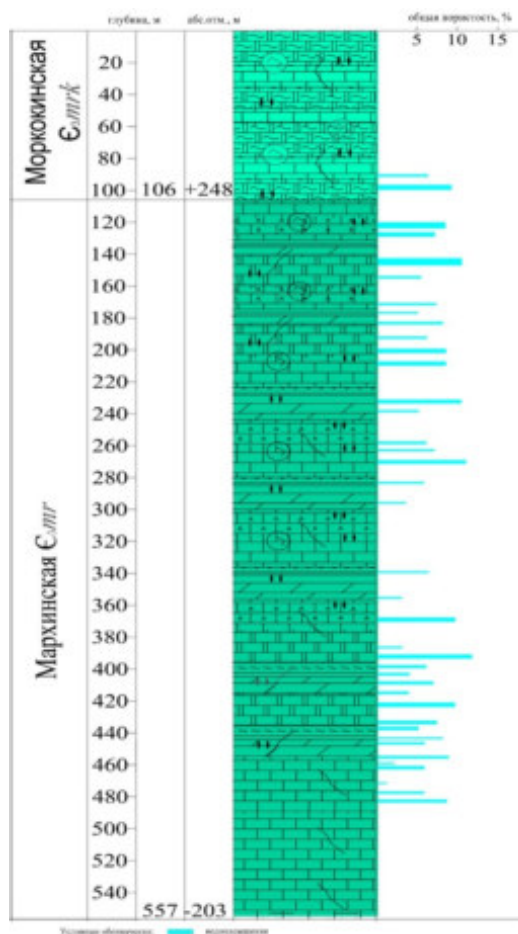


Рис. 2.9. Схема коллекторов верхнекембрийского водоносного комплекса (в пределах участка закачки Среднекембрийский) (сост. Янников А.М.)

От дневной поверхности он отделён толщей (150-250 м) многолетнемерзлых пород олдондинской, онхойюряхской и моркокинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет +99/+180 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -180/-200 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300 м, однако, эффективная мощность коллекторов редко превышает 50 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и мархинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~20-50 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0,001 до 0,3 (редко до 1,0) м<sup>2</sup>/сут. Водоносный комплекс, при полном дренировании формирует притоки к карьеру рудника Удачный (радиусом 1200 м) 10 м<sup>3</sup>/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах карьерного поля существенно сдренирован в момент вскрытия притоки достигали 1000 м<sup>3</sup>/сут.

2. Второй от поверхности - среднекембрийский водоносный комплекс, состоящий из двух водоносных горизонтов СВГ-1 и СВГ-2 (рис. 2.10).

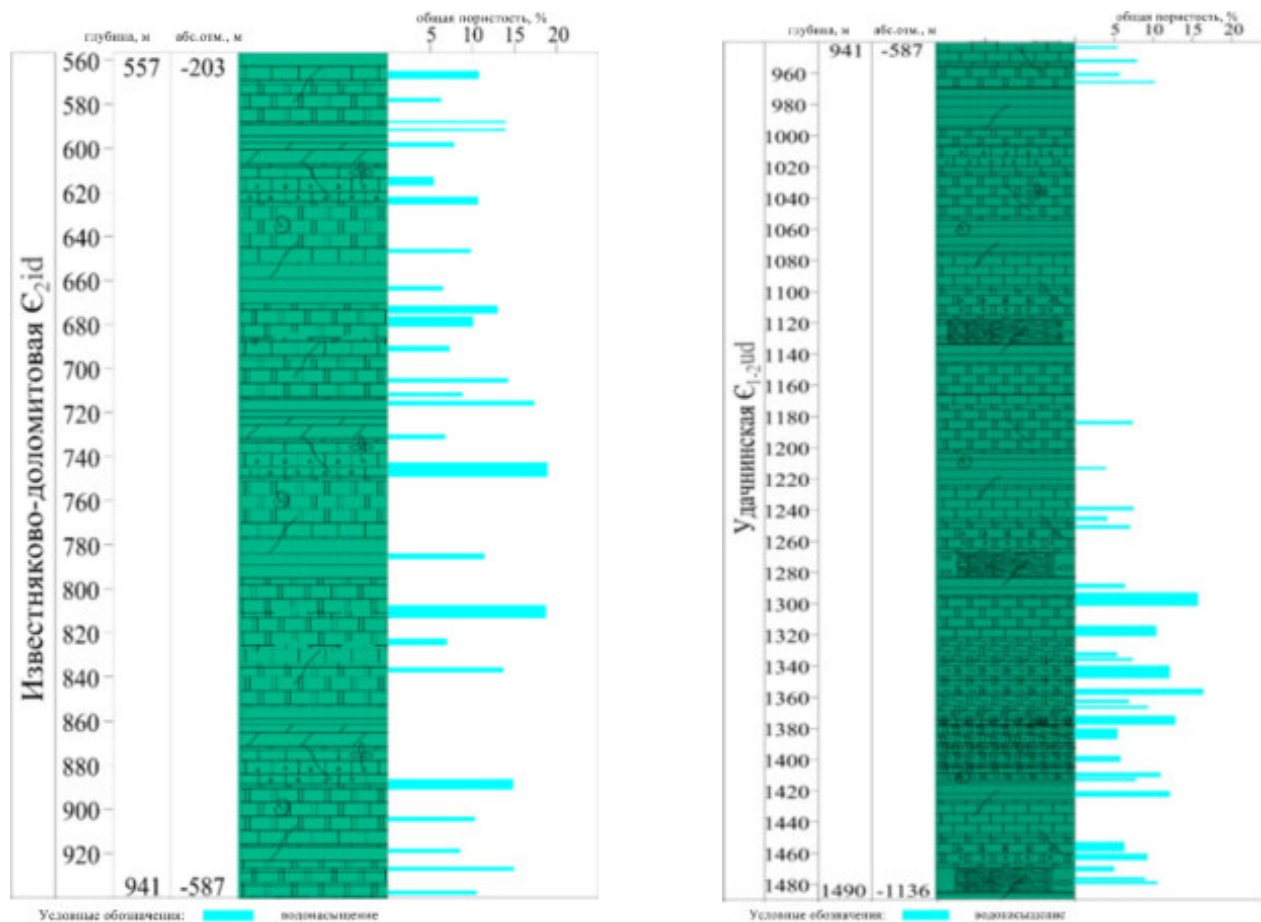


Рис. 2.10. Схема коллекторов среднекембрийского водоносного комплекса: слева – СВГ-1; справа СВГ-2. (в пределах участка закачки Среднекембрийский) (сост. Янников А.М.)

Абс. отм. кровли среднекембрийского водоносного комплекса составляет -200/-240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачинской свиты, находящаяся на

абсолютных отметках -1000/-1050 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600-650 м, однако, эффективная мощность коллекторов составляет 200-250 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчленённой известняково-доломитовой толщи и удачинской свиты [6; 285; 500]. Первый водоносный горизонт (СВГ-1) приурочен к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи максимальной мощностью около 480 м. Граница между нижним горизонтом верхнекембрийского и первым водоносным горизонтом среднекембрийского водоносного комплекса, проходит по подошве первой пачки мархинской свиты. Подошвой горизонта служат плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачинской пачки нижнего и среднего кембрия. Подземные воды приурочены к пластам-коллекторам в известняках и доломитах, которые составляют около 40 % мощности отложений свиты. Тип коллекторов кавернозно-поровый. Мощность водоносного горизонта не выдержана по площади и изменяется в пределах Далдынского кимберлитового поля от 10 до 480 м. Максимальные значения мощности водовмещающих пород зафиксированы в северо-восточной части флексуры, минимальные – в зоне Октябрьского разлома. Данный факт обусловлен влиянием литолого-фациальных условий, а именно тем, что породы толщи подстилаются биогермными отложениями удачинской свиты, характер поверхности построек отличается резкой рельефностью [249, 250]. Зона Октябрьского разлома маркируется гребнем барьерного рифа. Отложения толщи характеризуются высокой открытой пористостью и проницаемостью.

По результатам лабораторных исследований керна коэффициент пористости ( $K_{п\text{ общ}}$ ) пород, слагающих коллекторы СВГ-1 в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 0,4–26,2 % при средней величине 5,91 %.

Второй водоносный горизонт (СВГ-2) приурочен к удачинской свите, представленной рифовыми кавернозно-трещиноватыми известняками и доломитами (мощностью до 450–500 м). Кровлей водоносного горизонта служат глинистые пачки карбонатных пород. Подошвой горизонта являются плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачинской свиты. Тип коллекторов водонасыщенных пород горизонта – кавернозно-поровый. По результатам лабораторных исследований керна коэффициент пористости ( $K_{п\text{ общ}}$ ) пород, слагающих коллекторы СВГ-2 в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 0,4–16,5 % при средней величине 3,55 %.

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350-450 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 2,5 до 40 (редко до 60,0) м<sup>2</sup>/сут. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 14 000 м<sup>3</sup>/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах шахтного поля существенно осушен только в интервале первого

среднекембрийского водоносного горизонта (гор. -465 м), приуроченного известняково-доломитовой пачке, приток к подземным горным выработкам рудника составляет до 9 000 м<sup>3</sup>/сут.

3. Третий от поверхности – нижнекембрийский водоносный комплекс, приуроченный преимущественно к окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты ( $C_1 k$ ) и водорослевым известнякам эмяксинской ( $C_1 em$ ) свиты. Кровлей водоносного горизонта являются органогенно-обломочные известняки удачинской свиты, а подошвой – водорослевые известняки эмяксинской свиты. Абсолютная отметка кровли составляет -1050/-1100 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза эмяксинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1400/-1450 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300-350 м, однако, эффективная мощность коллекторов составляет 100-150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмяксинской свит (рис. 2.12). По результатам лабораторных исследований керн коэффициент пористости ( $K_{п\text{ общ}}$ ) пород, слагающих коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК) в пределах Далдынской флексуры, варьирует в пределах 2,4–16,8 % при средней величине 8,97 %. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~ 1000-1200 м.

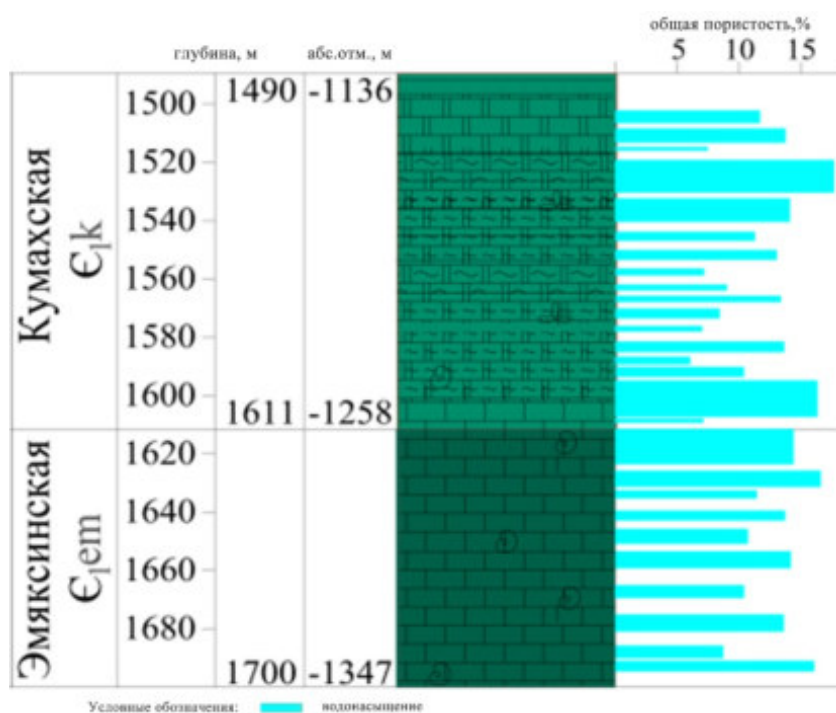


Рис. 2.11. Схема коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса (в пределах участка закачки Среднекембрийский) (сост. Янников А.М.)

Коэффициент проводимости ( $T$ ) составляет от 15 до 100 (редко до 150-200) м<sup>2</sup>/сут. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 40 000 м<sup>3</sup>/сут. В настоящее время водоносный комплекс не вскрыт. Планируемая дата вскрытия конец 30-х годов XXI века.

### 2.3 Мирнинское кимберлитовое поле

В пределах Мирнинского кимберлитового поля осадочный чехол представлен карбонатно-терригенными отложениями венда, галогенно-карбонатными и терригенно-карбонатными осадками кембрия. Суммарная мощность галогенных отложений (чарская ( $E_1 \text{ } \check{c}r$ ), толбачанская ( $E_1 \text{ } tb$ ), нелбинская ( $E_1 \text{ } nl$ ) и юрегинская свиты ( $E_1 \text{ } jur$ )) в осадочном чехле составляет 380-400 м (18%). Общая мощность осадочной толщи в районе изменяется от 2 114 до 2 206 м [83; 122].

Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +350/-1300 м коренных месторождений алмазов преимущественно представлены породами юрегинской ( $E_1 \text{ } jur$ ) в отм. -1150/-1300 м, нелбинской ( $E_1 \text{ } nl$ ) в отм. -1100/-1150 м, эльгянской ( $E_1 \text{ } el$ ) в отм. -1050/-1100 м, толбачанской ( $E_1 \text{ } tb$ ) в отм. -690/-1050 м, олекминской ( $E_1 \text{ } ol$ ) в отм. -500/-690 м, чарской ( $E_1 \text{ } \check{c}r$ ) в отм. -200/-500 м, ичерской ( $E_{1-2} \text{ } i\check{c}$ ) в отм. -115/-200 м, метегерской ( $E_2 \text{ } mt$ ) в отм. 0/-115, мирнинской ( $E_2 \text{ } mr$ ) в отм. +150/0 и холомолохской ( $E_3 \text{ } hl$ ) в отм. +350/+150 м свит. Перекрывающие породы в отм. +400/+350 м представлены терригенными осадками юрского и четвертичного возрастов. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Нижнепалеозойские отложения на водораздельных площадях перекрыты осадками нижней юры (укугутская, оруктахская, вакунайкинская свиты) и четвертичного возраста [5]. Магматические образования пользуются незначительным распространением и представлены не выходящими на поверхность силлами и дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [122; 134] (рис. 2.12).

Структурная позиция Мирнинского кимберлитового поля определяется положением его в пределах Мирнинского свода, разбитого на блоки Вилюйско-Мархинской зоной глубинных субмеридиональных разломов, контролирующих среднепалеозойский трапповый магматизм.

В пределах свода выделяются разноплановые типы пликативных и дизъюнктивных дислокаций. В южной части площади преобладают пликативные структуры: Буордахское, Хататское и Нелбинское поднятия (межразломные блоки) субмеридионального простирания, контролируемые глубинными разломами.

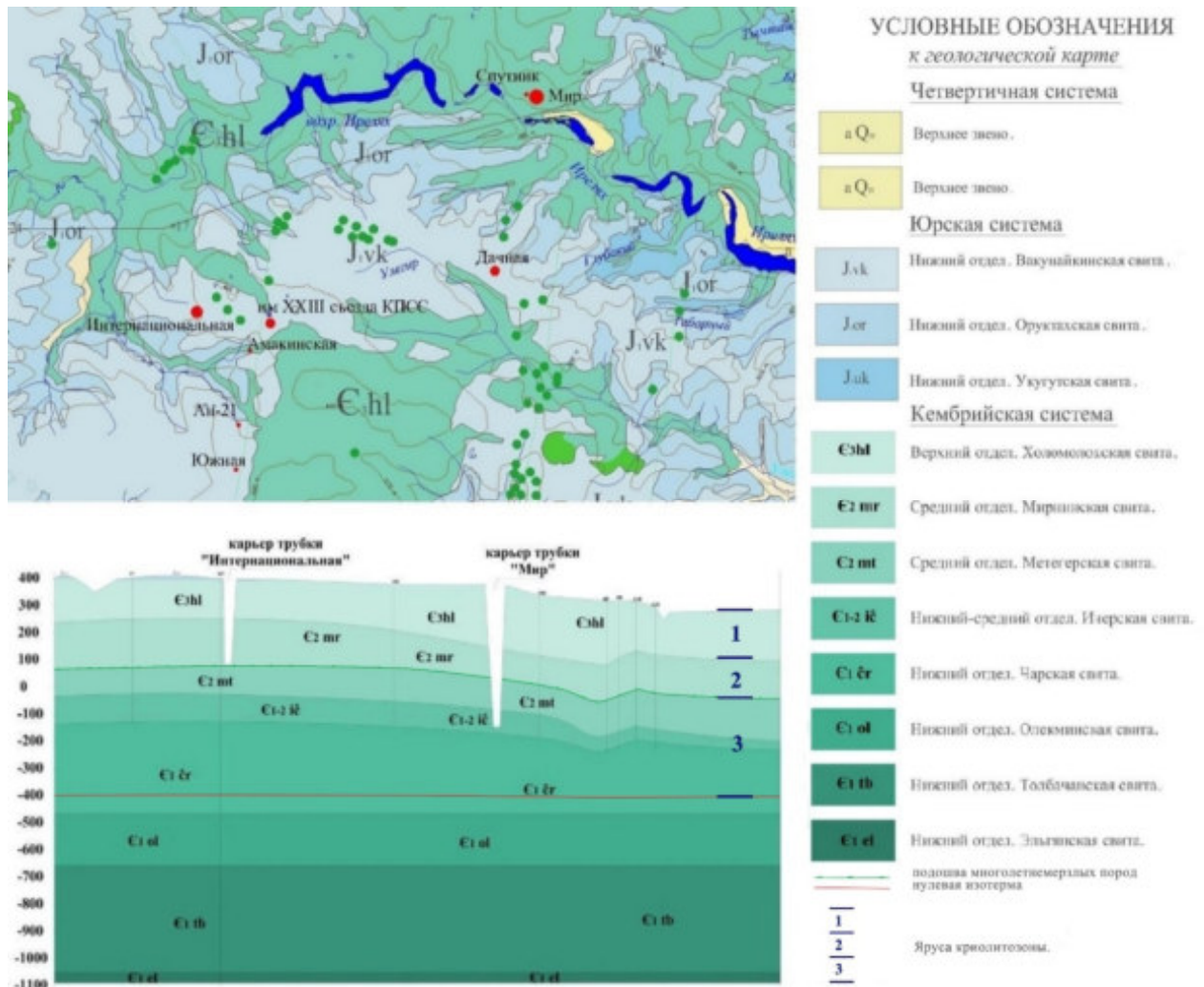


Рис. 2.12. Геологическая карта Мирнинского кимберлитового поля [393]

Ко второму типу относятся наложенные линейные отрицательные и положительные линейные морфоструктуры, контролируемые сколовыми разломами северо-восточного простирания: Маччобинское и Иреляхское поднятия [124] (рис. 2.13).

Гидрогеологические условия Мирнинского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к Тунгусскому и Якутскому артезианским бассейнам [265]. В пределах осадочного чехла выделяются следующие водоносные горизонты и комплексы [112; 130; 131; 177; 238; 425; и др.].

1. Первый от поверхности подмерзлотный надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс (далее МИВК) является самым водообильным водоносным комплексом в пределах изучаемой территории. От дневной поверхности он отделён мощной толщей (300-400 м) многолетнемерзлых пород холомолохской (Є<sub>3hl</sub>) и мирнинской (Є<sub>2mr</sub>) свит, а также пачкой окремнелых доломитов и известняков метегерской свиты (Є<sub>2mt</sub>) [81]. Абсолютная отметка кровли составляет -5/+20 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза ичерской свиты (Є<sub>1-2іс</sub>) (пласты №№ 25-26 по сводному корреляционному разрезу), находящаяся на абсолютных отметках -130/-150 м.

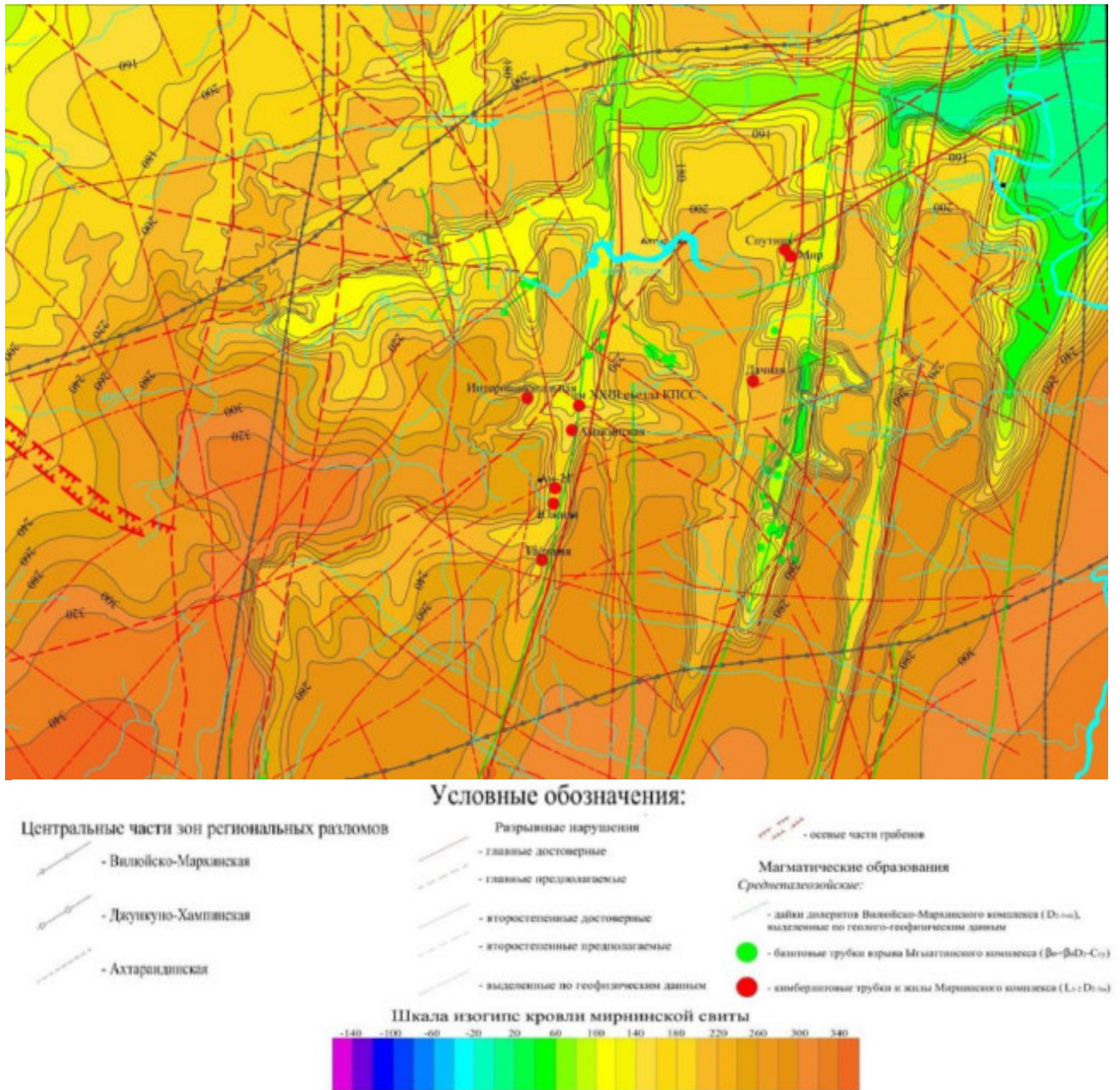


Рис. 2.13. Структурно-тектоническая карта Мирнинского кимберлитового поля [393]

Общая мощность водоносного комплекса колеблется от 125 до 220 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты с прослоями менее проницаемых гипс-ангидритов. На рисунке 2.14 приведён опорный разрез (схема коллекторов) в пределах шахтного поля трубки Мир.

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200-250 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 5 до 300-400 м<sup>2</sup>/сут. Водоносный комплекс, при полном дренировании формирует притоки к кольцевому дренажному штреку рудника Мир (радиусом 500 м) до 30 000 м<sup>3</sup>/сут [394].

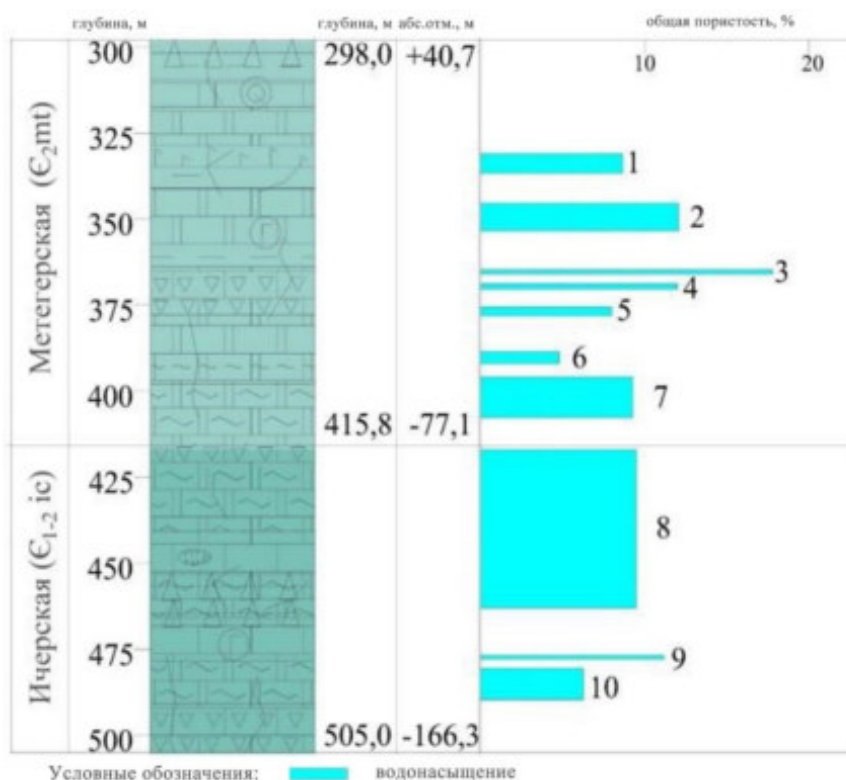


Рис. 2.14. Схема коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса (в пределах трубки шахтного поля трубки Мир) (сост. Янников А.М.)

2. Второй от поверхности межсолевой олекминский водоносный горизонт. Глубина залегания составляет 1 000-1 050 м. Мощность от 10 до 30 м. Приурочен к карбонатным породам олекминской свиты (Е<sub>1</sub> ol). Перекрывается галогенными отложениями чарской свиты (Е<sub>1</sub> çr), подстилается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты (Е<sub>1</sub> tb). В составе горизонта выделяется от 4 до 6 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами). На рисунке 2.15 приведён опорный разрез (схема коллекторов) олекминского водоносного горизонта в пределах шахтного поля трубки Мир.

Водоносный горизонт напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях составляют ~ 650-750 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0,01 до 0,1-0,5 м<sup>2</sup>/сут. Водоносный горизонт, формирует притоки к подземным горным выработкам рудника Мир не более 376 м<sup>3</sup>/сут (при пересчёте на дренажный штрёк радиусом 500 м).

3. Третий от поверхности – толбачанский водоносный комплекс. Глубина залегания составляет 1 150 - 1 200 м. Суммарная мощность комплекса от 150 до 200 м. Приурочен к карбонатным породам толбачанской свиты. Перекрывается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты (Е<sub>1</sub> tb), подстилается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской (Е<sub>1</sub> tb) и эльгянской (Е<sub>1</sub> el) свит. В его составе выделяется 15-17

коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы также насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами).

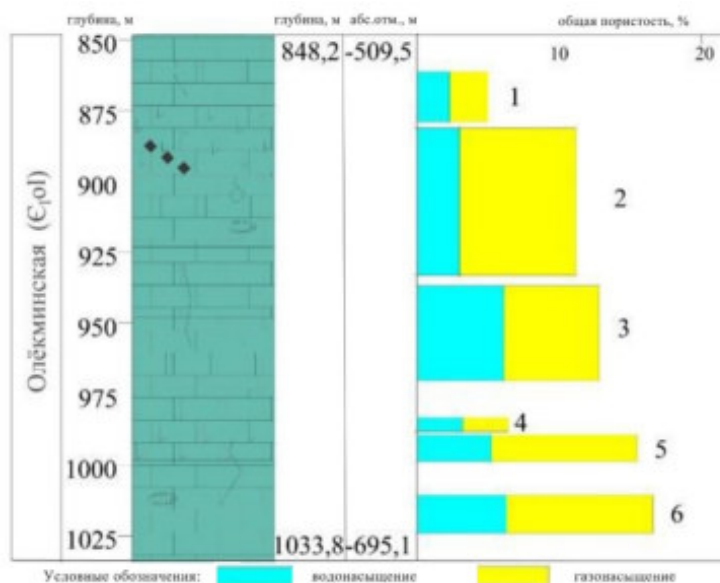


Рис. 2.15. Схема коллекторов олекминского водоносного горизонта (в пределах трубки шахтного поля трубки Мир) (по [393] с дополнениями)

На рисунке 2.16 приведён опорный разрез (схема коллекторов) толбачанского водоносного комплекса в пределах шахтного поля трубки Мир.

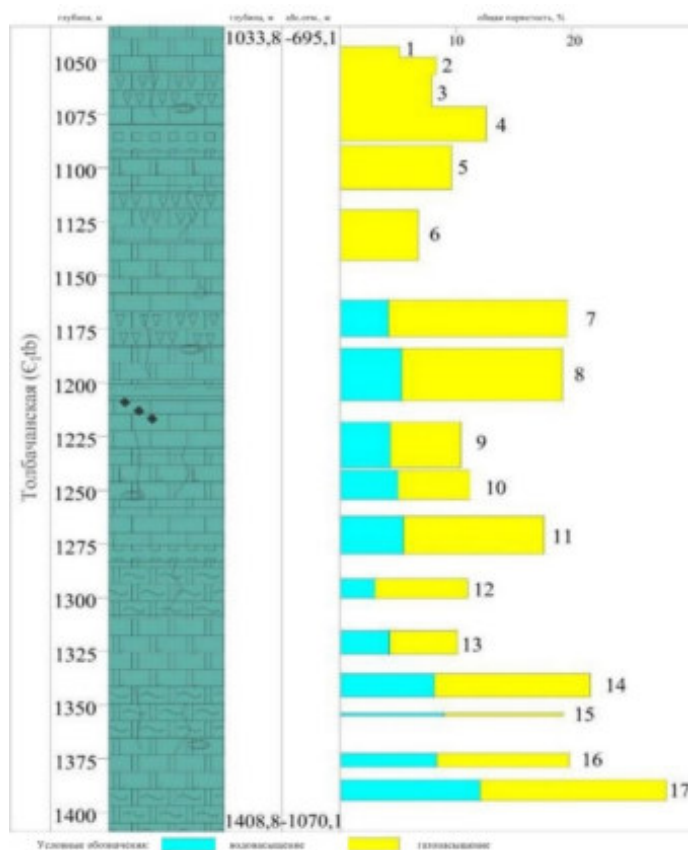


Рис. 2.16. Схема коллекторов толбачанского водоносного комплекса (в пределах трубки шахтного поля трубки Мир) (по [393] с дополнениями)

Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях достигают ~ 550-800 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0,001 до 0,1-0,5 м<sup>2</sup>/сут. Водоносный комплекс, формирует притоки к подземным горным выработкам рудника Мир не более 557 м<sup>3</sup>/сут (при пересчёте на дренажный штрёк радиусом 500 м) [399; 492]

4. Эльгянский водоносный горизонт. Глубина залегания от поверхности составляет 1 420-1 470 м. Мощность от 10 до 20 м. Приурочен к карбонатным породам эльгянской свиты (Є<sub>1</sub> el). Перекрывается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской (Є<sub>1</sub> tb) и эльгянской (Є<sub>1</sub> el) свит, подстиляется галогенными отложениями нелбинской свиты. В составе горизонта выделяется от 2 до 4 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами) [374]. На рисунке 2.17 приведён опорный разрез (схема коллекторов) эльгянского водоносного горизонта в пределах шахтного поля трубки Мир.



Рис. 2.17. Схема коллекторов эльгянского водоносного горизонта (в пределах трубки шахтного поля трубки Мир) [393]

Водоносный горизонт напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях достигают ~ 1 000-1 100 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 0,001 до 0,1 м<sup>2</sup>/сут. Водоносный горизонт формирует притоки к подземным горным выработкам рудника Мир не более 14 м<sup>3</sup>/сут (при пересчёте на дренажный штрёк радиусом 500 м).

Существенное уменьшение расходов природных рассолов в интервале толбачанского водоносного комплекса, олекминского и эльгянского водоносных горизонтов, объясняется не только глубиной их залегания, но и тем фактом, что зона формирования и развития изучаемых хлоридных кальциевых рассолов является зоной крайне затрудненного водообмена [99; 251; 327; 378]. В геологические периоды времени водообмену препятствовали пласты практически водонепроницаемой каменной соли, вторичные выделения галита и сульфатных минералов в трещинах и порах нижнекембрийских отложений. В ходе геологического развития внутри водоупорной толщи межсолевых отложений происходили обменные процессы между водой и

породой, процессы перекристаллизации отложений, реакции минералообразования в условиях изменяющихся давлений и температур, связанных с внедрением базитовых и кимберлитовых тел. Эти процессы приводили к уменьшению пористости и проницаемости толщ и затрудняли водообмен [344, 346, 347]. Поэтому весьма крепкие и предельно насыщенные рассолы, распространенные в межсолевых и подсолевых отложениях, являются растворами концентрирования первичной рапы седиментационного происхождения, претерпевшими определенные изменения в стадию эпигенеза. Резкие различия в составе гидрогеохимических зон с натриевыми и кальциевыми рассолами связаны с трансформацией условий водообмена [14; 15; 18; 341; 232; 301; 342; 447]. По возрасту седиментационные хлоридные кальциевые рассолы являются кембрийскими [21; 29; 344].

#### *2.4 Накынское кимберлитовое поле*

Формирование особенностей осадочного чехла на разных этапах развития, тесно коррелируется с развитием таких структур как Вилюйская синеклиза и Анабарская антеклиза. Образования осадочного чехла представлены карбонатно-терригенными, галогенно-карбонатными, карбонатными и терригенными осадками палеозоя и мезозоя. Общая мощность осадочной толщи превышает 3500 м. Структурные этажи разделены между собой перерывами в осадконакоплении, угловыми и стратиграфическими несогласиями. Магматические образования пользуются незначительным распространением и представлены силлами долеритов, а также дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [123, 311].

Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +250/-530 м коренных месторождений алмазов представлены преимущественно верхнекембрийскими терригенно-карбонатными породами джуктинской ( $E_3dk$ ) в отм. -380/-530 м и чаргольской ( $E_3cg$ ) в отм. +30/-380 м свит. В отметках +130/+30 вмещающие породы представлены преимущественно карбонатными отложениями балыктахской свиты ( $O_1bl$ ) нижнего ордовика. Перекрывающие отложения +250/+130 м представлены терригенными породами юрского и четвертичного возрастов.

Центральная часть изучаемой территории ограничена четырьмя крупными разломами: Северный, Южный, Западный и Восточный (рис. 2.18). Северный и Южный разломы входят в Вилюйско-Мархинскую тектоническую зону северо-восточного простирания, а Западный и восточный относятся к Средне-Мархинской тектонической системе северо-северо-западного простирания. Внутри площади, образованной пересечением данных разломов, выделяют менее крупные разломы: Ботубинский и Дьяхтарский, которые также входят в Вилюйско-Мархинскую систему. Эти разломы выполнены крутопадающими дайками долеритов и выходят на поверхность нижнепалеозойского карбонатного цоколя. Контролирующим разломом для

кимберлитовых тел является Диагональный разлом северо-северо-восточного простирания, с прослеженной протяженностью более 10 км. Диагональный разлом – структура, которая вмещает все известные кимберлитовые месторождения, а также ряд кимберлитовых жил [306].

Криогидрогеологическая, структурно-тектоническая и литолого-фациальная характеристика кимберлитового поля выполнена по трубке Нюрбинская.

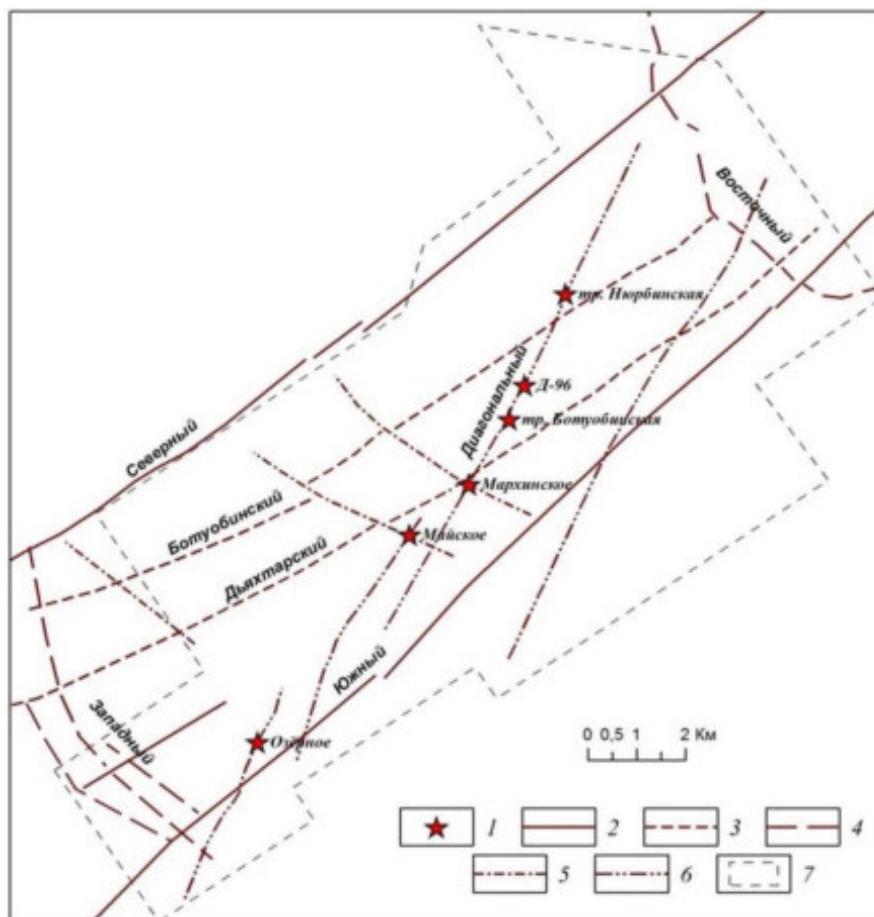


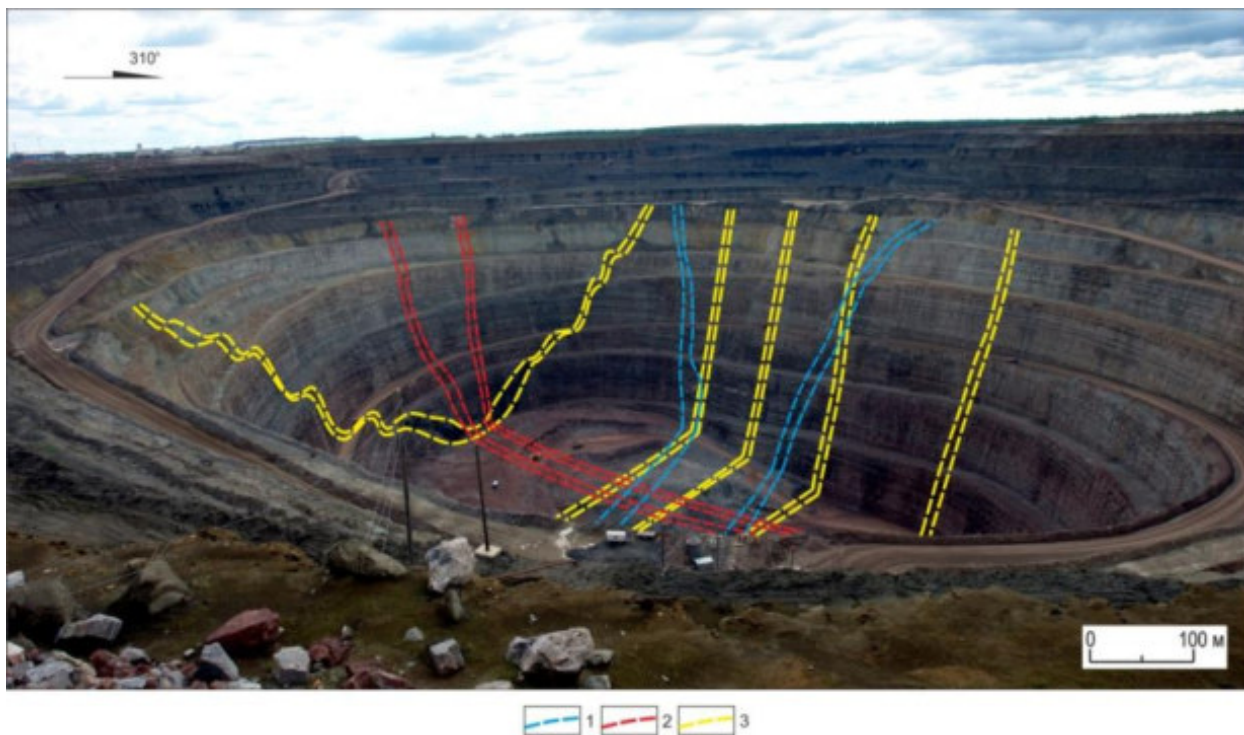
Рис. 2.18. Структурный план центральной части Накынского кимберлитового поля<sup>12</sup>. Условные обозначения: 1 – известные кимберлитовые тела; 2-7 – осевые зоны разрывных нарушений, выделенные по данным магниторазведки, сейсморазведки и картирования микро тектонических нарушений: Вилуйско-Мархинской зоны низкого порядка, 3 – Вилуйско-Мархинской зоны высокого порядка, 4 – Средне-Мархинской зоны низкого порядка, 5 – Средне-Мархинской зоны высокого порядка (поперечные), 6 – кимберлит контролирующей Диагональной; 7 – граница исследуемой площади.

Структурно-тектоническое строение карьерного поля месторождения «Нюрбинская» изучено по результатам бурения гидрогеологических скважин различного назначения, инструментальных замеров элементов залегания основных и оперяющих тектонических

<sup>12</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

нарушений, выполненными, в том числе специализированными организациями (ИЗК СО РАН) на стадии открытой отработки месторождения.

По результатам проведенных исследований установлено, что структурно-тектонические условия карьерного поля определяют Ботуобинский, Диагональный и Широтный разломы (рис. 2.19). Остальные фиксируемые тектонические нарушения по своей сути являются оперяющими для обозначенных региональных (применительно к объекту изучения) структур, причём преобладающими разрывными нарушениями являются субвертикальные (более  $60^\circ$ ) и субгоризонтальные (менее  $30^\circ$ ).



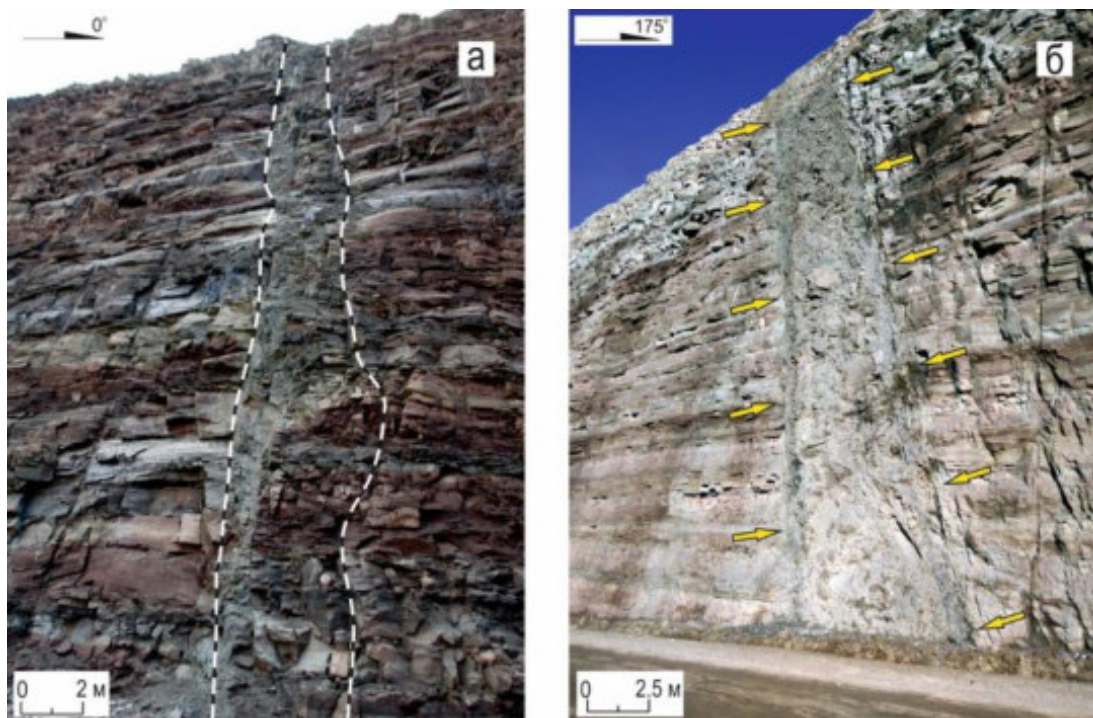
1 – Ботуобинский разлом; 2 – Диагональный разлом; 3 – Широтный разлом.

Рис. 2.19. Основные разрывные нарушения карьерного поля<sup>13</sup>

Зона динамического воздействия Ботуобинского разлома представляет собой грабен, ограниченный с севера-запада и юго-востока сместителями со встречными азимутами падения ( $145^\circ$  и  $325^\circ$ , соответственно). Расстояние между крыльями горизонте  $+130$  м составляет порядка  $140$  м, а на уровне  $-55$  м, сокращается до  $74$  м. Северо-западное крыло представлено зоной, повышенной трещиноватости и дробления, с углами падения от  $72-86^\circ$  и мощностью порядка  $7-0$  м, однако, имеются места пережимов где мощность уменьшается до  $2$  м и места раздувов, с мощностью зоны до  $25-30$  м. Юго-восточный сместитель имеет схожие параметры, углы падения колеблются в пределах  $70-83^\circ$ , а мощность изменяется от  $8$  до  $15$  м.

<sup>13</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнiproalmaz». Мирный, 2021.

Широтный разлом представлен несколькими сближенными дислокациями, выходы которых наблюдаются в южной, центральной и северной частях карьера (рис. 2.20). Северная группа разрывных нарушений, зафиксированная на небольшом удалении от северо-западного крыла Ботуобинской структуры, характеризуется наличием крупной субвертикальной сколовой зоны мощностью около 2 м с выдержанным падением (азимут  $160^\circ$ ).



а – зона повышенной трещиноватости и дробления центральной группы нарушений, гор. + 100 м.;  
б – зона дробления по осевой линии южной группы нарушений.

Рис. 2.20. Широтный разлом в бортах карьера трубки «Нюрбинская»<sup>14</sup>

Центральная группа разрывных нарушений состоит из серии субпараллельных зон повышенной трещиноватости и брекчирования с азимутом простирания  $60-65^\circ$ , углы падения изменяются в пределах от  $83$  до  $86^\circ$ , средняя видимая мощность 2-3 м, фрагментарно наблюдается зона крупно глыбовых брекчий мощностью около 10 м. Южная группа разрывных нарушений представляет собой широкую зону повышенной трещиноватости мощностью до 47 м в юго-западных и около 18 м в юго-восточных откосах карьера. Осевая часть разлома выполнена дайкой долерита, мощностью порядка 4-5 м.

Диагональный разлом менее контрастно проявлен в бортах карьера. Его выходы наблюдаются на северо-восточном и юго-западном флангах месторождения в виде пары сближенных сместителей, каждый из которых представлен зоной, повышенной трещиноватости

<sup>14</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

с элементами дробления и перетирания горных пород. Западное нарушение имеет среднюю мощность до 4 м со значительным ее увеличением до 15 м в юго-западном борту карьера (рисунок 2.21). Углы падения варьируют от 85 до 88°.

Зафиксированные группы разрывных нарушений хорошо коррелируются с наблюдаемыми притоками и характеризуются зонами динамического воздействия, контролируемые открытой трещиноватостью в областях развития оперяющих подчинённых разломов, и как следствие, характеризующимися большими фильтрационными параметрами.

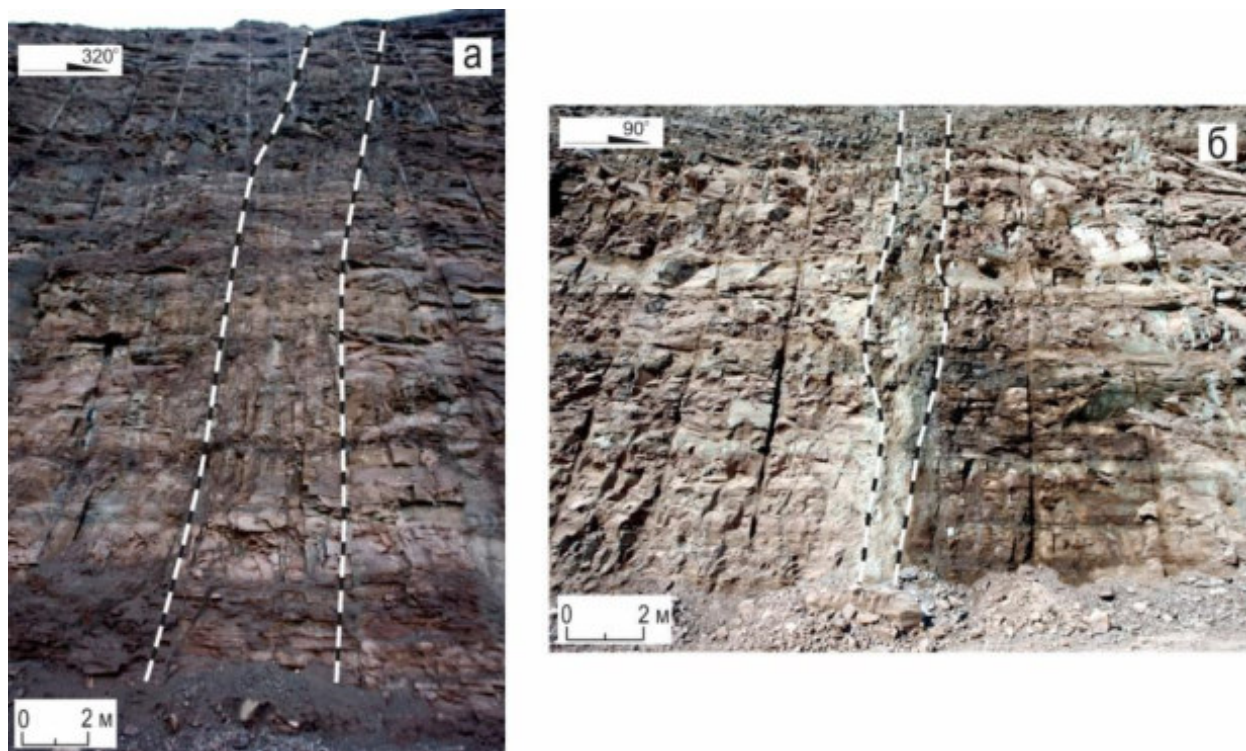


Рис. 2.21. Диагональный разлом в бортах карьера трубки «Нюрбинская»<sup>15</sup>

Наибольшее влияние на гидрогеологические условия месторождения оказывает Ботубинский разлом, динамическая зона которого, хорошо коррелирует с плановым распространением межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса.

Сплошное развитие многолетнемерзлых пород мощностью 355-560 м, геологическое строение, наличие зон разломов, развитие траппового и кимберлитового магматизма оказывают влияние на гидрогеологические условия территории [103; 104; 319; 321-324]. По отношению подземных вод к многолетнемерзлым породам выделяются надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные [128; 130]. На условия отработки месторождений трубок

<sup>15</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопитоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

«Нюрбинская» и «Ботуобинская» открытым способом заметное влияние оказывают рассолы межмерзлотного и подмерзлотного водоносных комплексов.

Надмерзлотные воды сезонно-талого слоя рыхлых отложений четвертичного возраста существуют сезонно (май-сентябрь). Распространены повсеместно, питание происходит за счет оттаивания мерзлых льдистых отложений и атмосферных осадков, водоупором являются многолетнемерзлые породы. Разгрузка вод осуществляется в речную сеть. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциевые, натриевые. По минерализации пресные и ультрапресные (0,05-0,3 г/л.). В пределах развития кимберлитовых пород воды сульфатные, пресные (0,5-0,7 г/л), агрессивные по отношению к бетонам. Водообильность пород сезонно-талого слоя незначительная.

Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (МВВК) имеет спорадическое распространение, вскрывался рядом скважин в пределах тектонических зон (Северного, Ботуобинского, Дьяхтарского разломов) в ордовикских и верхнекембрийских отложениях. В районе трубки «Ботуобинская» воды МВВК не вскрыты. Кровлей водоносного комплекса являются глинистые многолетнемерзлые отложения балыктахской и чаргольской свит нижнего ордовика и верхнего кембрия [82]. Абсолютные отметки кровли  $+161,1 \div +92,3$  м. Подошвой комплекса является кровля многолетнемерзлых пород. Эффективная мощность комплекса до 12,7 м. Интервалы вскрытия МВВК в пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» представлены в таблице 2.4

Таблица 2.4 – Интервалы вскрытия МВВК в пределах месторождения<sup>16</sup>

№ скважины	Интервал водоносного комплекса, от-до	Мощность комплекса, м	Эффективная мощность, м
	Абс. отм		
5ГВ	$\frac{167,2-412,6}{+91,1/-154,3/}$	245,4	12,7
9ГВ	$\frac{166,7-382}{+91,3/-124/}$	215,3	10,7
10ГВ	$\frac{224,4-461}{+30,6/-206/}$	236,6	14,6
11ГВ	$\frac{180-398}{+75/-143/}$	218	1,8
13ГВ	$\frac{208-400}{+50,3/-141,7/}$	192	
15ГВ	$\frac{208-400}{+50,3/-141,7/}$	192	

Коллекторами МВВК являются верхнекембрийские трещиноватые известняки, алевролиты и песчанистые доломиты. Общая пористость варьируется в интервале от 5,7 до 35 %,

<sup>16</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водоприитоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

в среднем составляет ~ 20 %; эффективная пористость колеблется от 5,8 до 47,9%, открытая пористость в интервале от 4,3 до 28,4%.

Воды напорные, величина напора составляет 15-20 м. Глубины залегания статического уровня 179,5-185,7 м. По химическому составу воды хлоридные магниевые-кальциевые, по минерализации (до 162 г/л) – рассолы, обладающие слабой щелочной реакцией и агрессивностью по отношению к металлам и бетону. Водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами: водопроницаемость 0,001-0,020 м<sup>2</sup>/сут, дебиты по восстановлению уровня воды в скважинах составляют 0,1-2,4 м<sup>3</sup>/сут. Коэффициент пьезопроводности 10<sup>3</sup>.

Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ПВВК) имеет повсеместное распространение, вскрывался глубокими гидрогеологическими скважинами на глубинах 422,4-433,0 м (в абс. отм. -164,1÷-198,6 м). В 2020 г. ПВВК вскрыт карьером. Литологический состав вмещающих пород представлен переслаиванием мергелей, известняков и доломитов чаргольской и джуктинской свит верхнего кембрия. В разрезе выделяются пласты-коллекторы мощностью от 0,2 до 10,6 м, эффективная суммарная мощность которых достигает 54,8 м. Интервалы вскрытия ПВВК в пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская» представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Интервалы вскрытия подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса в пределах карьерного поля трубки «Нюрбинская»<sup>17</sup>

№ скважины	<u>Интервал водоносного комплекса, от-до</u>	Мощность комплекса, м	Эффективная мощность, м
	<u>Абс. отм</u>		
5ГВ	422,4-997,8 -164,1/-739,5/	575,4	
11ГВ	398-802 -143/-547	404	
15ГВ	394,3-750 -136/-431,7		
КСС-1	368,5-1100 -112,8/-844,3/	731,5	7,4
КСС-2	361,7-774 -107,6/-519,9/	412,3	5,5

Коллекторами ПВВК являются пористо-кавернозными известняки, оолитовые доломиты. Водоносный комплекс характеризуется низкими фильтрационными свойствами: водопроницаемость от 0,001 до 0,31 м<sup>2</sup>/сут, дебиты по восстановлению – 0,2–15,9 м<sup>3</sup>/сут. Воды напорные, величина напора достигает 250 м. В тектонических зонах подмерзлотный

<sup>17</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водоприитоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

*По результатам проведенных исследований, справедливо сделать следующий ряд выводов и обобщений:*

1. Криогидрогеологические условия рассмотренных кимберлитовых полей имеют ряд существенных отличий, обусловленных их структурной позицией в пределах Сибирской платформы, а также изменениями условий осадконакопления в геологические периоды развития территории, что подтверждает необходимость их изучения применительно к локальным условиям, с учётом влияния факторов от внедрения отдельных кимберлитовых трубок или даечных тел основного состава в зонах влияния крупных разрывных нарушений. Это в свою очередь подтверждает справедливость структурного подхода при описании криогидрогеологических условий кимберлитовых полей и отдельных месторождений, а также площадей расположения и влияния активной техногенной нагрузки, возникающей в процессе закачки дренажных вод в недра.

2. Наиболее сложными гидрогеологическими условиями характеризуются Далдынское и Мирнинское кимберлитовые поля, Алакит-Мархинское и Накынское кимберлитовые поля имеют менее сложные условия.

3. Отличительными особенностями Мирнинского кимберлитового поля являются:

- наличие в разрезе вмещающих пород мощных толщ галогенных пород, предопределивших формирование надсолевых и межсолевых рассолов, отличных по химическому составу;

- выделение в интервале метегерской и ичерской свит первого подмерзлотного надсолевого метегеро-ичерского водоносного комплекса, насыщенного хлоридно-натриевыми рассолами четвертичного возраста [37; 38; 431];

- выделение в интервале олекминской, толбачанской и эльгянской свит коллекторов смешанной флюидной насыщенности, а также отдельных зон, характеризующихся как аномально высокими, так и аномально низкими давлениями, осложнённых наличием насыщенных хлоридно-кальциевых рассолов с минерализацией 450-520 г/литр [388; 394; 401].

4. Отличительными особенностями Далдынского кимберлитового поля являются:

- влияние Далдынской флексуры на формирование фильтрационных свойств коллекторов среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов;

- обратная (аномальная) вертикальная зональность, увеличение водообильности водоносных комплексов с глубиной, которая обусловлена синергетическим влиянием структурно-тектонических, литолого-фациальных и криогидрогеологических условий, а также их изменениями в различные геологические периоды;

- все выделяемые в разрезе рассолы имеют хлоридно-кальциевый или хлоридно-магниево-кальциевый состав.

5. Алакит-Мархинское и Накынское кимберлитовые поля, несмотря на приуроченность к различным склонам Анабарской антеклизы, имеют ряд схожих черт:

– невысокие дебиты выделяемых в разрезе водоносных комплексов; – рассолы подмерзлотных комплексов, как правило, представлены седиментационными водами, претерпевшими несколько стадий метаморфизма;

– рассолы межмерзлотных комплексов относятся к рассолам вымораживания, формируя природные линзы криопэги [107; 109; 217-219], как правило, приуроченные к зонам динамического воздействия разрывных нарушений, что обусловлено наличием на таких участках дополнительной «наведённой» трещиноватости и емкости.

Несмотря на перечисленные различия, есть ряд общих черт:

– карбонатные породы характеризуются трещинно-пористым и трещинно-карстовым типом проницаемости;

– выделяемые водоносные комплексы находятся в зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, имеют высоконапорный характер и содержат высокоминерализованные хлоридные рассолы различной степени насыщения, с минерализацией от 80 до 520 г/литр.

Выявленные различия криогидрогеологических условий обрабатываемых месторождений оказали непосредственное влияние не только на выбор способа утилизации формируемых дренажных вод, но и на проектируемые системы защиты карьеров и рудников от затопления [230].

### ГЛАВА 3. ПЛАСТОВЫЕ ГАЗЫ В ПРЕДЕЛАХ ЗОН ДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК: ТИПИЗАЦИЯ, ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ В КОЛЛЕКТОРАХ, ПРОБЛЕМЫ ОПЕРЕЖАЮЩЕЙ ДЕГАЗАЦИИ ПРИ ПРОХОДКЕ<sup>18</sup>

В процессе отработки глубоких горизонтов подземным способом трубок Айхал, Интернациональная, Мир и Удачная одной из проблем, требующих детального исследования является повсеместное распространение коллекторов, содержащих углеводородные газы. Вскрываемые в процессе ведения опытных и разведочных работ неструктурные скопления представляют большую угрозу для безопасного ведения проходческих и добычных работ. Наиболее критичным является выделение газосодержащих интервалов при переходе на подземную отработку, т.к. газоносность пород, объём, состав и форма содержащихся газов определяет не только параметры вентиляции рудников, но и скорость горнопроходческих работ, а также технологические решения по опережающей дегазации массива [186]. Наибольшую опасность представляют взрывоопасные или ядовитые газы. На всех кимберлитовых трубках без исключения в процессе изучения фиксировалось наличие углеводородных газов, находящихся как в свободной, так и в растворённой и связанной формах. А на месторождениях Мирнинского кимберлитового поля рассолы МИВК содержат сероводород в достаточно высоких концентрациях. В виду существенных отличий по характеру и степени насыщения месторождений пластовыми газами, приведём их отдельную характеристику, сгруппировав по принадлежности к кимберлитовым полям.

По результатам поискового бурения, выполненного в 70-80-х гг. XX века, в пределах Якутской алмазоносной провинции было выделено несколько промышленных месторождений углеводородов. Все выделенные месторождения приурочены к Непско-Ботубинской антеклизе, и находятся южнее г. Мирный (рис. 3.1).

---

<sup>18</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО:

Иост Н.А. Отчёт о результатах бурения скважины № 306 с комплексом гидрогеологических и геофизических исследований в районе трубки Интернациональная в 2003-2006 гг. (к материалам доразведки месторождения между горизонтами (-560)-(-690)м) (объект Глубокий) в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2007.

Янников А. М. Отчёт о составе, количестве и характере выделения взрывоопасных газов до отм. -820 м абс. рудника «Удачный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2020.

Янников А. М. Отчёт о гидрогеологических условиях месторождения до отм.-820 м рудника «Удачный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2020.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Интернациональная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Мир» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.



Рис. 3.1. Месторождения углеводородов в пределах Якутской алмазоносной провинции [384]

Часть месторождений приурочена к венд-рифейским и нижнекембрийским породам осинского продуктивного горизонта, надежно экранированного пачками галогенных пород нелбинской и юрегинской свит [70; 122; 424]. Рассматриваемый продуктивный горизонт имеет региональное распространение, подтверждаемое нефтепоисковым бурением (рис. 3.2). Необходимо отметить, что, не смотря на незначительные дебиты (5-7 тыс. м<sup>3</sup> /сут), полученные из коллекторов билирской свиты и делающие их неперспективными для промысла, региональный характер распространения является дополнительным ограничивающим фактором отработки трубок Интернациональная и Мир по глубине [393].

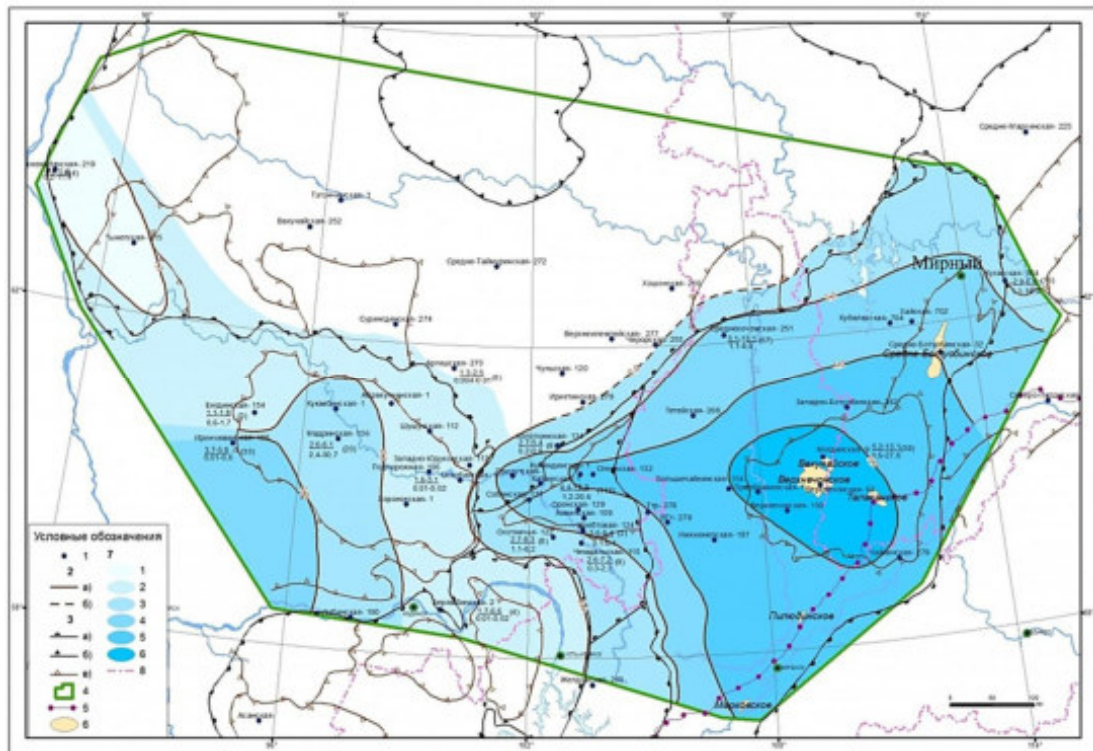


Рис. 3.2. Региональное распространение осинского продуктивного подгоризонта [393]

Выделенные ранее в непосредственной близости от г. Мирный нефтегазоконденсатные Иреляхское и Маччобинское месторождения приурочены к ботубинскому и улаханскому продуктивным горизонтам. Эффективная мощность выделенных коллекторов составляет от 10 до 20 м. Зафиксированные притоки пластовых газов до 201 тыс. м<sup>3</sup>/сут., нефти – до 100 м<sup>3</sup>/сут. Пластовые давления 15,5–16,0 МПа, температура +12 °С/+14°С [155; 370].

В пределах Алакит-Мархинского, Далдынского и Накынского кимберлитовых полей промышленных скоплений углеводородов на настоящий момент зафиксировано не было.

В рамках данной главы выполнен сопоставительный анализ газодинамических условий четырёх кимберлитовых полей Якутской алмазонасной провинции: Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского, определяемых структурно-тектоническими, литолого-фациальными и криогидрогеологическими условиями, для обоснования влияния на способ дегазации вмещающих пород, необходимый для безопасной отработки запасов части уникальных месторождений (трубки Интернациональная, Мир и Удачная).

Газодинамическая характеристика кимберлитовых полей выполнена с учётом имеющихся фондовых материалов, исследований, выполненных ранее [116; 166; 221; 226; 331; 334; 350; и др.] и результатов научно-исследовательской деятельности автора.

Исследования, проводимые автором, безусловно, базировались на имеющейся обширной базе как нормативной документации, так и на опубликованных и фондовых трудах учёных и специалистов (Авдеева В.И., Акишев А.Н., Анциферов А.С., Вассоевич Н. Б., Вахромеев А.Г., Вожов В.И., Гензель Г.Н., Гурари Ф.Г., Дроздов А.В., Иост Н.А., Карцев А.А., Колосов П.Н., Конторович А.Э., Крайча Я., Лобанов В.В., Сурков В.С., Сурнин А.И., Трофимук А.А. Фукс А.Б., Фукс Б.А. и др.).

### ***3.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле***

Характеристика Алакит-Мархинского кимберлитового поля выполнена по базовым месторождениям для Айхальского горно-обогачительного комбината.

#### *Углеводородные газы в отложениях шахтного поля трубки Айхал*

По результатам ГИС и газового каротажа, проведенных по опытным скважинам, пробуренным непосредственно из системы подземных горных выработок действующего рудника Айхал, насыщенные углеводородными газами коллекторы выделены только в пределах моркокинской и мархинской свит.

Зафиксированные скопления пластовых углеводородных газов, как правило, обусловлены литологическими и структурно-тектоническими факторами:

- Наличием в мархинской свите пластов-покрышек (плотных карбонатных и терригенно-карбонатных пород), способствующих накоплению газов;

• Влиянием разноранговых тектонических нарушений, являющихся источниками дополнительного «обогащения» разреза углеводородными газами из ниже залегающих генерирующих отложений. Причём дополнительный привнос углеводородов на стадии тектонической активизации, внедрения магматических пород и сопутствующих гидротермальных процессов имел доминантную составляющую на их формирование;

• Наличием в изучаемых отложениях биогенного материала, приводящего к образованию УГВ в незначительных количествах в самих породах.

Химический состав пластовых газов, определенный по свитам, приведён в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты химических анализов проб пластовых газов [389]

Свита	Интервал: от дневной поверхности абс. отм., м	Среднее содержание компонента в пробе, объёмная доля, %				
		СН <sub>4</sub> (метан)	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub> (этан)	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub> (пропан)	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub> (бутан)	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub> (пентан)
Моркокинская	<u>604-770</u> -4/-170	85,45	2,15	0,33	0,02	0,05
Мархинская	<u>770-1000</u> -170/-400	84	10	2,1	0,14	0,33

Анализ результатов, полученных в ходе опробования, указывает, что доминирующее положение в составе играет метан, но в зависимости от свиты его процентное соотношение несколько изменяется.

В процессе проведения исследований автором впервые был выявлен факт присутствия свободных пластовых газов во вмещающих породах, притоки пластовых углеводородных (преимущественно метановых) газов достигали 3,0 м<sup>3</sup>/ч, необходимо отметить, что ранее данный факт не выявлялся. Фиксируемое истечение пластовых газов из устьев скважин классифицировалось как ламинарное, на некоторых интервалах был отмечен суфлярный характер выделения газа, турбулентных истечений и динамических газовых явлений (выбросов газа) по опытным скважинам зафиксировано не было. Химический состав газов приведён в таблице 3.2 и на рис. 3.3.

Таблица 3.2 – Химический состав пластовых газов по скважинам № 2гр и № 3гр [389]

№ скв.	Среднее содержание компонента в пробе, % (объём.)									
	УВГ	СН <sub>4</sub>	этан	пропан	i-бутан	n-бутан	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He
2гр	94,48	82,04	9,4	2,33	0,244	0,387	5,39	0,190	0,0015	0,054
3гр	95,31	83	10	1,8	0,14	0,32	4,38	0,044	0,03	0,085
	96,62	84	10	2,1	0,14	0,33	3,88	0,17	0,033	0,08

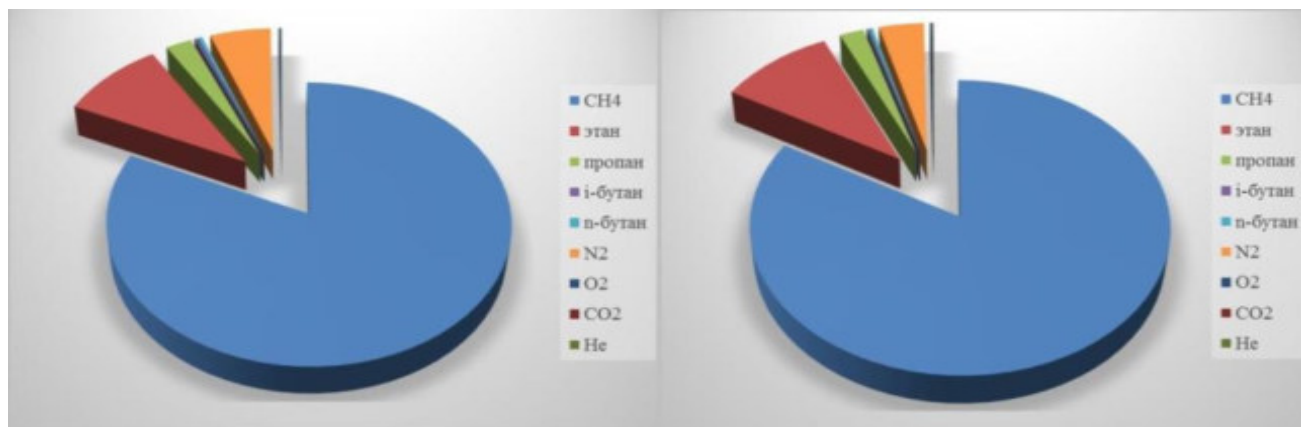


Рис. 3.3 Химический состав пластовых газов (слева - 2гр, справа – 3гр) [389]

Изменение дебитов пластовых газов в процессе бурения происходило нелинейно (прил. 2). Доказательством наличия в разрезе верхнекембрийского водоносного комплекса (ВВК) «сухих» газонасыщенных коллекторов являются следующие факты:

1. Вскрытие пластовых газов по скважине 3гр произошло на отм. -189,21 м, а рассолов на отм. -279,21 м;

2. Выявлено преобладание объёмов выделившегося газа над объёмом пластовых рассолов: по скважине 2гр излилось 43 м<sup>3</sup> рассола и 1 650 м<sup>3</sup> пластовых газов; по скважине 3гр – 14,5 м<sup>3</sup> рассола и 1 200 м<sup>3</sup> пластовых газов [404].

3. Установлено отсутствие прямой связи между увеличением притока рассолов с увеличением выделения пластового газа (прил. 3).

Наличие «сухих» газонасыщенных коллекторов в верхнекембрийских породах моркокинской и мархинской свит, связано как с особенностями формирования ВВК в предыдущие геологические периоды, так и с дегазацией битумов и мальт, наличие которых в разрезе зафиксировано в прослоях желтовато-серых до серых вторично доломитизированных известняков по системам субвертикальных трещин [220; 308]. Интервалы битуминозных пород, содержащих каустобиолиты (породы, содержащие большое количество углерода органического происхождения: нефти, битумы, мальты и т. д.), приведены в таблице 3.3.

- Зона № 1 выделяется в интервале -170,82/-215,21 м, суммарной мощностью от 6,3 до 38,5 м. Состоит из 2-3 интервалов, содержащих прослой битуминозных пород, зафиксированный приток пластовых газов составлял от 4,8 до 24,7 м<sup>3</sup>/сут;

- Зона № 2 выделена в интервале -241,41/-323,92 м, суммарной мощностью от 15,4 до 21,4 м. Состоит из 2-3 интервалов, содержащих прослой битуминозных пород, зафиксированный приток пластовых газов составлял от 18,7 до 72,0 м<sup>3</sup>/сут;

- Зона № 3 в интервале -329,41/-393,62 м, суммарной мощностью от 7,8 до 17,0 м. Состоит из 2 интервалов, содержащих прослой битуминозных пород, зафиксированный приток пластовых газов составлял от 14,9 до 36,0 м<sup>3</sup>/сут.

Таблица 3.3 – Интервалы битуминозных пород в пределах шахтного поля тр. Айхал [389]

Зона насыщения каустобиолитами	Скважина 2гр		Скважина 3гр	
	по стволу скважины, м	в абс. отм., м	по стволу скважины, м	в абс. отм., м
Зона № 1	71,9-75,4	<b>-170,82/-174,32</b>	75,4-90,4	<b>-174,61/-189,61</b>
	96,4-99,2	<b>-195,32/-198,12</b>	90,4-112,2	<b>-189,61/-211,41</b>
			114,3-116,0	<b>-213,51/-215,21</b>
Зона № 2	188,2-192,8	<b>-287,12/-291,72</b>	142,2-156,2	<b>-241,41/-255,41</b>
	201,2-203,4	<b>-300,12/-302,32</b>	194,3-201,7	<b>-293,51/-300,91</b>
	216,4-225,0	<b>-315,32/-323,92</b>		
Зона № 3	234,3-238,4	<b>-333,22/-337,32</b>	230,2-237,0	<b>-329,41/-336,21</b>
	291,0-294,7	<b>-389,92/-393,62</b>	258,7-268,9	<b>-357,91/-368,11</b>
Суммарная мощность битуминозных пород, м	<b>29,5</b>		<b>76,9</b>	

Отдельно стоит остановиться на том, что каждая из выделенных зон характеризуется слоистым, ритмичным строением, то есть битуминозные породы встречаются в виде отдельных прослоев и пропластков, разделённых прослоями, не содержащими каустобиолиты. Между собой зоны разделены толщами глинистых разностей карбонатных пород.

*Углеводородные газы в отложениях в пределах карьерного поля трубки Юбилейная*

Проведённые в процессе бурения разведочных скважин, расположенных на дневной поверхности, комплексные исследования позволили охарактеризовать газонасыщенность в интервале глубин 289,0–1 574,0 м. Характеристика разреза производилась при помощи отбора проб из бурового шлама и выбуренного керна. Результаты проведённого опробования приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты кернового опробования пород по составу и содержанию газов [406]

Номер пробы	Интервал отбора, абс., м	Количество трещин на 1 п. м, шт./мм	Состав и количество газов, %		
			Метан	Этан	Пропан
1	-510,3 / -521,2	1–10/0,1–30	97–99	0,05–0,3	Менее 0,02–0,04
2	-521,2 / -534,9	12–25/5–30	68–99	0,05–0,35	0,02–0,04
3	-534,9 / -555,5	18–30/1–30	97–99	0,05–0,04	Не более 0,02–0,04
4	-555,5 / -563,8	16–30/н. д.	–/–	0,05-0,02	–/–
5	-563,8 / -575,9	10–15/н. д.	–/–	–/–	–/–
6	-575,9 / -583,7	16–30/н. д.	–/–	–/–	–/–
7	-583,7 / -586,7	16–30/н. д.	–/–	–/–	–/–
8	-586,7 / -596,8	16–30/н. д.	–/–	–/–	–/–

Результаты химического анализа растворённых газов, отобранных на глубинах 450–1 050 м, представлены в таблице 3.5. Растворённые газы в рассолах в небольших количествах присущи метану и углеводородным газам, содержание которых увеличивается с глубиной. Такие газы как гелий, азот и диоксид углерода в рассолах присутствуют в незначительных количествах, а порой вообще отсутствуют (гелий, диоксид углерода).

Таблица 3.5 – Состав растворённых в природных рассолах газов [406]

№ п/п	Общая газонасыщенность	CH <sub>4</sub> , %	ΣУВГ, %	He, %	N <sub>2</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %
1	0,23–0,95	94,3–98,4	54,4–71,4	0,22–0,44	42–23	–
2	0,09–0,27	98,8–99,9	49,5–79,9	0,17–0,44	19,4–50,6	0,14–0,00
3	0,025–0,027	96,8–99,3	4,02–80,3	0,01–0,26	95,3–19,7	1,32–0,37
4	0,11–0,39	93,4–95,5	19,1–54,6	0–0,21	75–44	0,08–0

Газонасыщенность кимберлитов и вмещающих пород оценена по шести разведочным стволам в отметках олдондинской, моркокинской и мархинской свит и составила: - для пород олдондинской 0,19–0,53 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; - пород моркокинской 0,2–0,56 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; - пород мархинской 0,13–0,60 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; -порфиновых кимберлитов 0,12–1,14 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; - кимберлитовых брекчий 0,1–1,33 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Характер и динамика газопроявлений в рамках карьерного поля трубки «Юбилейная» были изучены в процессе разведочного бурения. По результатам выполненных исследований были выделены четыре зоны, объединяющие ближайшие интервалы газо-нефтепроявлений и насыщенные флюидами коллекторы [406]:

- Зона № 1, интервал 860–1 440 м (-74,1/-523,5 м абс.) – умеренные нефтепроявления: max Г<sub>сум</sub>=1,209 %, С<sub>сум</sub>=1,03 %;
- Зона № 2, интервал 1 440–1 460 м (-523,5/-538,7 м абс.) – умеренные нефтепроявления: max Г<sub>сум</sub>=0,006 %, С<sub>сум</sub>=0,008 %;
- Зона № 3, интервал 1 460–1 545 м (-538,7/-602,8 м абс.), 1 445–1 490 м (-527,3...-561,5 м абс.); 1 490–1 545 м (-561,5/-602,8 м абс.) – умеренные нефтепроявления: max Г<sub>сум</sub>=0,33 %, С<sub>сум</sub>=0,278 %;
- Зона № 4, интервал 1 545–1 559 м (-602,8/-613,2 м абс.) – умеренные, скудные нефтепроявления: Г<sub>сум</sub>=0,033 %, С<sub>сум</sub>=0,025 %.

### 3.2 Далдынское кимберлитовое поле

Характеристика Далдынского кимберлитового поля будет выполнена по трубке Удачной, являющейся базовым месторождением для Удачинского ГОКа. По результатам проведённого комплекса исследований углеводородное насыщение вмещающих пород трубки Удачная связано со вскрываемыми водоносными комплексами. Первый от поверхности верхнекембрийский водоносный комплекс, приуроченный к коллекторам моркокинской и мархинской свит, не формирует скоплений углеводородов и характеризуется невысокой газонасыщенностью от 0,01

до  $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , причём газы имеют преимущественно азотно-метановый состав. Ниже залегающие средне- и нижнекембрийские водоносные комплексы отличаются высокой водообильностью и, как правило, достаточно высокими параметрами проводимости (Т) от 10 до  $150 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Для коллекторов рассматриваемых комплексов характерно повсеместное углеводородное газонасыщение. Причём газонасыщенность рассолов составляет от 1 до  $3,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , закономерно увеличиваясь с глубиной. Фактически полученные при осушении трубки Удачной до отм. - 465 м притоки пластовых углеводородных газов соответствуют притокам природных рассолов, с учётом средней газонасыщенности  $1-1,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Учитывая текущее состояние, а также планы горных работ до 2030 г. на руднике Удачный, основным газодинамическим объектом, осложняющим горнотехнические условия отработки кимберлитовой трубки «Удачная» в отм. -200/-240 – -1000/-1050 м, будет оставаться среднекембрийский водоносный комплекс, приуроченный к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи (Є<sub>2id</sub>) и удачинской свиты (Є<sub>1-2 ud</sub>), представленным доминирующим переслаиванием известняков и доломитов. Залегающие ниже породы кумахской (Є<sub>1 k</sub>) и эмяксинской (Є<sub>1 em</sub>) свит будут вскрыты не ранее середины 30-х гг. XXI века.

В рамках проводимых исследований были выполнены опытные выпуски. по результатам которых выполнено определение газообильности. В целом вмещающие породы околотрубного и межтрубного массива месторождения трубки Удачная в отметках проводимых исследований -200/-1000 м можно охарактеризовать как породы средней обводнённости и повышенной обводнённости в межтрубье, и слабой (до  $0,54 \text{ м}^3/\text{час}$ ) до средней газообильности. Необходимо отметить, что газоносность карбонатных пород изучаемого месторождения очень сильно зависит от структурно-тектонического и литолого-фациального факторов. Зачастую скважины, располагающиеся на небольшом расстоянии друг от друга, имеют характеристические гидрогеологические коэффициенты, отличающиеся на порядок. Газоносность кимберлитов трубки Удачная также изменчива и очень сильно зависит от структурно-тектонического и петрографического факторов. Следует отметить, что в разрезе Западного кимберлитового тела при бурении разведочных скважин были установлены участки разуплотнённых пород, заполненных рассольно-газовой смесью. Мощности таких участков от 1,0 до 5–10 м и более. Как правило, при вскрытии таких зон происходит повышенное выделение рассольно-газовой смеси с расходом до  $15-20 \text{ м}^3/\text{час}$ , однако, выделение с таким дебитом недолговременны (не более 3–4 месяцев), что свидетельствует о незначительных емкостных запасах. В процессе бурения опытных скважин фактов наличия свободных пластовых газов, как во вмещающих породах, так и в кимберлитах, не выявлено. Доминирующая часть газов выделяется при дегазации газонасыщенных рассолов. Фиксируемое истечение пластовых газов из устьев скважин классифицировалось как ламинарное, на некоторых интервалах был отмечен суфлярный

характер выделения газа. Химический состав газов, отобранных по опытным скважинам, приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Химический состав пластовых газов по опытным скважинам [408]

№ скв	Среднее содержание компонента в пробе, % (объемный)									
	УВГ	СН <sub>4</sub>	этан	пропан	i-бутан	n-бутан	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He
СГК-1	98,2	95,0	2,7	0,4	0,03	0,05	1,49	0,2	0,23	0,04
	98,0	95,4	2,1	0,3	0,03	0,06	1,56	0,1	0,41	0,05
5гр	96,9	94,0	2,6	0,2	0,01	0,11	1,9	0,1	1,2	0,09
2гр	95,9	94,0	1,7	0,1	0,01	0,09	2,52	0,1	0,5	0,09
1гр	95,89	78,0	12,8	3,5	0,4	0,9	1,6	2,0	2,2	0,04

Согласно приведенным в таблице данным, зафиксированные пластовые газы относятся к углеводородным, метановым (т.к. данный газ занимает доминирующее положение до 95%, а вместе с гомологами до 98%). Характеристические диаграммы процентного состава газов по опытным скважинам приведены на рисунке 3.4.

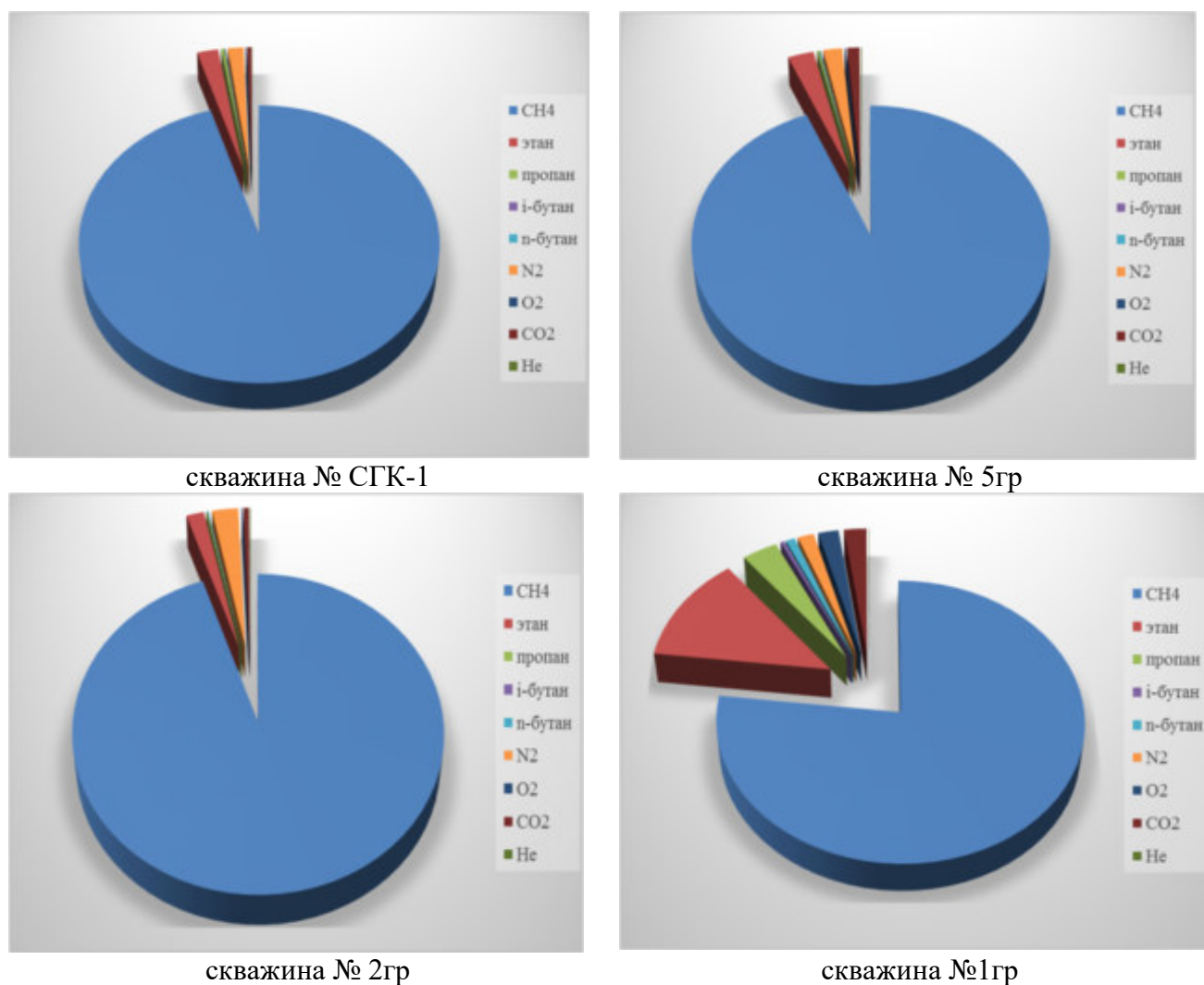


Рис. 3.4. Химический состав пластовых газов [408]

Анализируя динамику истечения пластовых газов и природных рассолов из опытных скважин (прил. 4), отмечено синхронное изменение истечения газов и природных рассолов, что связано не только с литолого-фациальными и структурно-тектоническими особенностями коллекторов среднекембрийского водоносного комплекса, но и с достаточно значительными запасами газа в природных рассолах.

Проведенные исследования подтвердили, что поступление доминирующего количества углеводородных газов в подземные горные выработки рудника Удачный будет происходить из-за дегазации рассолов среднекембрийского водоносного комплекса (до 90%) и частично прямого диффузно-суфлярного выделения пластовых газов из коллекторов в интервале удачинской свиты (до 10%).

### *3.3 Мирнинское кимберлитовое поле*

Характеристика Мирнинского кимберлитового поля будет выполнена по трубкам Интернациональная и Мир, являющимся базовыми месторождениями для Мирнинского горно-обогатительного комбината. Необходимо отметить, что месторождения Мирнинского кимберлитового поля характеризуются наиболее сложными газодинамическими условиями. По результатам проведенного ГИС и газового каротажа, насыщенные углеводородными газами коллекторы выделены в пределах юрегинской ( $\text{C}_1 \text{ jur}$ ) в отм. -1150/-1300 м, нелбинской ( $\text{C}_1 \text{ nl}$ ) в отм. -1100/-1150 м, эльгянской ( $\text{C}_1 \text{ el}$ ) в отм. -1050/-1100 м, толбачанской ( $\text{C}_1 \text{ tb}$ ) в отм. -690/-1050 м, олекминской ( $\text{C}_1 \text{ ol}$ ) в отм. -500/-690 м и чарской ( $\text{C}_1 \text{ cr}$ ) в отм. -200/-500 м свит [366]. Рассолы метегеро-ичерского водоносного комплекса насыщены сероводородом с содержанием до 130 мг/л [398].

Зафиксированные скопления пластовых углеводородных газов, как правило, обусловлены литологическими и структурно-тектоническими факторами:

- наличием пластов-покрышек (солеродных пачек, плотных карбонатных и магматических пород), способствующих накоплению газов;
- влиянием разноранговых тектонических нарушений, которые являются источниками дополнительного «обогащения» разреза углеводородными газами из ниже залегающих генерирующих отложений [95; 470], причём дополнительный привнос углеводородов на стадии тектонической активизации, внедрения магматических пород и сопутствующих гидротермальных процессов имел доминантную составляющую на их формирование. Химический состав пластовых газов по свитам, приведён в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Химический состав пластовых газов на месторождениях Мирнинского кимберлитового поля [393]

Свита	интервал: <u>от дневной поверхности</u> а.о., м	Среднее содержание компонента в пробе, объёмная доля, %				
		СН <sub>4</sub>	С <sub>2</sub> Н <sub>6</sub>	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>	С <sub>4</sub> Н <sub>10</sub>	С <sub>5</sub> Н <sub>12</sub>
чарская	<u>543,8-848,5 м</u> -205,1/-509,8 м	96,98	2,59	0,34	0,05	0,04
олекминская	<u>848,5-1033,0 м</u> -509,8/-694,3 м	97,98	1,70	0,22	0,06	0,04
толбачанская	<u>1033,0-1408,8 м</u> -694,3/-1070,1 м	93,99	5,25	0,60	0,13	0,03
эльгянская	<u>1408,8-1448,4 м</u> -1070,1/-1109,7 м	94,92	4,37	0,56	0,13	0,02
нелбинская	<u>1448,4-1490,6 м</u> -1109,7/-1151,9 м	92,70	6,59	0,65	0,07	0,14
юрегинская	<u>1490,6-1650,0 м</u> -1151,9/-1311,3 м	92,64	6,60	0,62	0,12	0,02

*Углеводородные газы в отложениях шахтного поля трубки Интернациональная*

Исследования газодинамических условий месторождения проводились с учётом текущей ситуации на руднике Интернациональный – добычные работы ведутся в интервале верхней пачки толбачанской свиты, а запасы, требующие вовлечения в отработку, находятся в отметках -845/-1250 м, т.е. нижней пачки толбачанской, эльгянской, нелбинской и юрегинской свит. Поэтому остановимся на характеристике вмещающих отложений в обозначенных отметках.

По степени нефтенасыщенности отложения толбачанской свиты были разделены на четыре зоны (по результатам газового каротажа по опытным скважинам). Описание характера газонасыщенности также привязано к этим условным зонам.

*Первая зона.* Интервал (-697,8) – (-797,8) м. На этом интервале во вмещающих породах выделяются коллекторы №1 и №2. Интенсивность хлороформных вытяжек (ЛБА) варьирует в пределах 1–2 баллов. Породы интервала насыщены легким битуминоидом. Гсум.: min = 0,0001%; max = 0,0274%

Данная зона сложена пластами каменных солей и подчиненных (менее мощных) слоев доломитов. Каменные соли крупнокристаллические, среднекристаллические, молочно-белые, бесцветные с редкими тонкими прослоями серых доломитов, мощностью до 3 мм, возле которых соли имеют более тёмный цвет из-за пылевидных включений карбонатов. Карбонатная составляющая свиты представлена доломитом коричневым, серым, различной интенсивности окраски, местами известковистым, глинистым, коричневым, мелко-среднезернистым, на контакте с каменными солями наблюдается пористость, каверны, пустые или заполненные солями.

*Вторая зона.* Интервал (-797,8) – (-844,4) м. На этом интервале во вмещающих породах выделяются коллекторы №№ 3, 4, 5, 6, и 7. Интенсивность хлороформных вытяжек (ЛБА) варьирует в пределах 1-4 баллов. Породы насыщены маслянисто-смолистым битумоидом. Встречаются смолянисто-асфальтеновые битумоиды; лёгкие битумоиды диагностируются в местах с запахом газа. Г сум.: min = 0,0001%; max = 0,1251%

Данная зона сложена карбонатными отложениями. Доломиты коричневые, мелкозернистые, крупнопористые, кавернозные, не янснослоистые. По кавернам и порам наблюдаются "выпоты" нефти (люминесцируют в бледно-желтых тонах). Доломиты известковистые, коричневые, крупнопористые, кавернозные, местами наблюдаются выделения нефти. Доломиты глинистые, зеленовато-серые, серые, слоистые, плотные, мелкозернистые. Доломиты кремнистые, темно-серые до черного, пелитоморфные, плотные, однородные, массивные, очень крепкие. Породы неравномерно переслаиваются, преобладают доломиты глинистые.

*Третья зона.* Интервал (-844,4) – (-954,8) м. На этом интервале во вмещающих породах выделяются коллекторы №№ 8, 9, 10 и 11. Интенсивность хлороформных вытяжек (ЛБА) варьирует в пределах 1–3 баллов. Породы насыщены маслянисто-смолистым битумоидом. Встречаются смолянисто-асфальтеновые битумоиды; лёгкие битумоиды диагностируются в местах с запахом газа. Г сум.: min = 0,0008%; max = 0,6825%.

В третьей зоне преобладает неравномерное переслаивание карбонатных пород. Известняки доломитовые, темно-бежевого цвета, мелкозернистые, плотные, однородные, местами кремнистые, наклонно-слоистые, волнисто-слоистые. Доломиты красно-коричневые, мелкозернистые, плотные, пятнистые с обломками доломитов серых, мелкозернистых. Доломиты коричневые, мелкозернистые, плотные, однородные, массивные, местами трещиноватые. Доломиты глинистые, серые, зеленовато-серые, пелитоморфные, плотные, горизонтально слоистые. Единичные прослои доломитов кремнистых, светло-коричневых, пелитоморфных, плотных, однородных, массивных.

*Четвёртая зона.* Интервал (-954,8) – (-1042,8) м. На этом интервале во вмещающих породах выделяются коллекторы №№ 12, 13, 14 и 15. Интенсивность хлороформных вытяжек (ЛБА) варьирует в пределах 1-3 баллов. Породы насыщены маслянисто-смолистым битумоидом. Встречаются смолянисто-асфальтеновые битумоиды; лёгкие битумоиды диагностируются в местах с запахом газа. Г сум.: min = 0,0014%; max = 0,9138%.

Зона представлена преимущественно доломитом известковистым, известняком доломитовым и маломощными прослоями доломита глинистого. Доломиты известковистые, коричневые, мелкозернистые, мелкопористые, однородные, массивные, наблюдаются умеренные выделения нефти по порам. Известняки доломитовые, темно-коричневые,

мелкозернистые, плотные, развиты вертикальные трещины, однородные, массивные, редкие выпоты нефти. Доломиты бежевые, коричневые, мелкозернистые до пелитоморфных, мелкопористые, пятнистые, местами известковистые, выделения нефти по порам. Доломиты глинистые, серые, зеленовато-серые, пелитоморфные, плотные, горизонтально слоистые, трещиноватые по плоскости напластования.

По составу газ метановый (содержание  $\text{CH}_4$  до 95%). Из тяжёлых углеводородов присутствуют: пропан (до 3,5%), бутан (до 2%), этан (до 2%) [365; 487].

Эльгянская свита (абс. отм. (-1042,8) – (-1079,8) м) представлена известняками доломитизированными с прослоями водорослевых, реже глинистых известняков. По керну нефтепроявлений отмечено не было. Интенсивность хлороформных вытяжек (ЛБА) составляет 2 балла. Породы интервала насыщены легким битумоидом. Г сум.: min = 0,0002%; max = 0,976%. По составу газ метановый (содержание  $\text{CH}_4$  до 95%). Из тяжёлых углеводородов присутствуют: пропан (до 3,5%), бутан (до 2%), этан (до 2%). Пентан отсутствует. Тип насыщения - водорастворенный газ. Химический состав пластовых газов толбачанской и эльгянской свит, приведён в табл. 3.8.

Анализ результатов, полученных в ходе опробования, подтверждает выводы о стабильности химического состава пластовых газов. Также, в качестве дублирующего метода, производился инструментальный контроль за составом пластовых газов при помощи газоанализаторов [239; 357; 365; 471; 488; 489; 490].

Таблица 3.8 – Химический состав пластовых газов по опытным скважинам [393]

Место отбора (№ скважины)	глубина, м	Среднее содержание компонента в пробе, объёмная доля, %											
		He (гелий)	$\text{H}_2$ (водород)	$\text{N}_2$ (азот)	$\text{CO}_2$ (двуокись углерода)	$\text{CH}_4$ (метан)	$\text{C}_2\text{H}_6$ (этан)	$\text{C}_3\text{H}_8$ (пропан)	$\text{CH}(\text{CH}_3)_3$ (и-бутан)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$ (н-бутан)	$(\text{CH}_3)_4\text{C}$ (нео-пентан)	$(\text{CH}_3)_2\text{CHCH}_2\text{CH}_3$ (и-пентан)	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$ (н-пентан)
1Д	на устье	0,12	0,014	0,52	0,04	94,0	3,92	1,14	0,15	0,25	0,002	0,05	0,06
2Д		0,13	0,016	0,45	0,04	93,2	3,98	1,36	0,20	0,39	0,003	0,10	0,15
3Д		0,13	0,000	0,91	0,02	93,4	3,83	1,18	0,15	0,26	0,002	0,05	0,06
5Д		0,12	0,008	0,94	0,05	93,4	3,75	1,20	0,14	0,29	0,003	0,05	0,07
6Д'		0,12	0,014	1,00	0,09	93,3	3,86	1,13	0,14	0,24	0,004	0,04	0,05
7Д		0,11	0,004	1,89	0,24	92,1	3,93	1,17	0,15	0,26	0,002	0,05	0,07
9Д		0,11	0,004	3,49	0,36	91,1	3,46	0,98	0,13	0,22	0,002	0,04	0,04

Отложения толбачанской свиты изучались по скважинам № 306 и №307, являющимся совершенными по степени вскрытия коллекторов. По результатам скважинной геофизики по

обеим скважинам в отложениях выделяется 5 газонасыщенных коллекторов, 8 коллекторов газонасыщенных и два «сухих» коллектора (прил. 5). Характеристика выделенных коллекторов приведена по каждой скважине отдельно.

По скв. №306 выделенные коллекторы состоят из пластов-коллекторов мощностью от 0,4 м до 4,5 м. Эффективная общая мощность газонасыщенных коллекторов толбачанской свиты 96,3 м. Газонасыщенные коллекторы (**№№ 2-6**) по скв. 306 отмечаются в интервале 1175,7 (абс. отм. -774,6 м) – 1215,6 (абс. отм. -814,5 м). Эффективная мощность этих коллекторов 34,1 м. Средний коэффициент общей пористости 5,3%. Тип пористости кавернозно-межзерновой. По лабораторным данным средний коэффициент пористости 6,4%. Коллекторы **№10** и **№11** по результатам постановки пластоиспытателя КИИ-95 «сухие».

Газо-водонасыщенные коллекторы (**№№ 12-15**) отмечаются в интервале 1331,7 (абс. отм. -930,6 м) – 1376,8 (абс. отм. -975,7 м). Эффективная мощность этих коллекторов 14,0 м. Средний коэффициент общей пористости 4,7%. Тип пористости межзерновой и межзерново-кавернозный. По лабораторным данным средний коэффициент пористости 7,2%.

По скв. №307 мощность пластов коллекторов изменяется от 0,5 до 7,0 м. Общая мощность газонасыщенных коллекторов толбачанской свиты составила 110,6 м.

Газонасыщенные коллекторы (**№№ 2, 3, 5**) по скважине №307 отмечаются в интервале 1195,0 (абс. отм. -795,3 м) – 1225,5 (абс. отм. -825,8 м). Эффективная мощность этих коллекторов 8,5 м. Средний коэффициент общей пористости от 2,5 до 5,0%. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Газо-водонасыщенные коллекторы (**№№ 8-9**) отмечаются в интервале 1264,0 (абс. отм. -864,3 м) – 1320,0 (абс. отм. -920,3 м). Эффективная мощность этих коллекторов 31,0 м. Средний коэффициент общей пористости от 2,5 до 10,7%. Тип пористости межзерновой, трещинно-кавернозный и межзерново-кавернозный.

Коллекторы **№10** и **№11** по результатам постановки пластоиспытателя КИИ-65 «сухие», слабогазонасыщенные. Выделяются на интервале 1324,5 (абс. отм. -924,8 м) – 1354,5 (абс. отм. -954,8 м). Эффективная мощность этих коллекторов 17,0 м. Средний коэффициент общей пористости от 2,0 до 6,0%. Тип пористости межзерновой, трещинно-кавернозный и межзерново-кавернозный.

Газонасыщенные коллекторы (**№№12-13**) по скв. №307 отмечаются в интервале 1359,0 (абс. отм. -959,3 м) – 1412,0 (абс. отм. -1012,3 м). Эффективная мощность этих коллекторов 42,0 м. Средний коэффициент общей пористости от 2,5 до 5,4%. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Газо-водонасыщенные коллектора (**№№ 14-15**) отмечаются в интервале 1422,0 (абс. отм. -1022,3 м) – 1440,0 (абс. отм. -1040,3 м). Эффективная мощность этих коллекторов 6,5 м.

Средний коэффициент общей пористости от 2,2 до 10,3%. Тип пористости межзерновой и межзерново-кавернозный [166; 362; 363].

По результатам постановок пластоиспытателей по скважинам в разрезе толбачанской свиты выделяется три зоны: *газонасыщенная, практически “сухая” и газоводонасыщенная.*

Газонасыщенная 1047,0-1320,0 м (-647,2 м) - (-920,3 м) по степени газонасыщения в свою очередь подразделяется на четыре интервала:

- интервал 1047,0 – 1190,0 м (абс. отм. (-647,3м) – (-790,3м): галогенно-сульфатно-карбонатная толща с включениями твёрдых битумов. По данным ГИС в данном интервале выделен один маломощный пласт-коллектор №1 мощностью 2,0 м. Приток флюида открытым периоде при снятии давления  $Q$  до 0,07 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 79,0 кгс/см<sup>2</sup>;

коэффициент проницаемости  $\frac{kh}{\mu}$  - 0,003 Дсм/спз;

- интервал 1190,0 – 1230,0 м (абс. отм. (-790,3 м) – (-830,3 м): галогенно-сульфатно-карбонатная толща с включениями твёрдых битумов. По данным ГИС на данном интервале выделено четыре коллектора №№ 2, 3, 4 и 5, общей мощностью 9,7 м. Приток газа  $Q_g$  до 7,2

м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 113,0 кгс/см<sup>2</sup>; коэффициент проницаемости  $\frac{kh}{\mu}$  - 0,56 Дсм/спз;

- интервал 1231,8 – 1280,0 м (абс. отм. (-832,1м) – (-880,3м): карбонатная толща с редкими выпотами нефти. По данным ГИС на данном интервале выделено три коллектора №№ 6, 7 и 8, общей мощностью 15,3 м. Приток газа  $Q_g$  до 28,8 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление

$P_{пл.}$  – 111,0 кгс/см<sup>2</sup>; коэффициент проницаемости  $\frac{kh}{\mu}$  - 1,24 Дсм/спз;

- интервал 1280,0 – 1320,0 м (абс. отм. (-880,3м) – (-920,3м): карбонатная толща с более обильным нефтенасыщением. По данным ГИС на данном интервале выделен один коллектор №9, состоящий из 7 пластов. Общая мощность коллектора №9 составляет 18,1 метра. Приток газа  $Q_g$  до 23,8 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 138,5 кгс/см<sup>2</sup>; коэффициент проницаемости

$\frac{kh}{\mu}$  - 0,24 Дсм/спз;

Практически «сухой» интервал (зона) 1320,0 – 1390,0 м (абс. отм. (-920,3 м) – (-990,3 м) представлен глинисто-сульфатно-карбонатной толщей. По данным ГИС на данном интервале выделено три коллектора №№ 10, 11 и 12, общей мощностью порядка 46 м. Приток газа составляет  $Q_g$  до 0,8 м<sup>3</sup>/сут; расчётным пластовым давлением  $P_{пл.}$  – 30,0 кгс/см<sup>2</sup>. (по причине получения нулевых значений на описываемом интервале во время исследований по

вертикальному гидрогеологическому стволу скважины №307, данные по давлению и притоку флюидов приведены для коррелируемой (аналогичной) зоне, выделенной по скважине №306)

Газо-водонасыщенная зона 1390,0- 1442,5 (абс. отм. (-990,3 м) – (-1042,8)) сложена карбонатными и глинисто-карбонатными толщами, с редкими выпотами нефти. По данным ГИС на данном интервале выделено три коллектора №№ 13, 14 и 15, общей мощностью порядка 19,5 м. Приток газа  $Q_g$  до 48,0 м<sup>3</sup>/сут; пластовое давление  $P_{пл.}$  – 157,4 кгс/см<sup>2</sup>; коэффициент проницаемости  $\frac{kh}{\mu}$  - 3,12 Дсм/спз.

Изучение газоносности и газообильности пород толбачанской свиты в интервале залегания коллекторов №№ 2-15 производилось и по сети скважин, пробуренных из подземных горных выработок горизонта -790 рудника «Интернациональный», поскольку проведение разведочных работ в отм. (-830) – (-1050) потребовало проходки опережающих дегазационных скважин (рис. 3.5).

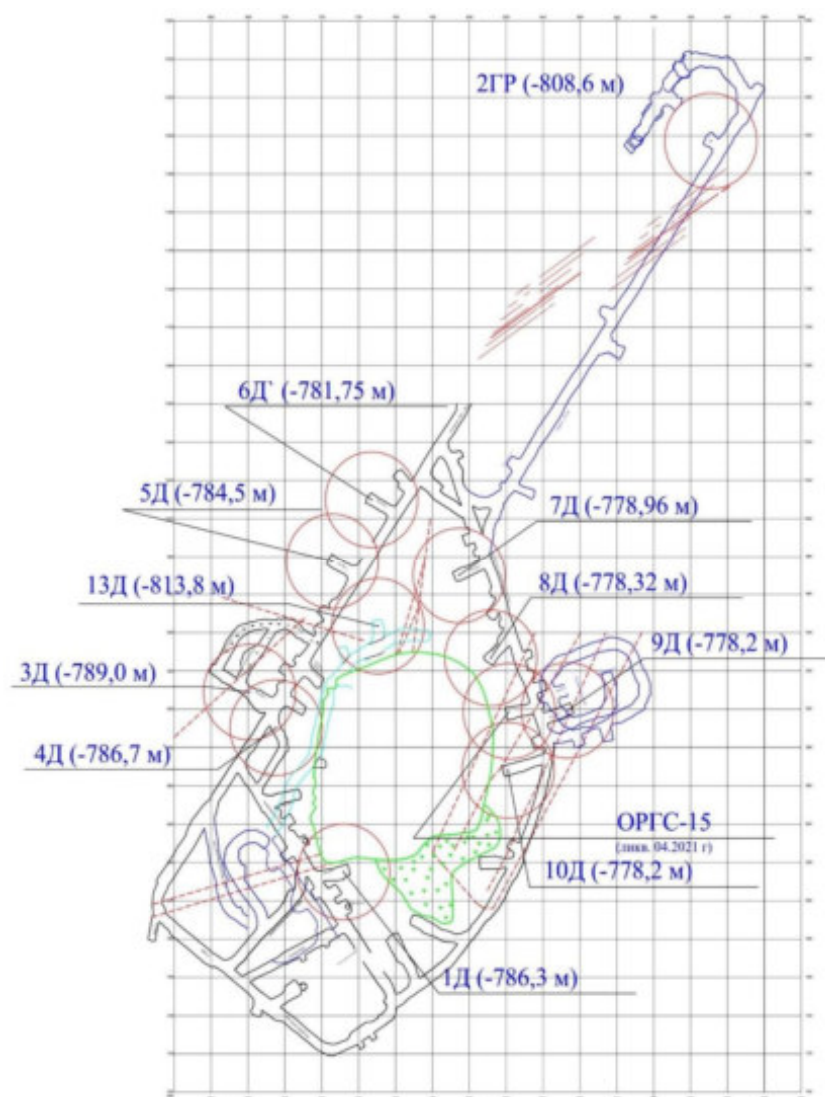


Рис. 3.5. Плановое расположение дегазационных скважин относительно системы подземных горных выработок гор. -790 м (сост. Янников А.М.)

На этих скважинах был произведён ряд гидрогеологических наблюдений, необходимых для уточнения газоносности вмещающих пород. Необходимость данных работ была обусловлена литолого-фациальными особенностями пород-коллекторов толбачанской свиты, а именно, тем, что формирование структурных газовых ловушек в коллекторах толбачанской свиты не происходит. И находящийся в породах газ (как правило, углеводородного состава), сопряжён с неструктурными залежами и пропластками, имеющими не только спорадическое, но и площадное распространение (в масштабах выработок рудника).

Анализ изменения дебитов (расходов) по вновь пробуренным разведочным и геомеханической скважинам в целом согласуется с описанными выше структурными, тектоническими и литолого-фациальными особенностями коллекторов толбачанской свиты. По этим скважинам наблюдалось довольно быстрое падение дебита истечения пластовых газов, по причине малых запасов, находящихся во вскрываемых неструктурных литологически и структурно экранированных залежах и ловушках. На дегазационных скважинах максимальные, пиковые значения наблюдались в течение двух-трёх суток (максимум до недели), затем шло резкое уменьшение дебита, в след за которым наблюдалась стагнация дебита, с небольшими «всплесками» газовыделения. В целом изменение дебита во времени по данным скважинам имеет снижающийся тренд. Такие особенности газовыделения данных скважин связаны с тем, что во время проходки и первое время после достижения забоя проектной отметки происходит срабатывание естественных запасов пристволовой и призабойных зон, относящихся к трудно извлекаемым, иммобилизованным, запасам, а их объёмное значение крайне мало. После их сработки, вовлекаются уже выдержанные по площади коллектора, характеризующиеся несколько отличными газодинамическими параметрами [75; 147; 361].

О площадном распространении (в рамках масштаба объекта исследований) неструктурных ловушек-залежей свидетельствует стагнация дебита в течение всего времени наблюдения. Но при этом необходимо уточнить, что распространение и наличие неструктурных газовых, водно-газовых и нефте-водно-газовых ловушек и залежей в трещиноватых карбонатных породах толбачанской свиты в локальном плане трудно оценимо, в виду того, что площадное распространение основного показателя трещиноватости, (т.к. породы толбачанской свиты малопористые и слабо кавернозные) крайне неоднородно не только по простиранию, но и по глубине (что подтверждается результатами, полученными на дегазационных скважинах).

Формирование таких микро-залежей происходит при совпадении сразу нескольких факторов (структурного, литологического и тектонического), иммобилизующих некоторое количество пластовых газов. Такие газовые ловушки характеризуются крайне малыми объёмами запасов пластовых газов, находящимися под высоким пластовым давлением. Динамика

изменения истечения пластовых газов из коллекторов толбачанской свиты приведена в приложении 6 [358; 360; 364; 368; 400].

С самого начала строительства системы опережающей дегазации массива в 2013–2014 гг. и по настоящее время геолого-гидрогеологическое сопровождение и последующие режимные наблюдения выполняются силами гидрогеологической службы Мирнинской (до 2017 г.), а в последующем Вилуйской экспедиций. До 2018 г. включительно наблюдения производились непосредственно автором в условиях подземных горных выработок рудника Интернациональный. В последующем при методическом руководстве и контроле. Объём проведенных работ приведен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Объём проведенных режимных наблюдений<sup>19</sup>

Вид работ	Ед. изм.	год							
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Режимные мониторинговые замеры пластовых газов	шт.	5660	5845	5820	505	649	435	274	
Режимные мониторинговые замеры пластовых вод	шт.	636	220	462	259	263	125	55	
Режимные замеры динамики роста пластового давления в стволах скважин	шт.	43	-	-	-	-	-	-	
Отбор проб для гидрохимических наблюдений	шт.	43	96	96	101	98	24	25	
Проверка технического состояния скважин	скв	25	28	23	12	14	-	12	

Всего за 8 лет наблюдений было выполнено более 19 тыс. замеров пластовых газов, более 2 тыс. замеров природных рассолов, отобрано 483 пробы природных рассолов и газов. Динамика изменения объёмов пластовых газов, выпущенных из коллекторов толбачанской свиты, приведена в таблице 3.10.

Отложения эльганской свиты в пределах вмещающих пород трубки «Интернациональная» вскрыты на полную мощность скв. №307. По результатам скважинной геофизики в отложениях выделяется три пласта-коллектора. Данные по выделенным коллекторам приведены на рисунке 3.6.

Газонасыщенный коллектор №1 по скв. №307 отмечается в интервале 1453,3–1469,3 м (абс. отм. (-1053,6) – (-1069,3) м). Эффективная мощность коллектора составляет 16,0 м.

<sup>19</sup> Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Таблица 3.10 – Объем пластовых газов, выпущенных из коллекторов толбачанской свиты (по [393] с дополнениями)

Год	Количество скважин, подключенных к участковому дегазационному ставу (участвующих в дегазации горного массива), шт	Средний дебит по одной скважине (в разрезе года), м <sup>3</sup> /час	Объем пластовых газов, выпущенных из горного массива за год, м <sup>3</sup>
1	2	3	4
2014	7	12,67	777 039.96
2015	21	3,13	575 874.51
2016	24	2,48	521 500.56
2017	24	1,06	223 801.56
2018	12	1,44	151 372,80
2019	14	2,09	256 317,60
2020	13	1,50	170 820,00
2021	11	0,65	62 634,00

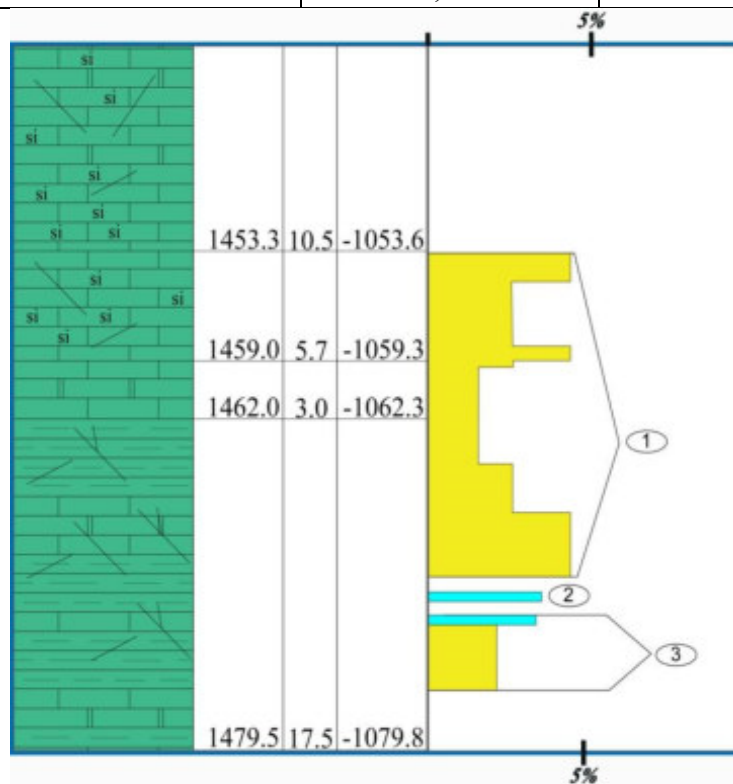


Рис. 3.6. Коллекторы эльгянской свиты [393]

Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 7,8 до 8,1 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный. Водонасыщенный коллектор **№2** отмечается в интервале 1471,2–1471,7 м (абс. отм. (-1071,5) – (-1072,0) м). Эффективная мощность коллектора составляет 0,5 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 4,6 до 6,3 %. Тип пористости трещинно-кавернозный.

Газо-водонасыщенный коллектор **№3** отмечается в интервале 1472,4–1476,4 м (абс. отм. (-1072,7) – (-1076,7) м). Эффективная мощность коллектора составляет 4,0 м. Средний

коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 4,5 до 6,0 %. Тип пористости трещинно-кавернозный [367].

Породы эльганской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №307 был выделен один газонасыщенный коллектор (№1) и один газо-водонасыщенный (№3). Общая мощность коллекторов составила 20,0 м. Приток газа  $Q_{г}$  до 0,72 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 172,8 кгс/см<sup>2</sup> [367].

Необходимо отметить, что наблюдаемое пластовое давление 172,8 кгс/см<sup>2</sup>, сложно объяснить только лишь наличием высоконапорных пластовых вод в коллекторах №2 и №3, так как водонасыщенные интервалы не только крайне маломощны (их суммарная мощность составляет всего один метр) и крайне малодобитные, но и характеризуются низкими коэффициентами проницаемости и проводимости.

По этой причине подобное пластовое давление в данных условиях можно охарактеризовать как аномально высокое – превышает нормальное гидростатическое давление для заданных отметок в 1,2 раза. В данных условиях наличие такого пластового давления свидетельствует в пользу изолированности системы выделенных коллекторов эльганской свиты.

Основными причинами возникновения данной аномалии по всей видимости являются процессы осмоса и катагенетические преобразования газо- и водонасыщенных пород [107; 108; 266-275]. Так или иначе, причины возникновения данного пластового давления в отметках залегания эльганской свиты несомненно требуют дополнительного отдельного рассмотрения и непосредственного доизучения. Также этот фактор необходимо учитывать для безопасной отработки месторождения в заданных отметках.

Как уже было отмечено в главе 2, породы рассмотренных свит, по причине их высокой соленасыщенности и наличие мощных водо- и газоупорных пачек галогенных (каменная соль) и терригенных (аргиллит) отложений суммарной мощностью от 20,0 м. до 45,0 м. необходимо рассматривать как исключительно слабопроницаемые породы [264]. По результатам ГИС в толщах пород нелбинской и юрегинской свит было выявлено несколько маломощных слабогазонасыщенных пластов-пропластков, приуроченных к внутриформационным прослоям карбонатных (доломиты) и терригенно-карбонатных (песчаники) разностей отложений данных свит.

В отложениях нелбинской свиты выделяется два слабогазонасыщенных коллектора (рис. 3.7). Коллектор №1 по стволу скв. №307 отмечается в интервале 1488,0 (абс. отм. -1088,3 м) – 1496,0 (абс. отм. -1096,3 м). Коллектор состоит из двух пластов мощностью по два метра каждый. Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №1 составляет 4,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,0 до 5,7 %. Тип пористости кавернозно- межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №2 выделяется в интервале 1518,5 (абс. отм. -1118,8 м) – 1519,0 (абс. отм. -1119,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №2 составляет 0,5 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,5 до 3,1 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

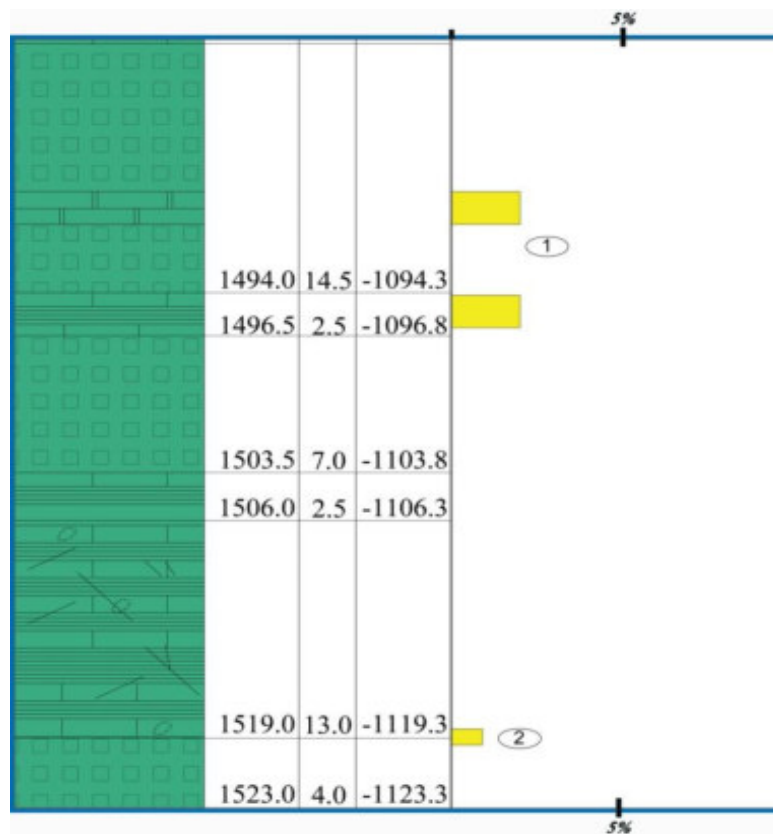


Рис. 3.7. Коллекторы нелбинской свиты [393]

Породы нелбинской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №307 было выделено два слабогазонасыщенных коллектора (№1 и №2). Общая мощность коллекторов составила 4,5 м. Приток газа  $Q_{г}$  до  $0,72 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  –  $75,2 \text{ кгс}/\text{см}^2$ .

Зафиксированное пластовое давление  $75,2 \text{ кгс}/\text{см}^2$  ниже расчётного гидростатического ( $149,0\text{-}150,0 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ) в 1,5 раза. Что в свою очередь позволяет охарактеризовать коллекторы нелбинской свиты как коллекторы с аномально низким пластовым давлением. Данное явление объясняется соотношением свободного трещинно-порового пространства в газонасыщенных породах нелбинской свиты и объёмом содержащихся в них флюидов. Наличие такого пластового давления позволяет рассматривать внутриформационные коллекторы нелбинской свиты как элизионную систему. Т.е. пространственно-обособленную систему с внутренними источниками формирования напоров.

В отложениях юрегинской свиты выделяется семь слабогазонасыщенных коллекторов (рис. 3.8).

Коллектор №3 по стволу скв. №307 отмечается в интервале 1536,0 (абс. отм. -1136,3м) – 1545,5 (абс. отм. -1145,8м). Коллектор состоит из трёх пластов. Мощность пласта 3.1 составляет 0,5 м; пласта 3.2 – 0,7 м; пласта 3.3 – 0,5 м. Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №3 составляет 1,7 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,2 до 3,6 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

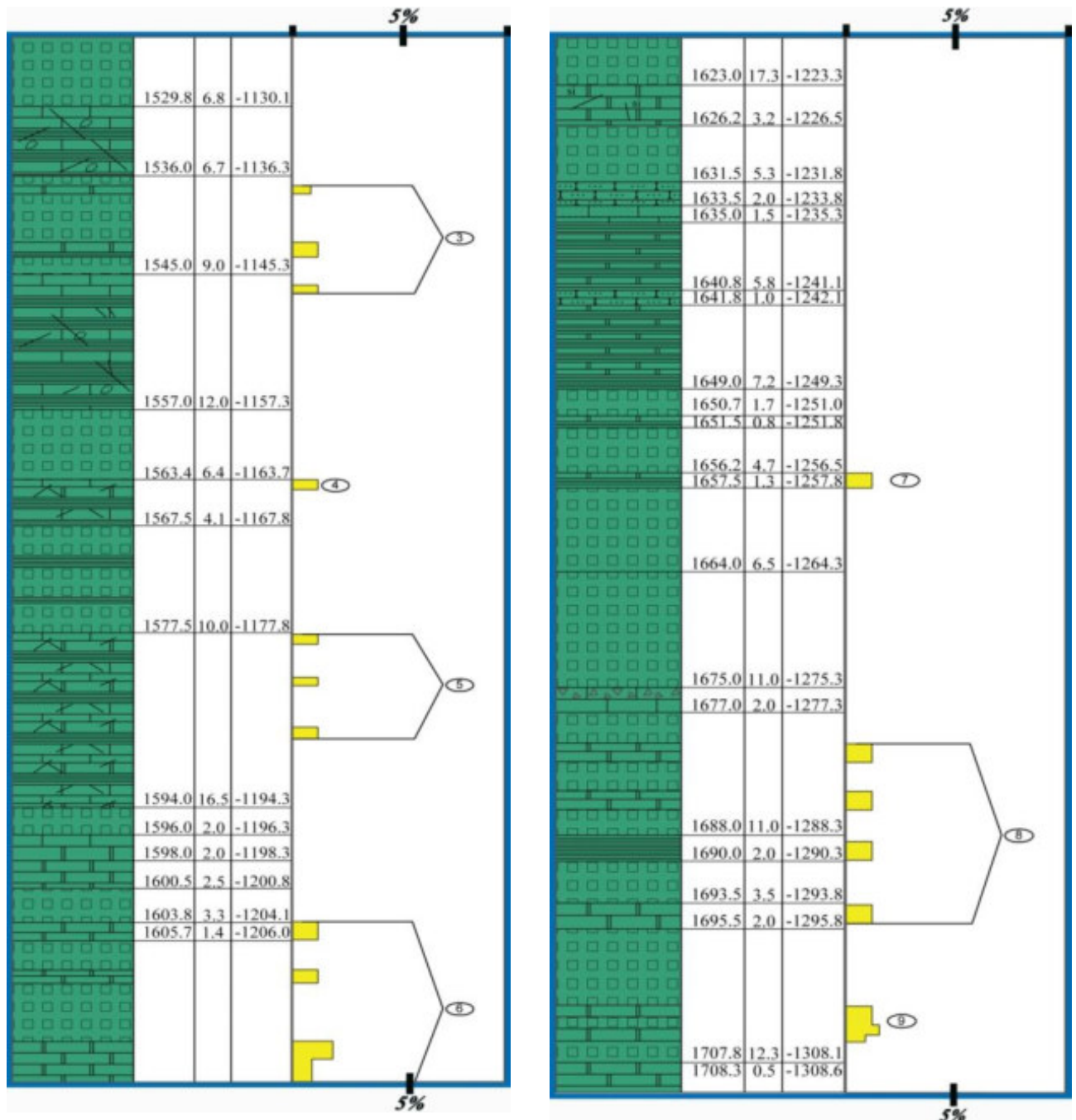


Рис. 3.8. Коллекторы нелбинской свиты [393]

Коллектор №4 выделяется в интервале 1562,5 (абс. отм. -1162,8м) – 1563,1 (абс. отм. - 1163,4 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №4 составляет 0,6 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,7 до 3,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №5 выделяется в интервале 1576,0 (абс. отм. -1176,3 м) – 1584,5 (абс. отм. - 1184,8 м). Коллектор состоит из трёх пластов. Мощность пласта 5.1 составляет 0,5 м; пласта 5.2 – 0,5 м; пласта 5.3 – 1,0 м. Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №5 составляет 2,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,2 до 3,9 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №6 выделяется в интервале 1601,0 (абс. отм. -1201,3 м) – 1617,0 (абс. отм. - 1217,3 м). Коллектор состоит из трёх пластов. Мощность пласта 6.1 составляет 1,5 м; пласта 6.2 – 1,0 м; пласта 6.3 – 4,0 м. Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №6 составляет 6,5 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,0 до 4,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №7 выделяется в интервале 1656,2 (абс. отм. -1256,5 м) – 1657,2 (абс. отм. - 1257,5 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №7 составляет 1,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,1 до 3,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №8 по стволу скв. №307 отмечается в интервале 1679,5 (абс. отм. -1279,8 м) – 1695,0 (абс. отм. -1295,3 м). Коллектор состоит из четырёх пластов. Мощность пласта 8.1 составляет 1,5 м; пласта 8.2 – 1,5 м; пласта 8.3 – 1,5 м; пласта 8.4 – 1,5 м. Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №8 составляет 6,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,1 до 3,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №9 выделяется в интервале 1702,0 (абс. отм. -1302,3м) – 1705,0 (абс. отм. - 1305,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №9 составляет 3,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 2,4 до 3,5 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Породы юрегинской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №307 было выделено семь слабогазонасыщенных коллекторов (№№ 3, 4, 5, 6, 7, 8 и 9). Общая мощность коллекторов составила 20,8 м.

По величине зафиксированного пластового давления породы юрегинской свиты можно разделить на три зоны:

- зона аномально низкого пластового давления в интервале 1523,0–1550,0м (абс. отм. (- 1123,3м) – (-1150,3м). Сложена преимущественно галогенными породами (соленасыщенность

составляет 58,5%), с подчинёнными прослоями и пропластками карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит) отложений. По данным ГИС на данном интервале выделен один маломощный пласт-коллектор №3 мощностью 1,7 м. Данный коллектор был опробован совместно с коллекторами №1 и №2 нелбинской свиты. Приток флюида в открытом периоде при снятии давления  $Q$  до  $0,72 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; пластовое давление  $P \text{ пл.} - 75,2 \text{ кгс/см}^2$ . Зафиксированное пластовое давление  $75,2 \text{ кгс/см}^2$  ниже расчётного гидростатического ( $149,0-150,0 \text{ кгс/см}^2$ ) в 1,5 раза. Что, в свою очередь, позволяет охарактеризовать данную зону юрегинской свиты как зону с аномально низким пластовым давлением;

- зона аномально высокого пластового давления в интервале 1550,0–1652,0м (абс. отм. (-1150,3м) – (-1252,3м). Сложена переслаиванием галогенных (соленасыщенность составляет 45%), карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит, т/з песчаник) отложений. По данным ГИС на данном интервале выделено три коллектора №№ 4, 5 и 6, суммарной мощностью 9,1 м. Эти коллекторы по стволу скв. №307 были опробованы двумя постановками пластоиспытателя КИИ-65. Приток флюида в открытом периоде при снятии давления  $Q$  до  $9,12 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; максимальное зафиксированное пластовое давление составило  $P \text{ пл.} - 198,7 \text{ кгс/см}^2$ . Зафиксированное пластовое давление  $198,7 \text{ кгс/см}^2$  выше расчётного (нормального) гидростатического ( $155,0-160,0 \text{ кгс/см}^2$ ) в 1,3 раза, что позволяет охарактеризовать выделенные коллекторы юрегинской свиты как коллекторы с аномально высоким пластовым давлением;

- зона нормального пластового давления в интервале 1652,0–1708,3м (абс. отм. (-1252,3м) – (-1308,6м). Сложена преимущественно галогенными породами (соленасыщенность составляет 84,0 %), с подчинёнными прослоями и пропластками карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит) отложений. По данным ГИС на данном интервале выделено три коллектора №№ 7, 8 и 9 суммарной мощностью 10,0 м. Приток флюида в открытом периоде при снятии давления  $Q$  до  $1,44 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; максимальное зафиксированное пластовое давление составило  $P \text{ пл.} - 152,3 \text{ кгс/см}^2$ . Зафиксированное пластовое давление  $152,3 \text{ кгс/см}^2$  несколько ниже расчётного (нормального) гидростатического давления, составляющего в данных условиях порядка  $165,0-170,0 \text{ кгс/см}^2$  (в 1,1 раза), что позволяет охарактеризовать выделенные коллекторы юрегинской свиты как коллекторы с нормальным пластовым давлением, в целом соответствующем расчётному гидростатическому.

Зоны аномально высокого и аномально низкого пластового давления, выявленные в отложениях юрегинской свиты, позволяют говорить о существенной иммобилизации флюидов, содержащихся в выделенных внутрiformационных коллекторах. В подобной ситуации можно говорить о выделении в отложениях юрегинской свиты не просто трёх зон, а трёх элизионных систем. Наличие таких перепадов пластовых давлений свидетельствует о высокой степени изолированности сформированных зон, как от внешних факторов, так и от друг друга. Появление

данных зон (аномально высокого и аномально низкого давлений) связано с несоответствием объемов флюидов объему пустотного пространства в горных породах, возникшее, как по причине неравновесного уплотнения пород, слагающих коллекторы юрегинской свиты (катагенетические изменения), так и из-за различных коэффициентов объёмного расширения пород, слагающих юрегинскую свиту [423]. Также в качестве дополнительных факторов могли послужить [113; 135; 266; 340]:

1. преобразование глинистых минералов на стадии катагенеза (в юрегинской свите отмечаются толщи аргиллитов);
2. процессы дегидратации гипса, с последующим превращением в ангидрит;
3. деполимеризация содержащегося в породах органического вещества;
4. геодинамические процессы, связанные с постседиментационным внедрением магматических тел в пределах изучаемого района.

Необходимо отметить, что причины возникновения выявленных аномалий пластового давления в отметках залегания нелбинской и юрегинской свит, несомненно, требуют дополнительного рассмотрения и непосредственного доизучения. Также данный фактор необходимо учитывать для безопасной отработки месторождения в заданных отметках.

Дополнительным источником углеводородных газов является дегазация нефти и мальт, также содержащихся в коллекторах толбачанской свиты [315; 355]. Характер нефтебитумопроявлений изучался в процессе ведения геологической документации по опытным скважинам. По результатам документации выделено два состояния в условиях дневной поверхности: – твёрдые битумы (рис 3.9); –нефти, насыщающие породы по трещинам, порам и кавернам (рис 3.10 и 3.11).



Рис. 3.9. Примазки твёрдого битума в доломитах толбачанской свиты (фото А. М. Янникова)

В лаборатории геохимии каустобиолитов ИПНГ СО РАН были проанализированы пробы керна по разрезу в интервале глубин от 902 до 1635 м. В основу геохимических исследований битуминозной составляющей пород положены аналитические методы, разработанные во ВНИГНИ, ВНИГРИ, СНИИГГМС и других организациях [254; 303].



Рис. 3.10. Выпоты нефти по доломитам толбачанской свиты. Каплевидные выделения по трещинам и кавернам (фото А. М. Янникова)



Рис. 3.11. Выпоты нефти по доломитам толбачанской свиты. Каплевидные выделения по трещинам и кавернам. Примазки твёрдых битумов (фото А. М. Янникова)

По результатам проведенных исследований установлено, что все каустобиолиты достаточно однотипны по всему разрезу. В структурно-групповом составе битумоидов преобладают соединения с длинными метиленовыми цепями (полосы поглощения 720, 1378,

1465 см<sup>-1</sup>), что указывает на преобладание в составе ХБ насыщенных углеводородов – метановых и нафтеновых [98]. Содержание ароматических циклов невелико, о чем свидетельствует низкое поглощение при 1600 см<sup>-1</sup> и нечетко выраженные полосы в области 750-900 см<sup>-1</sup>. Полоса в области 1710-1730 см<sup>-1</sup> указывает на присутствие карбонильных групп. Невысокая интенсивность данной полосы может свидетельствовать о небольшой степени окисленности битумоидов. Как видно из рис. 3.9-3.11 наибольшие различия в структурно-групповом составе ХБ связаны с содержанием карбонильных групп по изменению интенсивности полосы поглощения - 1710-1730 см<sup>-1</sup>. Это может быть связано как с различным соотношением в составе ХБ масел и асфальтово-смолистых компонентов, так и разной степенью окисленности самих смолистых компонентов. В данной коллекции прослеживается первая тенденция к увеличению роли кислородных соединений в пробах с содержанием смол.

Таким образом, полученные результаты по керновому материалу из пород трубки «Интернациональная» в интервале изучения можно сделать следующие выводы:

- Установлен неравномерный характер битумонасыщения пород по разрезу скважины.
- В исследованном интервале глубин зафиксирован максимум с очень высоким битумонасыщением в интервале от 1233 м до 1269 м.
- Изученные битумопроявления носят вторичный характер по отношению к вмещающим породам.
- По особенностям группового компонентного состава изученные битумы относятся к классу мальт, т.е. трещины, поры и каверны в породах выполнены легкоподвижными разностями битумов – нефтью и близкими ей по свойствам мальтами.

Данные ИК-спектроскопии по химической структуре битумоидов показали их однотипность по всему разрезу скважины. Установлено преобладание в их составе алифатических структур над ароматическими циклами.

#### *Углеводородные газы в отложениях в пределах шахтного поля трубки Мир*

Отложения чарской свиты вскрыты на полную мощность. Выделенные в результате ГИС коллекторы, приведены на рис. 3.12. В пределах чарской свиты зафиксировано две зоны насыщения углеводородными газами.

Зона №1 выделяется в интервале 543,8-615,0 м (абс. отм. -205,1/-276,9 м). Приурочена к кровельной части свиты. Пластовое давление в пределах зоны изменяется от 3 до 5 кгс/см<sup>2</sup>, включает коллекторы №1а и №1. Эффективная мощность коллекторов 39,5 м. Средний коэффициент общей пористости 2,2-17,0%. Коллекторы приурочены к трещиноватым доломитам пятого и четвертого ритмов осадконакопления, а также к нижней зоне эндоконтакта силла. Для

коллектора №1а в качестве «покрышки» выступает сил долеритов. Для коллектора №1 упорными породами выступает пачка каменных солей.

Зона №2 выделяется в интервале 740,4-776,2 м (абс. отм. -401,7/-437,5 м). В качестве «покрышки» выступает пачка галогенных пород. Пластовое давление в пределах зоны изменяется от 25 до 30 кгс/см<sup>2</sup>. Зона состоит из коллектора №4 с эффективной мощностью 36,0 м. Средний коэффициент общей пористости 1,5-18,0%. Коллектор приурочен к трещиноватым доломитам второго ритма осадконакопления.

При отработке месторождения подземными горными выработками на отм. -327 м, опережающими скважинами, на контакте с кимберлитовым телом, также вскрывались углеводородные пластовые газы метанового состава (98%). Истечение газов ламинарное. Замеренный расход при вскрытии составил 0,64-1,1 м<sup>3</sup>/час. Из-за невысокой пористости, а также низкой проницаемости пород в чарской свите, в пределах шахтного поля трубки Мир, исключены крупные скопления углеводородных газов, что в очередной раз было подтверждено тем фактом, что зафиксированные на момент вскрытия расходы по опережающим разведочным скважинам уменьшились до нуля на третьи и пятые сутки, соответственно.

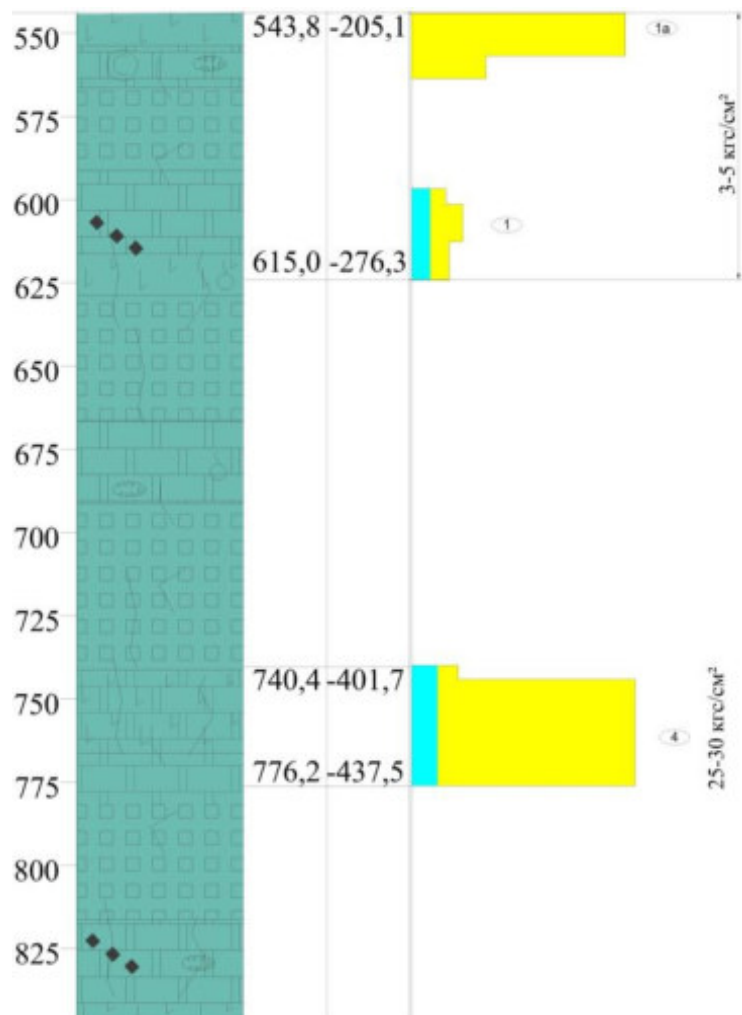


Рис. 3.12. Газонасыщенные внутриформационные коллекторы чарской свиты [393]

Суммарная мощность всех газонасыщенных коллекторов и коллекторов смешанного насыщения, в пределах чарской свиты составляет 75,5 м. Учитывая мощность рассолонасыщенных коллекторов №2 и №3, общая мощность составляет 85,1 м, что, в свою очередь, составляет 28% от общей мощности чарской свиты.

Выделенные газонасыщенные коллекторы *олекминской свиты*, приведены на рис. 3.13.

В пределах изучаемого участка олекминская свита по ряду признаков (гидродинамическому, газодинамическому, литологическому и т.д.) разделена на 3 зоны, коррелирующие с выделенными зонами в пределах шахтного поля трубки Интернациональная [191; 357]. Отличительной особенностью участка является смешанная рассоло-газовая насыщенность всех 6 коллекторов олекминской свиты.

1. Зона №1 выделяется в интервале 861,2-933,1 м (абс. отм. -522,5/-594,4 м), характеризуется наименьшим пластовым давлением – 40-50 кгс/см<sup>2</sup> и включает коллекторы №1 и №2. Эффективная мощность их 70,0 м. Средний коэффициент общей пористости 2,5-13,2%. Несмотря на низкую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне возможно накопление микрозалежей пластовых газов, обусловленное наличием открытой трещиноватости, но потенциал накопления не настолько высок, как у ниже залегающей толбачанской свиты, поскольку в олекминской свите отсутствуют галогенные породы, способствующие накоплению УГВ [384; 399].

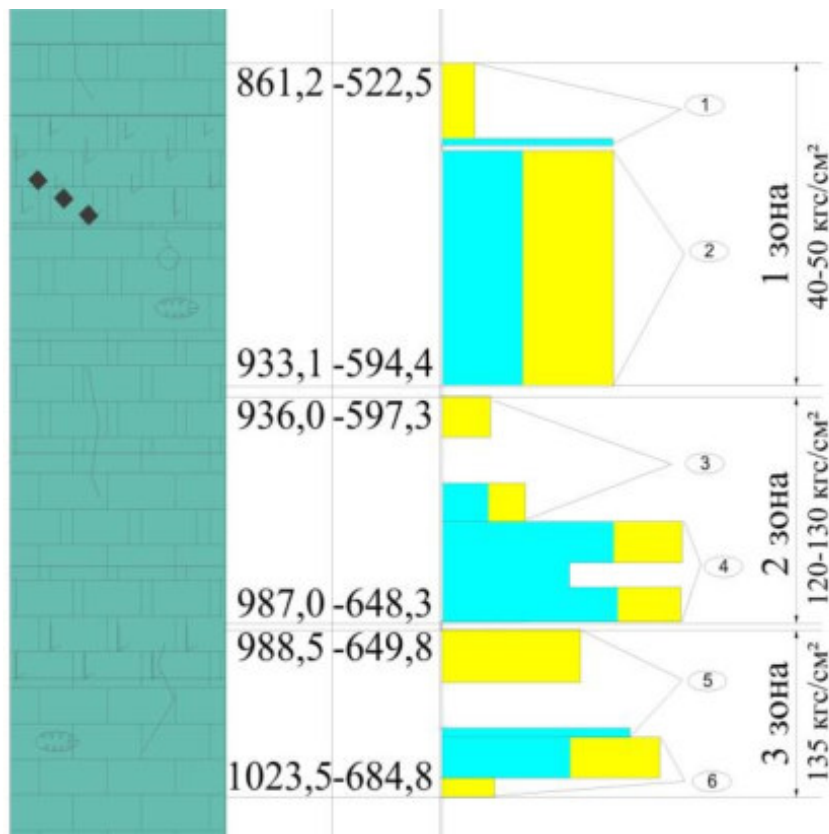


Рис. 3.13. Газонасыщенные коллекторы олекминской свиты [393]

2. Зона №2 выделяется в интервале 936,0-987,0 м (абс. отм. -597,3/-648,3 м). Пластовое давление в ее пределах изменяется от 120 до 130 кгс/см<sup>2</sup>. Зона включает коллекторы №3 и №4. Эффективная мощность их – 40,5 м. Средний коэффициент общей пористости 3,2-19,8 %.

3. Зона №3 выделена в интервале 988,5-1023,5 м (абс. отм. -649,8/-684,8 м). Пластовое давление в ее пределах составляет 135 кгс/см<sup>2</sup>. Зона включает коллекторы № 5 и 6. Эффективная мощность этих коллекторов 24,9 м. Средний коэффициент общей пористости 5,2-19,6 %. Данная зона является более газо- и водообильной, чем предыдущие зоны №1 и №2.

Все коллекторы олекминской свиты в пределах участка имеют смешанное насыщение. Общая мощность коллекторов данной свиты составляет 135,4 м, или 73% от общей мощности свиты. Данный факт указывает на то, что при проходке подземных горных выработок в интервале олекминской свиты, потребуется общая опережающая дегазация, поскольку суммарный % проницаемых пород-коллекторов достаточно высок, и выделение отдельных зон нецелесообразно

Отложения толбачанской свиты вскрыты на полную мощность скв. № 309. По результатам скважинной геофизики в пределах шахтного поля трубки Мир, выделяется 6 газонасыщенных коллекторов и 11 газо-водонасыщенных (рис 3.14).

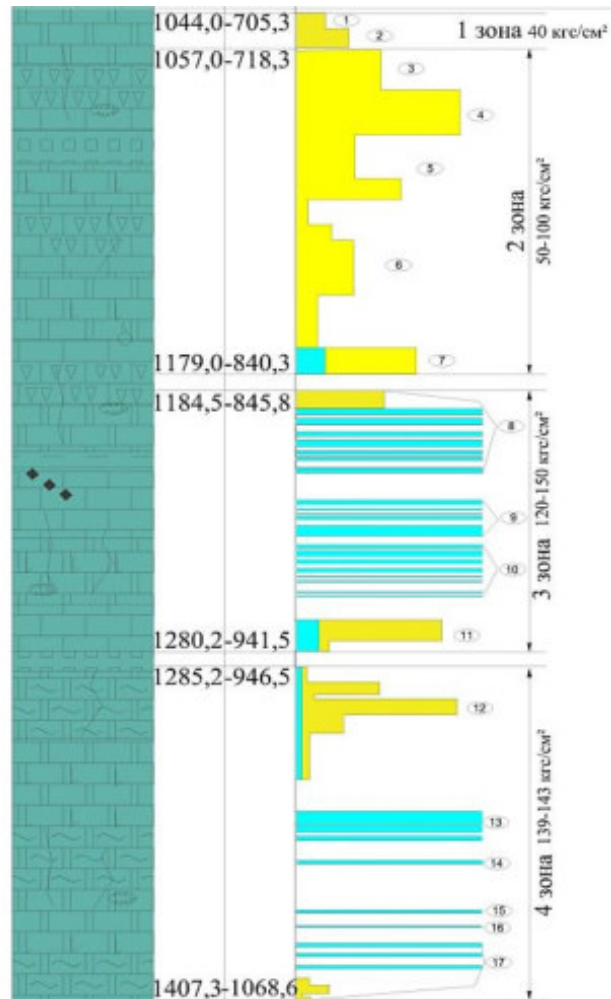


Рис. 3.14. Коллекторы толбачанской свиты [393]

Изменение общей газонасыщенности пород толбачанской свиты от глубины, по результатам газового каротажа приведено на рис. 3.15.

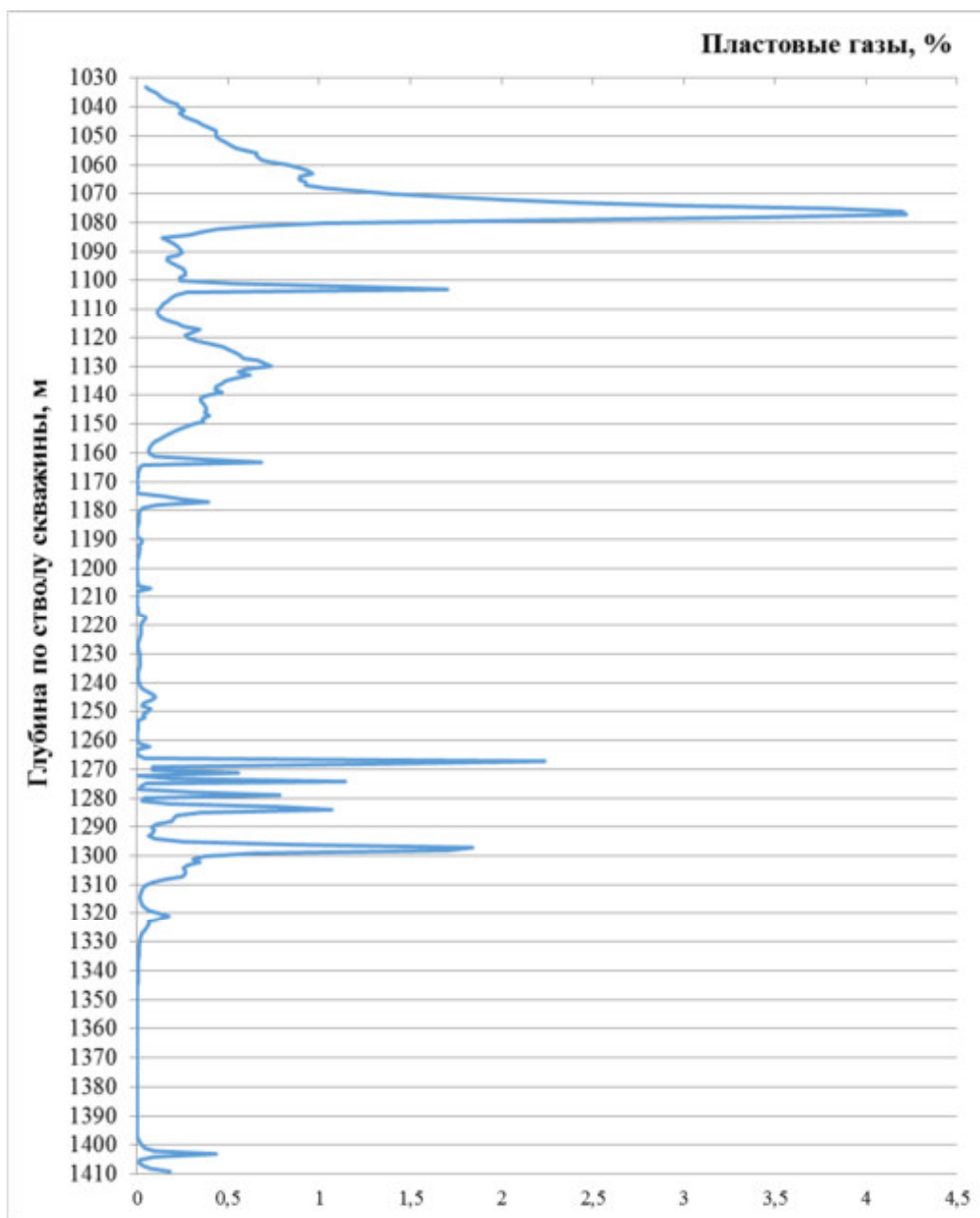


Рис. 3.15. Газонасыщенность толбачанской свиты [393]

При анализе графика, обращает на себя внимание неравномерное газонасыщение разреза, что, в свою очередь, для обеспечения необходимой детальности исследований требует выделение зональности в разрезе. Характеристику выделенных зон коллекторов приведём по каждой зоне отдельно:

1. Зона №1 выделяется в интервале 1044-1057 м (абс. отм. -705,3/-718,3 м) характеризуется наименьшим пластовым давлением – 40 кгс/см<sup>2</sup>, включает коллекторы №1 и №2. Эффективная мощность этих коллекторов 13,0 м. Средний коэффициент общей пористости 2,5-3,4 %. Несмотря на низкую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне

возможно накопление микрозалежей пластовых газов, обусловленное наличием открытой трещиноватости.

2. Зона №2 выделяется в интервале 1057-1179 м (абс. отм. -718,3/-840,3 м). Пластовое давление в пределах зоны изменяется от 50 до 120 кгс/см<sup>2</sup>, причём наиболее напорным является коллектор №7, который имеет смешанную рассольно-газовую насыщенность. Зона включает коллекторы №№ 3, 4, 5, 6 и 7. Эффективная мощность этих коллекторов 122,0 м. Средний коэффициент общей пористости 2,2-19,0 %. Несмотря на невысокую пористость в зонах динамического влияния тектонических нарушений, в данной зоне также возможно формирование «дополнительной ёмкости», и, как следствие, объёмов пластового газа и природного насыщенного рассола. Данное замечание справедливо и для последующих зон.

3. Зона №3 выделена в интервале 1184,5-1280,2 м (абс. отм. -845,8/-941,5 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 120-150 кгс/см<sup>2</sup>. Зона включает коллекторы №№ 8, 9, 10, и 11. Эффективная мощность этих коллекторов 60,1 м. Средний коэффициент общей пористости 10-22 %. Данная зона является более газо- и водообильной, чем предыдущие зоны №1 и №2. Отличительной особенностью отложений толбачанской свиты в пределах околотрубочного пространства месторождения Мир, по сравнению с «Интернациональной» является отсутствие «сухих» коллекторов. Коллекторы №10 и №11 имеют смешанный тип насыщения, и пластовое давление, превышающее коллекторы аналоги (на трубке «Интернациональная») в 4 раза.

4. Зона №4 выделена в интервале 1285,2-1407,3 м (абс. отм. -946,5/-1068,6 м). Пластовое давление в пределах зоны составляет 139-143 кгс/см<sup>2</sup>. Она включает коллекторы №№ 12, 13, 14, 15, 16 и 17, эффективная мощность которых 45,2 м. Средний коэффициент общей пористости 6-28 %. Газонасыщенность данной зоны сопоставима с зоной №3, водонасыщенность выше на 20-30%.

Выделение четырех зон с различным пластовым давлением, изменение которого не обусловлено глубиной залегания коллекторов, подтверждает правильность выделения в пределах толбачанской свиты именно водоносного комплекса, так как изучаемый объект обладает всеми необходимыми качественными и количественными характеристиками. Это подтверждается опытными скважинами, пробуренными в районе исследований в пределах шахтных полей.

Общая мощность коллекторов составляет 240,3 м или 64 % от общей мощности свиты. Данный факт указывает на то, что при проходке подземных горных выработок в интервале толбачанской свиты, потребуются общая опережающая дегазация всех карбонатных пород, особенно в толщах, залегающих под галогенными отложениями, поскольку суммарный % проницаемых пород-коллекторов достаточно высок, и выделение отдельных зон нецелесообразно. Отдельно необходимо отметить, что толбачанский водоносный комплекс будет

основным гидрогеологическим объектом, осложняющим горнотехнические условия отработки кимберлитовой трубки Мир в отм. -694,3/-1070,1 м [359; 394; 403].

Отложения эльганской свиты в пределах шахтного поля трубки «Мир» вскрыты на полную мощность скв. №309. По результатам скважинной геофизики в отложениях выделяется три пласта-коллектора (рис. 3.16).

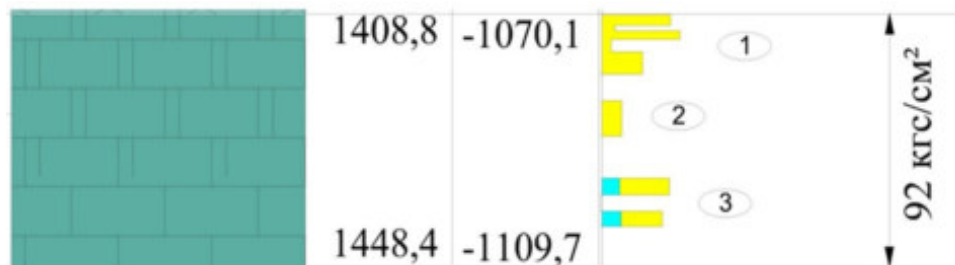


Рис. 3.16. Коллекторы эльганской свиты [393]

Газонасыщенный коллектор №1 по скв. №309 отмечается в интервале 1408,8 (абс. отм. -1070,1м) – 1418,0 (абс. отм. -10679,3м). Эффективная мощность коллектора – 9,2 м. Средний коэффициент общей пористости по результатам ГИС – 2,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Газонасыщенный коллектор №2 отмечается в интервале 1423,0 (абс. отм. -1084,3м) – 1427,5 (абс. отм. -1088,8). Эффективная мощность коллектора – 4,5 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 3,6%. Тип пористости трещинно-кавернозный.

Газо-водонасыщенный коллектор №3 отмечается в интервале 1435,0 (абс. отм. -1096,3м) – 1441,0 (абс. отм. -1102,3 м). Эффективная мощность коллектора составляет 4,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, от 3,6 до 4,2%. Тип пористости трещинно-кавернозный.

Породы эльганской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №309 выделены два газонасыщенных коллектора (№1 и №2) и один газо-водонасыщенный (№3). Общая мощность коллекторов составила 16,2 м. Приток газа  $Q_g$  до 2,5 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 92,0 кгс/см<sup>2</sup>.

Отличительной особенностью коллекторов эльганской свиты в пределах изучаемого участка является аномально низкое пластовое давление. В пределах шахтного поля трубки Интернациональная, пластовое давление наоборот превышает нормальное в 1,2 раза. Данный факт дополнительно подчеркивает ключевое влияние тектонических нарушений на насыщенность коллекторов, а также указывает на существенную неоднородность фильтрационных характеристик коллекторов по площади.

Суммарная мощность всех газонасыщенных коллекторов и коллекторов смешанного насыщения в пределах эльгянской свиты составляет 16,2 м. Это, в свою очередь составляет 41% от общей мощности свиты.

Как отмечено ранее, породы данных свит по причине их высокой соленасыщенности и наличию мощных водо- и газоупорных пачек галогенных (каменная соль) и терригенных (аргиллит) отложений суммарной мощностью от 20,0 м до 45,0 м необходимо рассматривать как исключительно слабопроницаемые породы.

По результатам ГИС в толщах пород нелбинской и юрегинской свит выявлено несколько маломощных слабогазонасыщенных пластов-пропластков, приуроченных к внутрiformационным прослоям карбонатных (доломиты) и терригенно-карбонатных (алевролиты и мергели) разностей отложений данных свит.

В отложениях нелбинской свиты выделяется два слабогазонасыщенных коллектора (рис. 3.17).

Коллектор №1 по стволу скв. №307 отмечается в интервале 1461,0 (абс. отм. -1122,3 м) – 1465,0 (абс. отм. -1126,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №1 составляет 4,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, 2,5 %. Тип пористости кавернозно- межзерновой и трещинно-кавернозный.

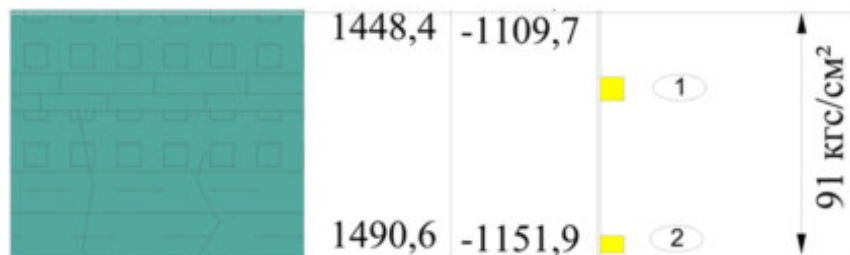


Рис. 3.17. Коллекторы нелбинской свиты [393]

Коллектор №2 выделяется в интервале 1488,0 (абс. отм. -1149,3 м) – 1491,0 (абс. отм. -1152,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №2 составляет 3,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС, 2,7%. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Породы нелбинской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №309 выделено два слабогазонасыщенных коллектора (№1 и №2). Общая мощность коллекторов составила 7,5 м. Приток газа  $Q_g$  до 0,1 м<sup>3</sup>/сут; расчётное пластовое давление  $P_{пл.}$  – 91,0 кгс/см<sup>2</sup>.

Зафиксированное пластовое давление 91,0 кгс/см<sup>2</sup> ниже расчётного гидростатического (149,0-150,0 кгс/см<sup>2</sup>) в 1,5 раза, что, в свою очередь, позволяет охарактеризовать коллекторы нелбинской свиты как коллекторы с аномально низким пластовым давлением. Данное явление объясняется соотношением свободного трещинно-порового пространства в газонасыщенных

породах нелбинской свиты и объёмом содержащихся в них флюидов. Наличие такого пластового давления позволяет рассматривать внутрiformационные коллекторы нелбинской свиты как элизионную систему, то есть пространственно-обособленную систему с внутренними источниками формирования напоров [113; 263].

При испытании коллекторов юрегинской свиты время открытого периода составляло 270 мин. Дебит пластовых вод по восстановлению оценивается  $0 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Зафиксированные в процессе испытаний пластов расходы природных газов не превысили  $0,1-0,5 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

В отложениях юрегинской свиты выделяется семь слабогазонасыщенных коллекторов (рис. 3.18).

Коллектор №1 по стволу скв. №309 отмечается в интервале 1518,0 (абс. отм. -1179,3м) – 1521,5 (абс. отм. -1182,3 м). Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №1 составляет 3,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС 2,2 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №2 выделяется в интервале 1524,0 (абс. отм. -1185,3 м) – 1526,0 (абс. отм. -1187,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №2 составляет 2,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС 2,4 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

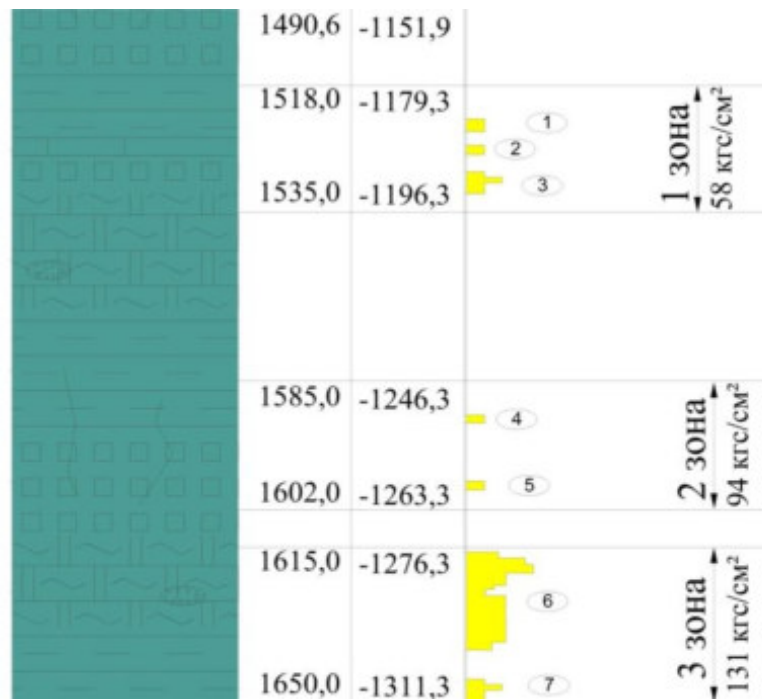


Рис.3.18. Коллекторы юрегинской свиты [393]

Коллектор №3 выделяется в интервале 1530,0 (абс. отм. -1191,3м) – 1535,0 (абс. отм. -1196,3 м). Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №5 составляет 5,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС 4,1 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №4 выделяется в интервале 1585,0 (абс. отм. -1246,3м) – 1587,0 (абс. отм. -1248,3 м). Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №4 составляет 2,0 м. Средний коэффициент общей пористости, полученный по результатам ГИС 2,3 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №5 выделяется в интервале 1600,0 (абс. отм. -1261,3м) – 1602,0 (абс. отм. -1263,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №5 составляет 2,0 м. Средний коэффициент общей пористости 2,2%. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №6 отмечается в интервале 1616,0 (абс. отм. -1277,3м) – 1636,0 (абс. отм. -1297,3 м). Общая эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №6 составляет 20,0 м. Средний коэффициент общей пористости 5,3 %. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Коллектор №7 выделяется в интервале 1646,0 (абс. отм. -1307,3м) – 1650,0 (абс. отм. -1311,3 м). Эффективная мощность слабогазонасыщенного коллектора №7 составляет 4,0 м. Средний коэффициент общей пористости 4,0%. Тип пористости кавернозно-межзерновой и трещинно-кавернозный.

Породы юрегинской свиты можно охарактеризовать как весьма слабогазонасыщенные. По методам ГИС по стволу скв. №309 было выделено семь слабогазонасыщенных коллекторов (№№ 1-7). Общая мощность коллекторов свиты составила 38,0 м.

По величине зафиксированного пластового давления породы юрегинской свиты были разделены на три зоны:

- Зона №1 в интервале 1518,0–1535,0м (абс. отм. (-1179,3м) – (-1196,3м). Сложена преимущественно галогенными породами, с подчинёнными прослоями и пропластками карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит, алевролит) отложений. На данном интервале выделено три пласта-коллектора. Приток флюида при открытом периоде  $Q$  до 0,1 м<sup>3</sup>/сут; пластовое давление  $P_{пл.}$  – 58,0 кгс/см<sup>2</sup>. Зафиксированное пластовое давление 58,0 кгс/см<sup>2</sup> ниже расчётного гидростатического (149,0-150,0 кгс/см<sup>2</sup>) в 2,5 раза. Что в свою очередь позволяет охарактеризовать данную зону юрегинской свиты как зону с аномально низким пластовым давлением;

- Зона №2 выделена в интервале 1585,0–1602,0 м (абс. отм. (-1246,3м) – (-1263,3м). Сложена переслаиванием галогенных пород и подчинённых прослоев и пропластков карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит, алевролит) отложений. На данном интервале выделено два пласта-коллектора. Приток флюида при открытом периоде  $Q$  до 0,2 м<sup>3</sup>/сут; пластовое давление  $P_{пл.}$  – 94,0 кгс/см<sup>2</sup>. Зафиксированное пластовое давление 94,0 кгс/см<sup>2</sup> ниже расчётного гидростатического (155,0-160,0 кгс/см<sup>2</sup>) в 1,6 раза, что, в свою очередь, также

позволяет охарактеризовать данную зону юрегинской свиты, как зону с аномально низким пластовым давлением;

- Зона №3 в интервале 1615,0–1650,0 м (абс. отм. (-1276,3м) – (-1311,3 м). Сложена преимущественно галогенными породами, с подчинёнными прослоями и пропластками карбонатных (известняк, доломит) и терригенных (аргиллит) отложений. На данном интервале выделено два коллектора, суммарной мощностью 24,0 м. Приток флюида в открытом периоде при снятии давления  $Q$  до 0,5 м<sup>3</sup>/сут; максимальное зафиксированное пластовое давление составило  $P_{пл.}$  – 131,0 кгс/см<sup>2</sup>. Зафиксированное пластовое давление 131 кгс/см<sup>2</sup> несколько ниже расчётного (нормального) гидростатического давления, составляющего в данных условиях порядка 165,0-170,0 кгс/см<sup>2</sup> (на 20% ниже), что, в свою очередь, позволяет охарактеризовать выделенные коллекторы юрегинской свиты как коллекторы с пластовым давлением, приближенным к нормальному.

Зафиксированные зоны аномальных пластовых давлений подтверждают существенную иммобилизацию флюидов, содержащихся в выделенных внутриформационных коллекторах. В данной ситуации можно говорить о выделении в отложениях юрегинской свиты не просто трёх зон, а трёх элизионных систем. Наличие таких перепадов пластовых давлений свидетельствует о высокой степени изолированности сформированных зон, как от внешних факторов, так и от друг друга. Причины возникновения подобных аномалий рассмотрены в данной работе ранее.

Отдельно следует отметить, что в пределах шахтного поля трубки Мир зон аномально высокого давления не выявлено, что, по всей видимости, обусловлено меньшей насыщенностью и большей мощностью проницаемых пород (данные факты подтверждаются проведенными исследованиями и натурными наблюдениями).

### ***3.4 Накынское кимберлитовое поле***

Характеристика Накынского кимберлитового поля будет выполнена по трубкам Ботубинская и Нюрбинская, являющимися базовыми месторождениями для Нюрбинского горно-обогатительного комбината.

Подземные воды Накынского кимберлитового поля отличаются повсеместной газонасыщенностью. Состав водорастворенных газов в пластовых водах водоносных комплексов изменяется от азотного до азотно-метанового [1; 60]. Газы азотного типа отмечаются в пластовых водах межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (МВВК) на трубке Нюрбинской и водах ПВВК в скважине 5 ГВ (800 м. севернее трубки Нюрбинская). Газонасыщенность пластовых вод низкая - от 16,6 до 66,7 см<sup>3</sup>/л. Водорастворенные газы представлены преимущественно азотом (67,94- 81,69 %), на долю углеводородных газов приходится 11,25-28,77 %. Концентрации тяжелых углеводородов незначительны - 0,09-0,25 %;

углекислого газа - 0,01-1,77 %; водорода - 0,32–3,85 %; гелия - 0,15–1,82 %. Из гомологов метана присутствуют: этан в количестве от 0,07 до 0,20 об. %, пропан – до 0,01 % (прил. 7).

Состав водорастворенных газов обводненной зоны кимберлитов практически не отличается от водорастворенных газов МВВК. Содержание азота колеблется от 67,10% до 88,40%, метана от 15,99 до 29,61%. Тяжелые углеводороды присутствуют в количестве от 0,01 до 0,86%. Из гомологов присутствует этан (до 0,86%). Концентрации углекислого газа и гелия незначительны и сопоставимы с содержаниями в межмерзлотном верхнекембрийском водоносном комплексе.

Состав газов обводненной зоны долеритов (зона Ботубинского разлома) несколько отличается: газы представлены метаном (48,87-60,19%), азотом (33,82-52,95%). Отмечается повышенная концентрация тяжелых углеводородов (0,88-7,96%), углекислого газа - 0,03-6,93%, гелия - 0,28-2,07 %. В составе гомологов метана присутствуют: этан – 0,4 ÷ 6,56%, пропан – 0,05 ÷ 0,67%, i-бутан – до 0,04%, n – бутан – до 0,0 %. Газонасыщенность обводненной зоны Ботубинского разлома от 33,3 до 333,3 см<sup>3</sup>/л.

Состав водорастворенных газов в пластовых водах подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (ПВВК) азотно-метановый и представлен в приложении 7.

Газонасыщенность природных рассолов подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса составляет 33,3-150,0 см<sup>3</sup>/л. Метан содержится в количестве 64,1-85,44 %. Концентрация тяжелых углеводородов составляет 1,04-9,55 %. Количество азота колеблется от 8,20 до 39,98 %; углекислого газа - 0,03-1,31 %; гелия - 0,07-2,23 %.

Состав водорастворенных газов обводненной зоны кимберлитов в пределах ПВВК (скв.3 ГР) азотно-метановый. Газонасыщенность 33,3-233,3 см<sup>3</sup>/л. Метана содержится 64,26-89,27 %. Концентрация тяжелых углеводородов составляет 0,26-0,59%. Количество азота колеблется от 6,68 до 48,80 %; углекислого газа - 0,75-3,04%; гелия до 0,10%.

В приложении 7 приведены диаграммы состава растворенных газов подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса в пределах Алакит-Мархинского, Далдынского и Накынского кимберлитовых полей.

Как видно из представленных диаграмм, состав водорастворенных газов по месторождениям, не смотря на значительное расстояние между ними, практически идентичен, что обусловлено влиянием криогидрогеологических условий верхнекембрийского водоносного комплекса, а также литолого-фациальных особенностей строения моркокинской и мархинской свит.

Из приведенного материала следует, что газонасыщенность вод и состав газов варьирует в широких пределах. Состав газов с глубиной меняется от азотного в водах межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (МВВК), азотно-метанового в водах

подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (ПВВК). В виду малых дебитов выделяемых комплексов, газонасыщенность месторождений оценивается как низкая.

### ***3.5 Технические решения по дегазации коллекторов вмещающих пород, применяемые на кимберлитовых трубках Западной Якутии***

В настоящее время дегазация вмещающих пород выполняется на рудниках Интернациональный и Удачный [391; 472; 501]. Газонасыщенные породы вмещающего массива упомянутых месторождений в интервалах изучения представлены нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными отложениями. Большинство выделенных коллекторов, как правило, приурочено к карбонатным разностям: известнякам, доломитам. Несмотря на некоторые литологические отличия, есть ряд общих черт, а именно:

- карбонатные породы характеризуются как трещинно-пористые и трещинно-карстовые коллекторы;
- выделяемые водоносные комплексы находятся в зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, что является определяющим для перечисленных ниже особенностей;
- выделяемые горизонты и комплексы относятся к высоконапорным; воды к высокоминерализованным, насыщенным хлоридно-кальциевым рассолам с минерализацией от 300 до 520 г/литр;
- в первоначальном, неразгруженном состоянии, массив характеризуется не только достаточно высокими дебитами природного газа (по отдельным скважинам более 150 м<sup>3</sup>/час), но и высокими первоначальными пластовыми давлениями (свыше 100 кгс/см<sup>2</sup>).

Описанные выше первоначальные газодинамические условия делают возможным отработку месторождений только в соответствии со строгим соблюдением норм и правил «газового режима».

По результатам изучения характера наблюдаемых газопроявлений, было установлено, что газоносность отложений, как правило, обусловлена благоприятными литолого-фациальными и структурно-тектоническими особенностями, а именно наличием мощных толщ галогенных пород, малоамплитудной складчатой тектоники, оперяющих разломов и блоковых дислокаций. Такой же характер газопроявлений отмечается и на угленосных месторождениях. Особенно выделялся фактор влияния малоамплитудной складчатой тектоники, оперяющих разломов и блоковых дислокаций, выделяющихся в рамках изучаемых объектов. Указанные структурные нарушения выступают дополнительными факторами для формирования неструктурных, плано-неоднородных газовых залежей-ловушек. Отличительной особенностью фиксируемых газопроявлений являлось довольно быстрое падение дебита истечения пластовых газов по причине малых запасов во вскрываемых неструктурных литологически и структурно

экранированных залежах и ловушках. На дегазационных скважинах максимальные, пиковые значения наблюдались в течение двух-трёх суток (максимум до недели), затем шло резкое уменьшение дебита, за которым наблюдалась стагнация дебита, с небольшими «всплесками» газовыделения. В целом изменение дебита во времени по данным скважинам имеет нисходящий тренд. Такие особенности газовыделения данных скважин связаны с тем, что во время проходки и в первое время после достижения забоя проектной отметки происходит срабатывание естественных запасов пристволовой и призабойных зон, относящихся к трудно извлекаемым, иммобилизованным, а их объёмное значение крайне мало. После их сработки, вовлекаются уже выдержанные по площади коллекторы, характеризующиеся несколько отличными газодинамическими параметрами. О площадном распространении (в рамках масштаба объекта исследований) пластов-коллекторов свидетельствует стагнация дебита в течение всего времени наблюдения. Но при этом необходимо уточнить, что распространение и наличие неструктурных газовых, водно-газовых и нефте-водно-газовых ловушек и залежей в трещиноватых карбонатных породах в локальном плане затруднительно оценить, поскольку площадное распространение основного показателя трещиноватости крайне неоднородно не только по простиранию, но и по глубине (что подтверждается результатами, полученными на дегазационных скважинах). Формирование таких микро-залежей происходит при совпадении сразу нескольких факторов (структурного, литологического и тектонического), иммобилизующих некоторое количество пластовых газов. Такие газовые ловушки характеризуются крайне малыми объёмами запасов пластовых газов, находящихся под высоким или крайне высоким пластовым давлением.

Учитывая описанные выше условия, было принято решение об использовании системы опережающей дегазации. Причём дегазация вмещающих пород осуществляется в два этапа.

Дегазация месторождений осуществляется со строгим соблюдением разработанных и утверждённых Ростехнадзором Специальных мероприятий, разработку которых выполняет лаборатория горно-геологических проблем разработки месторождений. В период работы Янникова А.М. в должности заведующего лабораторией (2020–2022 гг.) была выполнена актуализация разработанных ранее Специальных мероприятий по рудникам Айхал, Интернациональный и Удачный, а также разработаны Специальные мероприятия для строительства нового рудника Юбилейный и Мир-глубокий. Степень личного участия автора в процессе создания и актуализации данных нормативных документов составляла от 20-30 до 50% (для рудника Мир-глубокий).

Разработка и актуализация документов, проводимая под руководством автора, опиралась как на уже разработанную ранее нормативную документацию, так и на опубликованные и

фондовые труды учёных и специалистов (Боланев А.В., Гензель Г.Н., Дроздов А.В., Лобанов В.В., Корепанов А.Ю. и др.).

В результате на рудниках АЛРОСА используется двухэтапная методика предварительной дегазации и разгрузки коллекторов.

На первом этапе на всю мощность эксплуатационного блока бурятся вертикальные опережающие скважины. При этом мощность пластов-коллекторов и расчётная пористость разгружаемого массива рассматриваются как единый слой со средневзвешенной величиной, характеризующей весь дегазируемый блок. Систему пластов-коллекторов на первом этапе считаем открытой (имеющей периферийные области питания-притока). При таких граничных условиях суммарный приток природных газов к системе дегазационных скважин определяется, прежде всего, емкостными свойствами коллекторов, как в области дегазации, так и в периферийных областях. Задача массопереноса природных газов решается численно с помощью функции Лейбензона. Реализация первого этапа позволяет выполнить первичную разгрузку массива, что приводит к уменьшению пластовых давлений в коллекторах и позволяет перейти к реализации второго этапа.

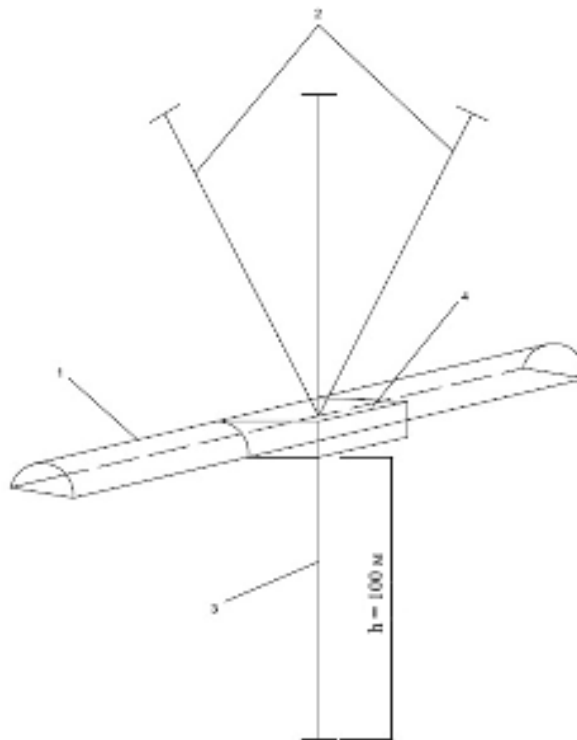
На втором этапе перед грудью забоя строящейся подземной горной выработки проходятся 25-30 метровые горизонтальные и слабонаклонные (до  $10^\circ$ ) скважины. В зависимости от результатов первого этапа дегазации, их количество от 3 до 7 штук. Назначение данных скважин поинтервальная разгрузка несработанных на 1 этапе запасов природных газов [391].

Успешность выбранной методики подтверждается фактическими наблюдениями за газопритоками в подземных горных выработках рудников. При использовании для дегазации массива стационарных дренажных узлов с целью увеличения интенсивности дегазации и распространения опережающего дегазационного эффекта на нижележащий этаж, сооружается дополнительная нисходящая дегазационная скважина [116; 117]. Схема дренажно-дегазационного узла скважин показана на рис. 3.19.

Реализуемая на руднике Удачный схема дренажа и дегазации с использованием стационарного дренажно-дегазационного узла скважин позволяет эффективно дренировать и дегазировать безнапорную часть коллекторов среднекембрийского водоносного комплекса в отн -365/-465 м системой наклонно-восстающих скважин, а также осуществлять опережающую дегазацию и дренаж напорной части пласта, подготавливая благоприятные условия сооружения нижележащего горизонта.

Эффективность применяемых методов дегазации вмещающих пород подтверждается не только существенным (в 20-30 раз) падением дебитов, наблюдаемых газопроявлений, но и тем фактом, что во вскрывающих выработках и очистных забоях рудника «Удачный» случаев загазирования за последние 3 года не зафиксировано, для рудника «Интернациональный» такой

период составляет уже 5 лет. Все это позволяет оценивать двухэтапную дегазацию вмещающих пород, как достаточно действенный метод, решающий, к сожалению, не весь, но большой спектр возникающих проблем и позволяющий выполнять добычу алмазов на указанных месторождениях.



- 1 – дренажно-дегазационный горизонт
- 2 – восстающие дренажно-дегазационные скважины
- 3 – нисходящая дренажно-дегазационная скважина
- 4 – буровая камера

Рис. 3.19. Принципиальная схема дренажно-дегазационного узла скважин<sup>20</sup>

Имеющиеся в настоящее время технические наработки по дегазации пород будут применены на руднике Мир при отработке эксплуатационных блоков в отм. -700/-1060 м [391; 484; 485]. Газонасыщенные породы вмещающего массива в данных отметках представлены коллекторами толбачанской свиты. Большинство выделенных коллекторов, как правило, приурочено к карбонатным разностям: известнякам, доломитам. При этом, будет необходимо учесть влияние структурно-тектонического строения шахтного поля месторождения, т.к. коренное месторождение алмазов – трубка Мир не имеет прямых аналогов, и характеризуется ещё более сложными (чем трубка Интернациональная) газодинамическими условиями.

<sup>20</sup> Документация на техническое перевооружение опасного производственного объекта рудник «Удачный». Вскрытие и отработка запасов I очереди дополнение в части вскрытия и вовлечения в опытно-промышленную отработку запасов до отм. -630м. Системой разработки с самообрушением. Система дегазации и осушение месторождения (выполнял коллектив авторов института Якутнiproалмаз).

Дополнительным осложняющим фактором выступают структурно-тектонические условия шахтного поля месторождения.

В результате анализа зафиксированных ранее систем разрывных нарушений, а также с учётом опубликованной ранее информации, автором было выделено три значимых системы тектонических нарушений, характеризующихся значительными альтитудами смещений пластов:

– Первая система контролируется зоной динамического воздействия Параллельного разлома и прослеживается развитием зон брекчирования мощностью от 10 до 15 м. Характеризуется простиранием  $10-20^\circ$  и углом падения  $80-85^\circ$ . Для рассматриваемой зоны характерны смещения пластов, с суммарной альтитудой смещения от 2 до 10-20 м, отмечается сульфидная минерализация.

– Вторая система контролируется кимберлит вмещающим разломом. Проявляется менее интенсивно, характеризуется азимутом простирания от  $50$  до  $60^\circ$  и углом падения  $70-85^\circ$ . Смещения вмещающих пород менее интенсивны, и составляют от 1 до 6 м.

– Нарушения третьей развиты ограниченно и приурочены к кимберлитам, дайке долеритов и зонам эндо- и экзоконтактов данных интрузий. Трециноватость вмещающих пород уменьшается по мере удаления от контакта с рудным телом. В приконтактной зоне (5-10 м) во вмещающих породах установлена радиальная и концентрическая трециноватость.

Для определения закономерностей влияния разрывных нарушений на коэффициент проводимости основных водоносных комплексов в пределах шахтного поля трубки Мир, был выполнен метод сопоставительного сравнения. В настоящее время существует достаточное количество первичной информации для локальной оценки и прогноза изменения проводимости в интервале метегеро-ичерского водоносного комплекса, т.к. в период отработки месторождения открытым способом с 1978 по 1988 гг. осуществлялась откачка ненасыщенных рассолов системой скважин опережающего водопонижения, пробуренных на разных флангах месторождения. Выделение отдельных блоков-зон выполнялось по результатам первичного анализа удельных дебитов эксплуатационных скважин и их сопоставления с выделенными системами разрывных нарушений. В результате проведенных исследований, схематично в плане, по параметру водопроводимости, в пределах шахтного поля трубки Мир в интервале метегеро-ичерского водоносного комплекса было выделено 7 блоков-зон [426]. На основе выделенных блоков-зон были рассчитаны прогнозные вариации коэффициента проводимости (табл. 3.11). С помощью полученного распределения коэффициента водопроводимости можно рассчитать прогнозные распределение притока флюидов, исходя из фактически зафиксированных параметров газового фактора природных рассолов толбачанского возраста [383, 384; 389; 391; 420] (таблица 3.12).

Таблица 3.11 – Прогнозные вариации коэффициента проводимости [399]

Блок-зона	Плановое расположение	Полученный Т для метегероичерского водоносного комплекса, м <sup>2</sup> /сут	Полученный Т для толбачанского газо-водоносного комплекса, м <sup>2</sup> /сут	
			рассчитанный по результатам ОФР	прогнозный
№1	Северный борт карьера Мир	120	0,100	
№2	Северо-восточный борт карьера Мир	55		0,028
№3	Восточный борт карьера Мир	40	0,020	
№4	Юго-восточный борт карьера Мир	140		0,136
№5	Южный борт карьера Мир	50		0,025
№6	Запад-Юго-западный борт карьера Мир	20		0,010
№7	Северо-западный борт карьера Мир	60		0,032

Таблица 3.12 –Прогнозные притоки флюидов к системе подземных горных выработок и очистному пространству в интервале толбачанского газо-водоносного комплекса [399]

Блок-зона	Прогнозный приток, природных рассолов, м <sup>3</sup> /сут	Прогнозный приток, пластовых углеводородных газов, м <sup>3</sup> /сут	<b>Итого приток флюидов, м<sup>3</sup>/сут</b>
№1	200	6900	<b>7100</b>
№2	20	650	<b>670</b>
№3	15	500	<b>515</b>
№4	180	5400	<b>5580</b>
№5	65	1900	<b>1965</b>
№6	20	650	<b>670</b>
№7	15	500	<b>515</b>

Как видно из представленной информации, наихудшие гидрогеологические условия характеризуют юго-юго-западный и северный фланги месторождения. Данный факт требует учёта при проектировании не только горно-капитальных, подготовительных и вскрывающих подземных горных выработок, но и местоположения шахтных стволов. В настоящее время принято решение о расположении клетового и скипового шахтных стволов в пределах зон №2 и №3 – характеризующихся наилучшими условиями. В дальнейшем проектирование рабочих горизонтов и строительство систем опережающей дегазации будут выполняться с обязательным учётом структурно-геологических и гидрогеологических (газодинамических) условий месторождения. Исходя из уже полученных параметров и характеристик, выполним прогнозный расчёт системы опережающей дегазации коллекторов толбачанского газо-водоносного комплекса и суммарного объёма природных рассолов и пластовых углеводородных газов, которые выделяются в процессе разгрузки вмещающих пород.

Принципиальная схема опережающей дегазации – круговая система скважин, совершенная по качеству вскрытия разгружаемых коллекторов толбачанской свиты. Скважины

бурятся на полную мощность предполагаемого эксплуатационного блока. Прогноз притока газовыделения выполнен с учётом суммарных расчётных величин. Результаты расчётов приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Прогнозный приток пластовых газов при строительстве системы опережающей дегазации на руднике Мир в интервале толбачанской свиты [399]

№ п/п	Блок-зона	Площадь блока-зоны, млн. м <sup>2</sup>	Количество дегазационных скважин, шт.	Средний дебит по одной скважине (в разрезе года), м <sup>3</sup> /сут
1	№1	1,24	11	600
2	№2	1,26	7	100
3	№3	1,18	13	40
4	№4	0,92	7	800
5	№5	0,95	12	150
6	№6	1,52	10	70
7	№7	1,15	4	120

Исходя из проведенных расчётов, система опережающей дегазации коллекторов толбачанской свиты должна состоять из 64 скважин глубиной по 350 м.

Для обеспечения безопасной отработки бурение скважин должно осуществляться непосредственно из подземных горных выработок, с применением превенторов и другого противовыбросового оборудования, рассчитанного на давление 225–250 кгс/см<sup>2</sup>. В последующем остаточное давление в массиве не превысит 30–40 кгс/см<sup>2</sup>. Что позволит перейти ко второму этапу разгрузки массива, т.е. проходке слабонаклонных скважин непосредственно с забоев строящихся подземных горных выработок.

***Из приведенной выше информации по газодинамическим условиям кимберлитовых полей можно сделать следующие выводы:***

1. Изучение природных газов, содержащихся как во вмещающих горных породах, так и непосредственно в самих кимберлитах выполняется на разных стадиях освоения месторождений. Но наиболее критичным является выделение газосодержащих интервалов при переходе на подземную отработку, т.к. газоносность пород, объём, состав и форма содержащихся газов определяют не только параметры вентиляции рудников, но и скорость горнопроходческих работ, а также технологические решения по опережающей дегазации массива. Наибольшую опасность представляют взрывоопасные или ядовитые газы. На всех кимберлитовых трубках без исключения в процессе изучения фиксировалось наличие углеводородных газов, находящихся как в свободной, так и в растворённой и связанной формах. В результате проведенных исследований была выполнена характеристика газодинамических условий непосредственно для месторождений отдельных кимберлитовых полей:

I. Вмещающие породы коренных месторождений Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей не формируют значительных запасов углеводородных газов. Что позволяет при переходе на подземную добычу (рудник Айхал) не планировать системы опережающей дегазации вмещающих пород, а ограничиться лишь заверочным бурением, подтверждающим не газоносность вовлекаемых в отработку блоков.

II. Углеводородные газы, содержащиеся во вмещающих породах и кимберлитах трубки Удачная (Далдынское кимберлитовое поле), по причине преимущественного (до 90%) нахождения в растворенном состоянии в природных рассолах среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов, удаляются из массива комплексно в процессе общего осушения массива.

III. Наиболее сложные газодинамические условия месторождений Мирнинского кимберлитового поля, а именно совокупность литолого-фациальных и структурно-тектонических факторов, способствующих формированию неструктурных газовых залежей, требуют строительства и применения систем опережающей дегазации.

2. В настоящее время дегазация вмещающих пород выполняется на рудниках Интернациональный и Удачный. Газонасыщенные породы вмещающего массива упомянутых месторождений в интервалах изучения представлены нижнепалеозойскими терригенно-карбонатными отложениями. Большинство выделенных коллекторов, как правило, приурочено к карбонатным разностям: известнякам, доломитам. Несмотря на некоторые литологические отличия, есть ряд общих черт, а именно: - карбонатные породы, характеризуются как трещинно-пористые и трещинно-карстовые коллекторы; - выделяемые водоносные комплексы находятся в зонах затруднённого и весьма затруднённого водообмена, что является определяющим для перечисленных ниже особенностей; - выделяемые горизонты и комплексы относятся к высоконапорным; воды к высокоминерализованным, насыщенным хлоридно-кальциевым рассолам, с минерализацией от 300 до 520 г/литр.

В первоначальном, неразгруженном состоянии, массив характеризуется не только достаточно высокими дебитами природного газа (по отдельным скважинам более 150 м<sup>3</sup>/час), но и высокими первоначальными пластовыми давлениями (свыше 100 кгс/см<sup>2</sup>). Описанные выше первоначальные газодинамические условия делают возможным отработку месторождений только в соответствии со строгим соблюдением норм и правил «газового режима». Для обеспечения безопасного ведения горных и проходческих работ было принято решение об использовании системы опережающей дегазации. Причём дегазация вмещающих пород осуществляется в два этапа. На первом этапе на всю мощность эксплуатационного блока бурятся вертикальные опережающие скважины. На втором этапе перед грудью забоя строящейся подземной горной выработки проходятся 25–30 метровые горизонтальные и слабонаклонные (до

10°) скважины. В зависимости от результатов первого этапа дегазации, их количество составит от 3 до 7 штук.

Характер распределения углеводородных газов в разрезе вмещающих пород, указывает на справедливость структурного подхода в оценке газонасыщенности и проницаемости вмещающих пород, необходимой для решения важной народнохозяйственной проблемы – обеспечение безопасной отработки месторождений, Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей.

## ГЛАВА 4. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ВОДОПРИТОКИ В ПРЕДЕЛАХ ШАХТНЫХ ПОЛЕЙ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК ЯКУТИИ<sup>21</sup>

Оценка и расчёт прогнозных водопритоков, а также их изменение, как в плане, так и в разрезе напрямую влияет на условия обрабатываемых месторождений, а также на проектируемые системы водозащиты и сопутствующей подземной инфраструктуры, в части их расположения, производительности и т.д. Практическая применимость вариаций водопритоков прежде всего заключается в учёте наиболее проницаемых и флюидообильных блоков при строительстве, как инфраструктуры рудника, так и непосредственно самих подземных горных выработок. Имеющиеся в настоящее время исследования указывают на тесную взаимосвязь проницаемости карбонатных коллекторов и разрывных нарушений [40; 43; 166; 191; 376; 396; 426].

В рамках данной главы выполнен сопоставительный анализ влияния выделенных в процессе структурно-тектонической съёмки разрывных нарушений [465; 466; 475; 476] и наблюдаемых на рудниках и карьерах водопритоков для выявления и учёта неоднородностей водовмещающей среды, с целью борьбы с водопритоками при строительстве подземных горных выработок обслуживающей инфраструктуры, а также проектирования систем защиты от затопления.

Гидрогеологическая и структурно-геологическая характеристика кимберлитовых полей выполнена с учётом имеющихся фондовых материалов, исследований, выполненных ранее [3; 4; 6; 20; 28; 47; 59; 73; 74; 153; 200; 207; 310; 452-455] и результатов научно-исследовательской деятельности автора. Исследования, проводимые автором, безусловно, базировались на имеющейся обширной базе как нормативной документации, так и на опубликованных трудах учёных и специалистов гидрогеологов, геологов и др. (Акишев А.Н., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Анциферов А.С., Атрощенко Ф.Г., Бобров А.К., Гензель Г.Н., Гладков А.С.,

---

<sup>21</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО:

Потуроев А. А., Голубева Т. В., Борисов Г. К., Авраменко В. И., Мосиенко Б. А. и др. Отчёт о результатах работ по теме «Структура кимберлитовых полей и тектонический контроль размещения кимберлитов Далдыно-Алакитского района». Фонды АмГРЭ. Нюрба, 1974.

Гладков А. С. Отчёт «Уточнить разломно-блоковое строение вмещающих пород трубок «Юбилейная» и «Комсомольская» по обнаженным откосам карьера в 2011-2012 гг. / Фонды ЯНА. – Мирный, 2013.

Гладков А.С. Научно-технический отчёт детальное картирование разломно-блоковой структуры месторождения трубки «Мир» для прогнозирования водопроявлений в подземные горные выработки рудника и развития гидрогеомеханических процессов. Иркутск. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2014.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Дроздов А.В., Иост Н.А., Колганов В.Ф., Лобанов В.В., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Шварцев С.Л., Шепелев В.В. и др.).

Оценка прогнозных притоков непосредственно к подземным горным выработкам производилась исходя из эмпирической зависимости:

$$Q_{пр.} = \frac{Q_c \times \sqrt{r_{пр.}}}{\sqrt{r_c}}, \quad (4.1)$$

где:  $Q_{пр.}$  - прогнозный приток в горную выработку, м<sup>3</sup>/сут;

$Q_c$  – приток в скважину, м<sup>3</sup>/сут;

$r_c$  – радиус скважины, м;

$r_{пр.}$  – проектный радиус горной выработки, м.

Систематизация и последующая корреляция вмещающих массивов кимберлитовых трубок Айхал, Интернациональная, Мир, Удачная и Юбилейная выполнялись по фактически наблюдаемым и замеренным притокам. Для месторождений, отрабатываемым подземным способом (Айхал, Интернациональная и Удачная) использовались сети опытных самоизливающихся скважин, пробуренных непосредственно из подземных горных выработок или струйные контактные водопроявления, вскрываемые в отметках изучаемых комплексов и горизонтов. Для трубок Мир и Юбилейная использовались дебиты, полученные при опытных и эксплуатационных откачках из скважин, пробуренных с дневной поверхности, а также водопроявления, фиксируемые на бермах карьера.

Прогнозные карты-схемы месторождений, строились после корреляционного сопоставления планового расположения опытных скважин и систем разрывных нарушений. Получаемые параметры притоков достаточно просты не только для обработки и последующего анализа, но и позволяют выявлять закономерности площадных вариаций водообильности, применительно к отдельным водоносным горизонтам и комплексам.

Необходимо отметить, что нахождение корреляционных взаимосвязей между фильтрационными параметрами интервалов коллекторов и системами разрывных нарушений, другими способами, например, плановыми вариациями проводимости (водопродимости) пластов- коллекторов осложнены рядом ограничений, связанных с горно-геологическими, гидрогеологическими и газодинамическими условиями объектов изучения.

Как правило, обработку результатов выпуска в наблюдательных и опытных скважинах можно производить способами временного, площадного и комбинированного прослеживания. На основе следующих графиков:

1.  $\frac{s}{Q} - lgt$  (график временного прослеживания);
2.  $\frac{s}{Q} - lgr$  (график площадного прослеживания);

3.  $\frac{S}{Q} - \lg \frac{t}{r^2}$  (график комбинированного прослеживания).

Коэффициенты проводимости (водопродимости) и пьезопроводности определяются по угловым коэффициентам и начальным ординатам этих графиков.

В качестве примера, дискуссионности применения указанных способов определения фильтрационных параметров, как частный случай, можно привести коллектора толбачанской свиты. Их изучение, прежде всего, проводилось по сети опытных скважин, пробуренных из системы подземных горных выработок гор. -790 м. Все опытные скважины изливались с различными дебитами (максимальные расходы составляли от 5,2 до 46,2 м<sup>3</sup>/сут при понижении порядка 900 м). Главной особенностью являлась резко изменяемая интенсивность притока рассолов по наблюдаемым скважинам. Максимальные водопритоки, как правило, фиксировались на момент вскрытия водонасыщенных коллекторов. Данные, полученные в ходе натуральных наблюдений, подтвердили, что изменчивая интенсивность водоприток по скважинам обусловлена особенностями водосодержащих коллекторов толбачанской свиты. А именно крайне низкими параметрами проводимости, незначительными естественными запасами данных высоконапорных, высокоминерализованных (до 520 г/литр) пластовых вод (рассолов). Для скважин было характерно непостоянство расходов (дебитов) наблюдаемых водоприток и невысокие дебиты (фиксируемые притоки, как правило, на временном отрезке более суток после вскрытия, редко превышали 250-300 л/час). Самоизлив вод, как правило, был не продолжителен, эпизодичен, за фиксируемыми в ходе натуральных наблюдений «всплесками активности», (продолжительностью от 2-5 до 15-25 дней) следовали долговременные периоды с полным отсутствием каких-либо водопроявлений. У каждой скважины был сформирован свой режим, в том числе, обусловленный её расположением относительно участка сложного структурно-тектонического строения, приуроченного к малоамплитудному тектоническому нарушению, фиксируемому по наличию сближенных кимберлитовых жил, ступенчатых сбросов и флексурным перегибам слоёв вмещающих пород. В описываемых случаях низких и непостоянных дебитов, фиксируемых по целому ряду водоносных комплексов: нижнеордовикский, верхнекембрийский и толбачанский, применялись осреднённые среднемесячные расходы. При постоянных и высоких расходах, характерных для метегероичерского и среднекембрийского водоносных комплексов применялся среднесуточный дебит.

Дополнительными факторами, затрудняющими применение стандартных методик динамики подземных вод для определения проводимости (водопродимости) выступают:

1. Одномоментное снятие пластового давления, возникаемое из-за выпуска природных рассолов, приводит к деформационным процессам, т.к. отсутствует декомпенсация падения давления  $\sim 12,2$  МПа, что приводит к процессам уменьшения открытой пористости и

трещиноватости карбонатных пород, из-за горного давления вышележащей толщи (порядка 1200 м).

2. Расположение опытной скважины в подземной горной выработке формирует в радиусе 2,5-3,0 м зоны дополнительной релаксации, т.к. происходит частичная разгрузка напряжений непосредственно в самой подземной горной выработке. Данный процесс оказывает непосредственное влияние на процесс фильтрации и массопереноса.

3. Изучаемые природные системы коллекторов, в зависимости от глубины залегания и приуроченности к кимберлитовому полю имеют сложную флюидную насыщенность, т.к. помимо природных рассолов содержат пластовые газы, как правило углеводородного состава как в свободной, так и водорастворенной формах. Дополнительно в коллекторах олекминской, толбачанской и эльгянской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля присутствует каустобиолитная насыщенность мальтами, нефтью и жидкими битумами, что также не позволяет использовать классические методы определения, без внесения большого ряда допущений и упрощений.

Перечисленные натурные наблюдения и последующий анализ влияния разрывных нарушений на проводимость коллекторов, и как следствие, прогнозные параметры притоков природных рассолов, были выполнены лично автором для ключевых коренных месторождений, а именно трубок Интернациональная, Мир, Удачная, Юбилейная и Айхал. Рассмотрим результаты проведенных исследований для каждого месторождения в отдельности.

Структурно-тектоническое строение шахтного поля месторождения трубка Интернациональная изучено по результатам глубокого бурения гидрогеологических, структурных, нефтеразведочных скважин, структурных поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом ГИС, наземными геофизическими исследованиями, а также инструментальными замерами элементов залегания основных и оперяющих тектонических нарушений, выполненными как на стадии открытой отработки месторождения, так и при подземной добыче (рис. 4.1). Глубинные разломы, несомненно, оказывают влияние на фильтрационные свойства пород в плане и разрезе, что подтверждается не только исследованиями автора, но и результатами ранее проделанных работ (Дроздов А.В., Алексеев С.В., Иост Н.А. и др.).

Влияние тектонических процессов двояко. С одной стороны, трещиноватость увеличивает фильтрационно-ёмкостные свойства пород, а с другой – залечивание дизъюнктивов приводит к возрастанию экранирующих поверхностей и зон вторичной минерализации. Учёт данных факторов требует проведение исследований с необходимой детализацией.

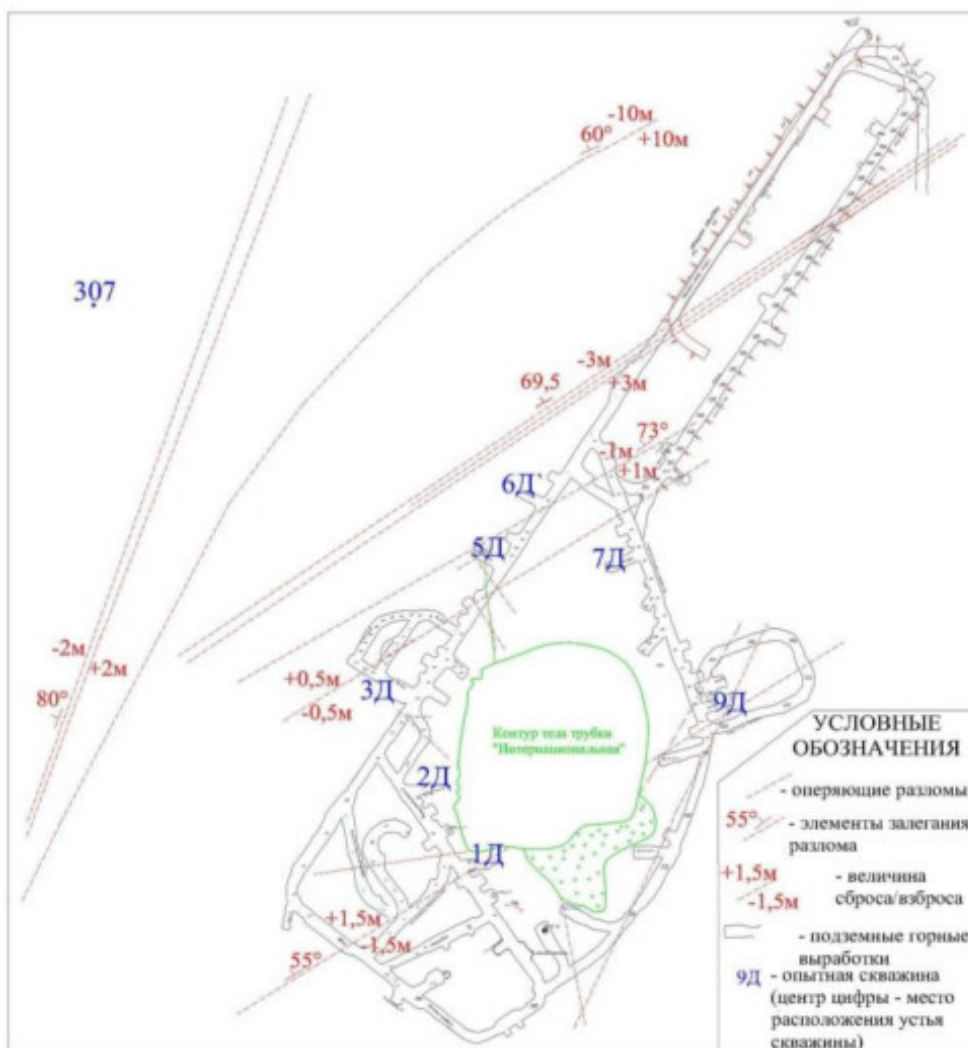


Рис. 4.1. Тектонические нарушения в пределах шахтного поля рудника Интернациональный<sup>22</sup>

Влияние тектонических нарушений на толщину вмещающих пород определялось при помощи планового изменения параметра водопроницаемости, определение которого выполнялось при анализе гидродинамического режима и проницаемости пластов-коллекторов толбачанской свиты. Непосредственно в околотрубном пространстве месторождения, было выделено несколько различных блоков-зон. Для выделения блоков-зон были использованы одиночные выпуски по сети скважин, пробуренных в подземных горных выработках (ПГВ) рудника «Интернациональный» на горизонте -790 м. Опорными скважинами были выбраны №№ 1Д, 2Д, 3Д, 5Д, 6Д, 7Д и 9Д [467; 504]. Данные скважины являются совершенными по качеству вскрытия описанных коллекторов, поэтому полученные параметры будут в целом правомочны для

<sup>22</sup> Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

изучаемого объекта (коллекторы толбачанской свиты). Расположение опытных скважин относительно кимберлитового тела трубки «Интернациональная» и выделенных в процессе работ оперяющих разломов приведено на рисунке 4.2.

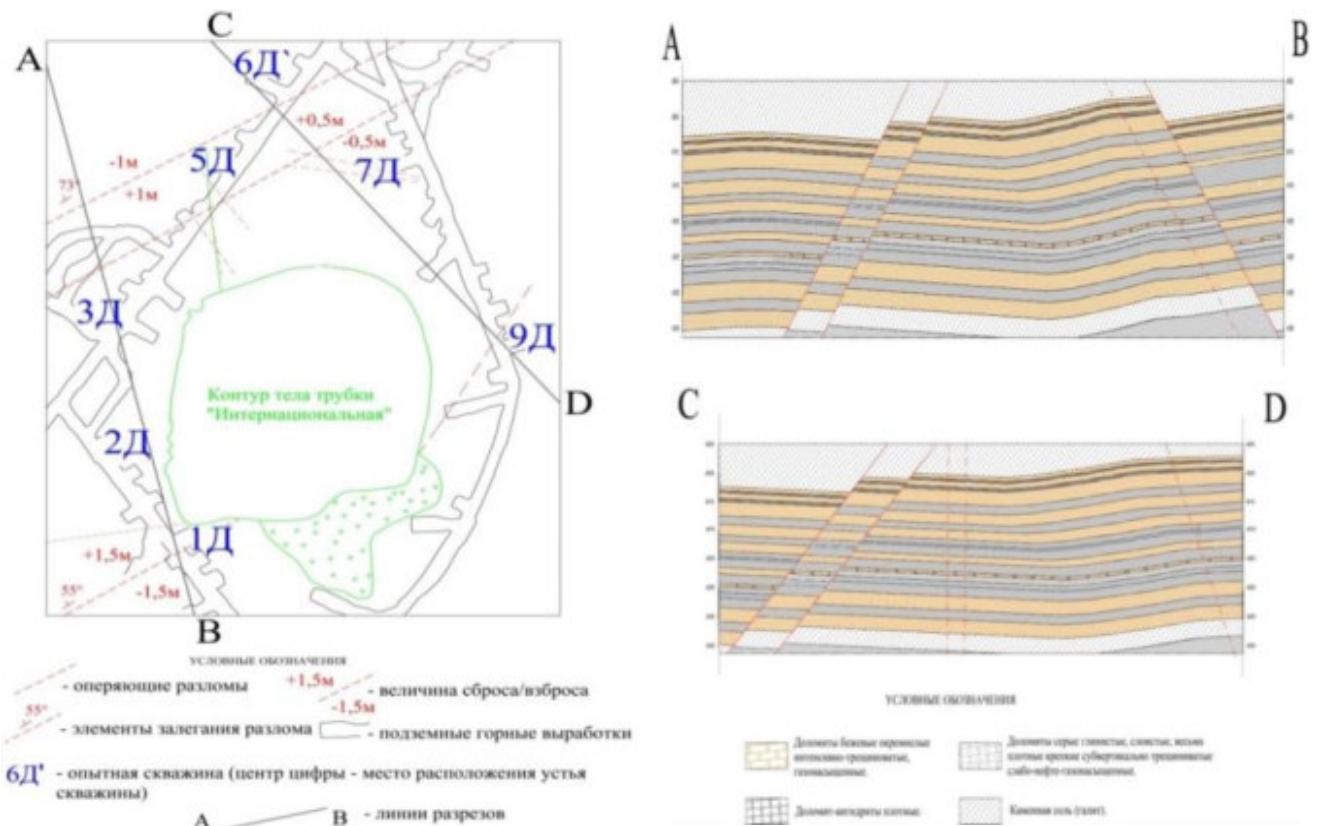


Рис. 4.2 Расположение опытных скважин на горизонте -790 м относительно тела трубки «Интернациональная» и выделенных в процессе работ оперяющих разломов<sup>23</sup>

Определение фактических притоков выполнялось в процессе проведения исследований, для этого опытные скважины оборудовались расходомерами, дополнительно использовалась тарированная через 100 л емкость, объемом в 1 м<sup>3</sup>. Пересчет прогнозных притоков производился по формуле (4.1), результаты приведены в табл. 4.1.

Схематично в плане схему водопритоков для объекта исследований можно представить следующим образом (рис. 4.3). Блок-зона №1, в ней расположены скважины №№ 3Д, 5Д и 6Д. Охарактеризовывает зону сложного структурно-тектонического строения, приуроченного к малоамплитудному тектоническому нарушению, фиксируемому по наличию сближенных кимберлитовых жил, ступенчатых сбросов и флексурным перегибам слоёв. Данная зона характеризуется наибольшей величиной фактических притоков до 46,2 м<sup>3</sup>/сут;

<sup>23</sup> Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016;  
 Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017;  
 Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Таблица 4.1 - Полученные притоки природных рассолов (по [393] с дополнениями)

№ скважины	Блок-зона	Плановое расположение	Прогнозный приток, м <sup>3</sup> /сут
1Д	№3	Ю	9,5
2Д	№4	З	5,2
3Д	№1	СЗ	26,8
4Д	№4	З	4,4
5Д	№1	С	46,2
6Д	№1	С	18,6
7Д	№2	СВ	9,8
9Д	№2	В	12,9
10Д	№2	ЮВ	12,1
11Д	№3	Ю	7,2
12Д	№3	Ю	7,0
20гм	№3	Ю	7,1

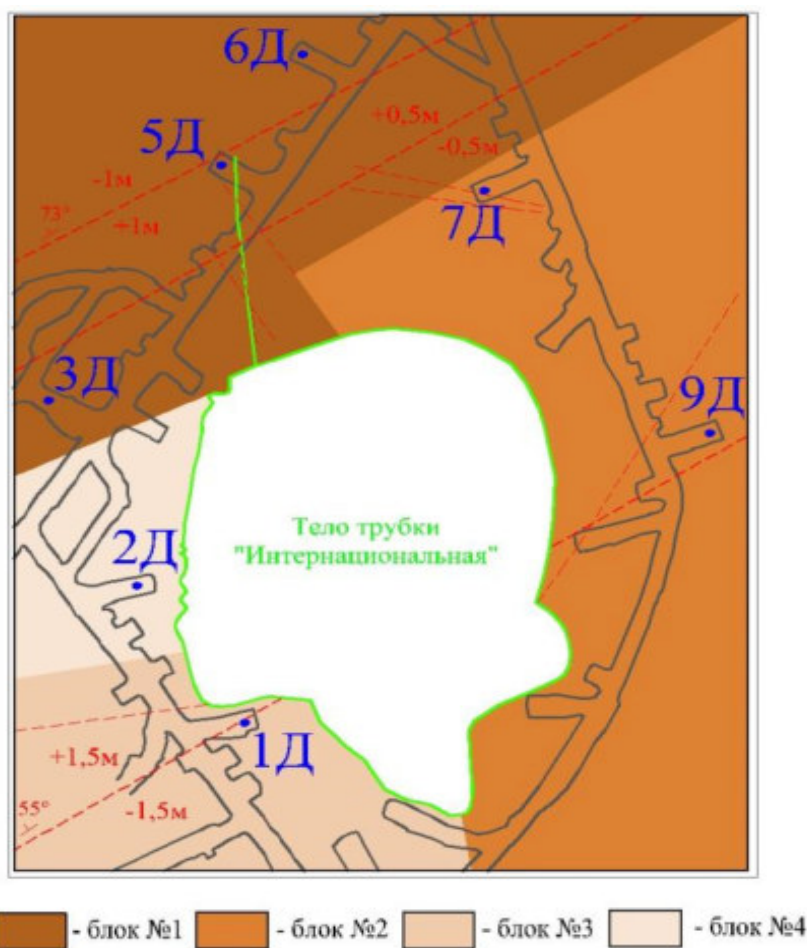


Рис. 4.3 Плановое расположение блоков-зон, водообильности коллекторов толбачанской свиты в пределах зоны динамического воздействия месторождения «Интернациональная»<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016;

Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017;

Янников А.М. Информационный отчет о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Блок-зона №2, в которой расположены скважины №№ 7Д, 9Д и 10Д, характеризует зону оперяющих разломов, зафиксированного малоамплитудного тектонического нарушения. Характеризуется величиной фактических притоков до 12,9 м<sup>3</sup>/сут;

Блок-зона №3, в которой расположена скважины №№ 1Д, 11Д, 12Д и 20гм характеризует зону сложного структурно-тектонического строения, приуроченного к малоамплитудному тектоническому нарушению, фиксируемому по наличию сближенных кимберлитовых жил, ступенчатых сбросов (до 1,5 метров) и флексурным перегибам слоёв. Характеризуется величиной фактических притоков до 9,5 м<sup>3</sup>/сут;

Блок-зона №4, в которой расположена скважины №2Д и №4Д, характеризует зону, не осложнённую оперяющими разломами или малоамплитудными тектоническими нарушениями. Характеризуется наименьшей величиной фактических притоков до 5,2 м<sup>3</sup>/сут.

Выделение рассмотренных зон выполнялось не только по описанным опорным скважинам, но и с учётом полученных притоков при проходке подземных горных выработок в отм. -790/-900 м, т.к. их проходка также сопровождалась опережающим шпуровым бурением.

Проведённые исследования и выполненные расчёты позволили сделать вывод, что водобильность коллекторов толбачанской свиты в пределах околотрубчатого массива месторождения «Трубка Интернациональная» на удалении 5–110 м от тела напрямую зависит от малоамплитудной тектоники, оперяющих разломов и блоковых дислокаций, непосредственно связанных со структурно-тектоническим строением изучаемого участка [369; 372; 373].

Выявленные закономерности распределения прогнозных притоков, по мнению автора, справедливы и для вышележащих олекминского и метегеро-ичерского водоносных комплексов, т.к. данный факт подтверждается косвенными результатами гидродинамического моделирования, в части прогнозного опережающего водопонижения в интервале обводненных метегеро-ичерским водоносным комплексом эксплуатационных блоков.

Решение фильтрационной задачи осуществлялось с использованием лицензионного пакета прикладных программ GMS, входящей программы MODFLOW, а с 2021 года в ПО FEFLOW, реализующей пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных разностей в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону ГУ I, II и III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе и инфильтрации [144; 444; 445; 446; 449]. Моделирование гидрогеологических условий проведено для определения сроков сработки ёмкостных параметров 8-го коллектора МИВК с целевым понижением уровня до отметки +0 м в пределах эндо- и экзоконтактов рудного тела и вмещающих пород, то есть непосредственно в пределах 50-70 м от кимберлитовой трубки. Выбор варианта опережающего водопонижения произведет посредством дренажных скважин, сооруженных и оборудованных с отметки -145 м абс. В результате проведенного моделирования,

изменение пьезометрической поверхности, возле каждой эксплуатационной скважины несколько отличалось, причём скважины, соотнесённые с зонами №3 и №4, формировали более выраженные депрессионные воронки, связанные с более низкой локальной обводнённостью. А по скважинам, расположенным на северо-северо-восточных флангах месторождения прогнозировалась более высокие дебиты. Прогнозные уровни в дренажных скважинах в зависимости от блока составляли от -15,1 м до -28,2 м.

Территория шахтного поля трубки Мир приурочена к субмеридиональной зоне влияния Параллельного разлома, входящего в Мирнинскую ветвь Вилюйско-Мархинских региональных тектонических нарушений [185]. В карьере трубки Мир Параллельный разлом проявился во вмещающих породах зоной дробления с вертикальным падением, мощностью до 30 м. В кимберлитах эта зона не фиксируется. По результатам магнитной съёмки и данным разведочных работ осевая часть разлома выполнена на глубине дайкой долеритов. Контакт дайки с кимберлитами был зафиксирован в карьере на горизонте +10 м. Дайка мощностью 35 м примыкает к рудному телу с юга в северо-западной части, продолжение дайки на север карьером не было вскрыто. Простираение дайки близко к субмеридиональному, падение крутое (80-85°) западное. По пространственному взаимоположению трубки и дайки, а также по повышенному содержанию траппового материала в кимберлитах в зоне их контакта с долеритами установлено, что внедрение дайки предшествовало формированию кимберлитового тела (рис. 4.4).

По данным бурения параметрических и сейсморазведочных работ в районе трубки Мир абсолютные отметки поверхности пород кристаллического фундамента не испытывают существенных изменений в плане и составляют -1820 ÷ -1850 м.

По результатам исследований кимберлитовые тела в пределах изучаемого участка расположены в центре куполовидной структуры, образованной вмещающими карбонатными породами на общем фоне их моноклиального залегания. Куполовидная структура размером 1,5 x 2,5 км вытянута в северо-западном направлении и осложнена брахиантиклинальной складкой субмеридионального простирания. Длина складки около двух км, ширина 300–400 м, падение крыльев 8-10°, погружение замковых частей складки пологое (6–8°). В центре брахиантиклинали расположена трубка Мир, а вдоль ее осевой линии прослеживается ряд сбросов с амплитудой смещения до 2–6 м.

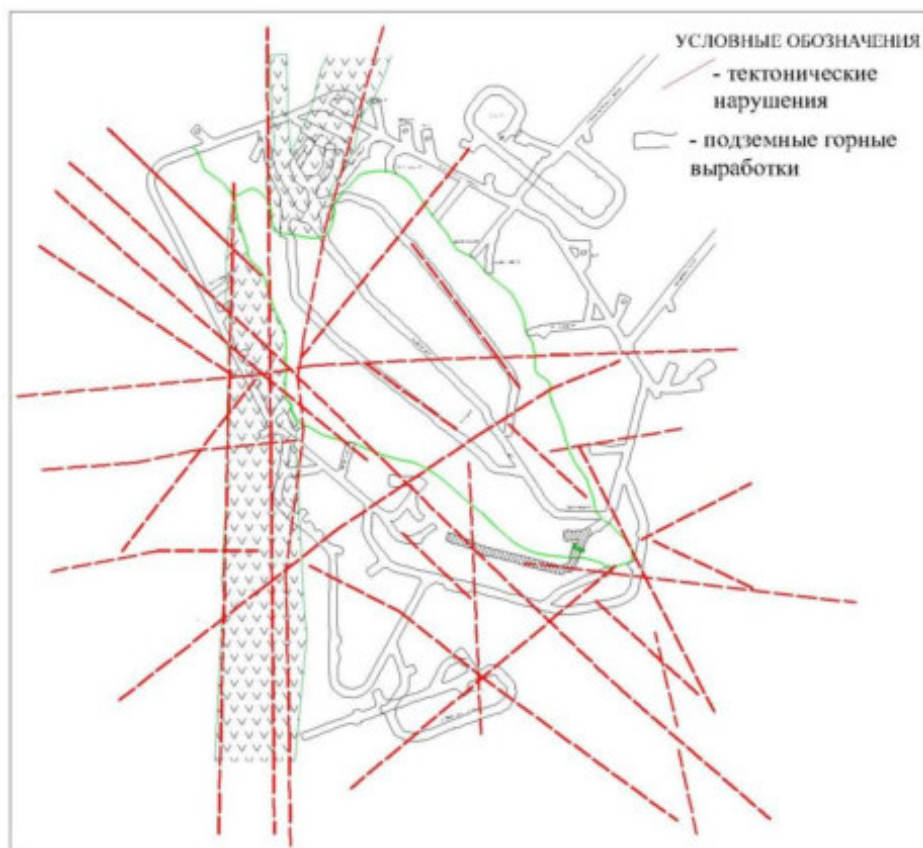


Рис. 4.4 Тектонические нарушения во вмещающих породах и кимберлитах месторождения Мир [393]

В свою очередь, брахиантиклиналь осложнена рядом мелких складок более низкого порядка. Наиболее интенсивно микроскладчатость проявилась между трубками Мир и «Спутник». Длина отдельных складок достигает 50–150 м, крылья – 20–60 м. Складки чаще всего асимметричные, с более пологими внешними крыльями. Оси складок обычно ориентированы по касательной к кимберлитам. Углы падения пластов пород на крыльях складок достигают 10–20°. В северной, северо-западной и северо-восточной частях по приконтактовым зонам наблюдаются многочисленные флексуры и перегибы. С восточной, южной и западной сторон складчатая тектоника проявлена в меньшей степени [192; 215; 255; 256; 257].

В настоящее время во вмещающих породах в пределах шахтного поля выделяются три значимых системы тектонических нарушений, характеризующихся значительными амплитудами смещений пластов. Первая система связана с зоной динамического воздействия Параллельного разлома, маркируется развитием зон брекчирования мощностью 10–15 м и имеет простирание 10–20°, падение под углом 80–85°. По этому нарушению наблюдается смещение пластов, с суммарной амплитудой смещения до 10–20 м, отмечается сульфидная минерализация. Вторая система нарушений проявлена менее интенсивно. Азимут простирания 50–60°, падение под углом 70–85°. Максимальная амплитуда смещения по крутым углам падения не превышает 6 м.

Нарушения третьей развиты ограниченно, и приурочено к кимберлитам, дайке долеритов и зонам эндо- и экзоконтактов данных интрузий. Трещиноватость вмещающих пород уменьшается по мере удаления от контакта с рудным телом. В приконтактной зоне (5–10 м) во вмещающих породах установлена радиальная и концентрическая трещиноватость. Концентрические трещины ровные, прямолинейные; радиальные (трещины отрыва) – с неровной (рваной) поверхностью. Интенсивность трещиноватости от 3 до 20 на 1 п. м. Трещиноватость, фиксируемая в кимберлитах и долеритах, в целом коррелируется с ориентировкой трещин во вмещающих породах, формируя прослеживаемые зоны, маркирующиеся подчинёнными опережающими нарушениями.

Выявление разрывных нарушений на водопритоки было рассмотрено на основе системы опережающего водопонижения карьера Мир, эксплуатация которой осуществлялась с 1978-1988 гг. В результате определения фактических водопритоков шахтное поле месторождения можно разделить на 3 блока-зоны (рис. 4.5).

Блок-зона №1, приуроченная к северному и северо-восточному флангам месторождения, коррелируется с зоной динамического воздействия Параллельного разлома (северной его части). Площадь зоны ~ 9,22 млн. м<sup>2</sup> (31% от общей площади карьерного поля). Контролируется и прослеживается развитием зон брекчирования мощностью от 10 до 15 м. Характеризуется простиранием 10–20°, и углом падения 80–85°.

Для рассматриваемой зоны характерны 7 групп разрывных нарушений, фиксирующихся по смещению пластов, с суммарной альтитудой смещения от 2 до 10–20 м. Наиболее амплитудное тектоническое нарушение контролируется дайкой долеритов и флексурным перегибом слоёв. Подчинённые разрывные нарушения, как правило, ступенчатыми сбросами. В качестве опорных в данной зоне выступают эксплуатационные и наблюдательные скважины №№ 11 в/п, 12 в/п, 13 в/п, 14 в/п, 17 в/п, 20 в/п, 31 в/п, 32 в/п, 3 нс, 4 нс и 5 нс, имеющие высокие (для объекта изучения) значения  $T = 100–125 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Необходимо отметить, что в период эксплуатации системы опережающего водопонижения, скважины, расположенные в данной зоне, откачивали от 650 до 700 м<sup>3</sup>/час или 49% от суммарной производительности.

Блок-зона №2 приурочена к зоне динамического воздействия кимберлит контролирующего разлома. Площадь зоны ~ 9,5 млн. м<sup>2</sup> (34% от общей площади карьерного поля). Контролируется и прослеживается развитием зон брекчирования мощностью от 2 до 5 м. Характеризуется азимутом простирания от 50 до 60° и углом падения 70–85°. Для рассматриваемой зоны характерны 6 групп разрывных нарушений, фиксирующихся по смещению пластов, с суммарной альтитудой смещения от 2 до 5 м.

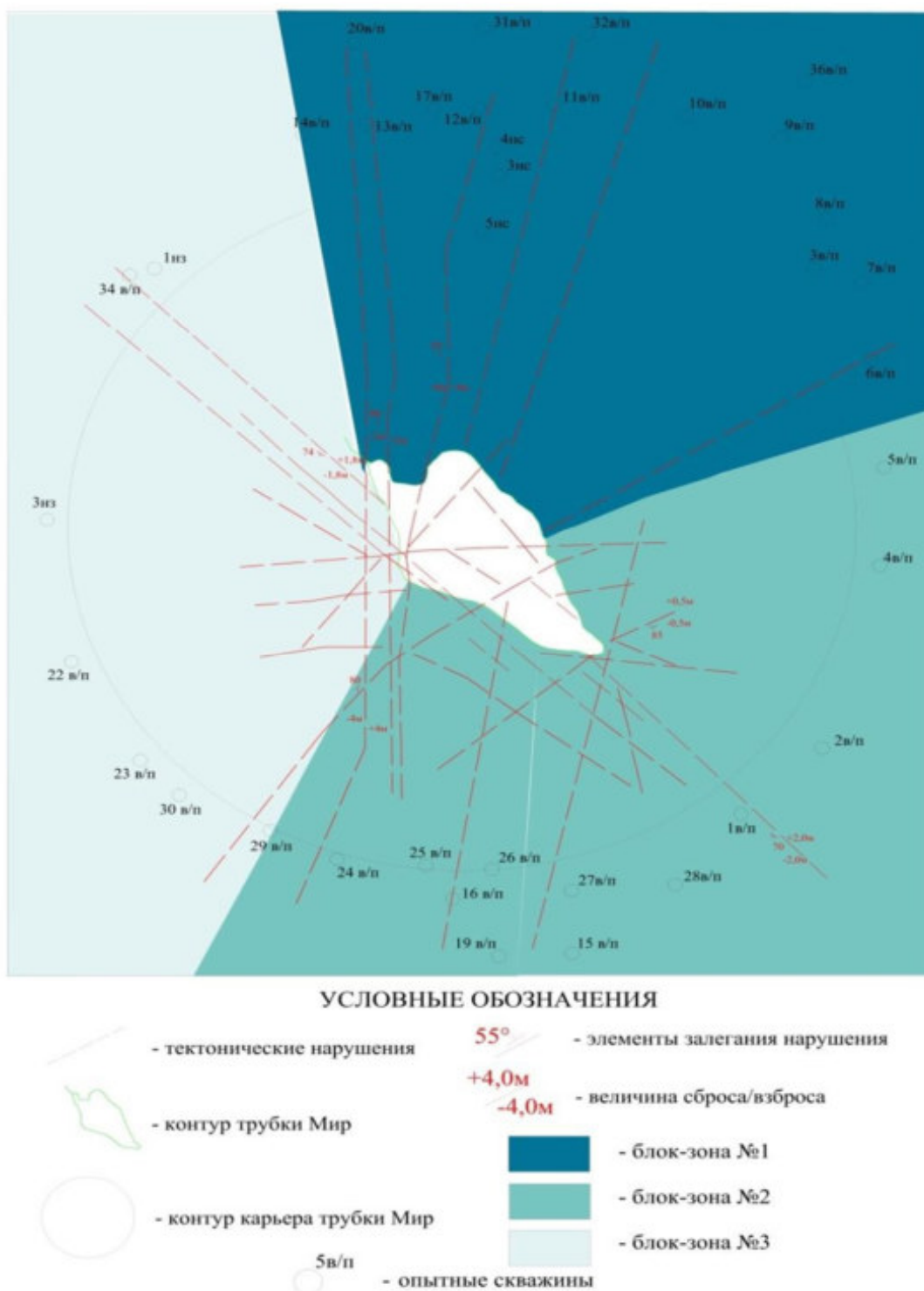


Рис. 4.5 Плановое расположение блоков-зон водообильности коллекторов ичёрской свиты в пределах зоны динамического воздействия месторождения «Мир» (сост. Янников А.М.)

Наиболее амплитудные тектонические нарушения, контролируются, как правило, флексурными перегибами слоёв и надвигами. Подчинённые разрывные нарушения, как правило, ступенчатыми сбросами. В качестве опорных в данной зоне использованы эксплуатационные и наблюдательные скважины №№ 1 в/п, 15 в/п, 27 в/п и 28 в/п, имеющие наибольшие (для объекта изучения) значения  $T = 50-150 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Необходимо отметить, что в период эксплуатации системы

опережающего водопонижения, скважины, расположенные в данной зоне, откачивали от 400 до 430 м<sup>3</sup>/час или 33% от суммарной производительности системы осушения.

Блок-зона №3, в рамках данной зоны выделяется 3 системы разрывных нарушений. Все разрывные нарушения представлены малоамплитудными взбросами (до 1 м) или системами субвертикальной трещиноватости, проявлений складчатой тектоники в рамках зоны не зафиксировано. Площадь зоны ~ 9,9 млн. м<sup>2</sup> (35% от общей площади карьерного поля). В качестве опорных в данной зоне выступают эксплуатационные и наблюдательные скважины №№ 22 в/п, 23 в/п, 30 в/п, 33 в/п, 1 ню, 2 ню, 3 ню и 3 нз, характеризующиеся средним значением Т ~ 20 м<sup>2</sup>/сут. В период эксплуатации системы опережающего водопонижения, скважины, расположенные в данной зоне, откачивали порядка 200–240 м<sup>3</sup>/час или 18% от суммарной производительности.

Влияние разрывных нарушений на водообильность коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса наглядно могут быть представлено в виде круговых диаграмм (рис. 4.6). Параметры притока определялись в процессе гидрогеологического моделирования (подробное описание модели приведено в главе 6).



Рис. 4.6 Сопоставление прогнозного, при условии отсутствия влияния разломов (слева), и фактического, с учётом влияния разрывных нарушений (справа), распределения притоков из коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса (сост. Янников А.М.)

Как видно из представленных диаграмм, несоответствие прогнозных притоков, рассчитанных из допущения, что коллекторы характеризуются однородными фильтрационными свойствами, и фактически наблюдаемых значений, характерно для всех зон [426].

Изучение влияния пространственного расположения тектонических нарушений на обводненность данного месторождения, а также выделение плановой неоднородности, выполнялась Дроздовым А.В., с привлечением специалистов ИЗК СО РАН (Алексеев С.В., Гладков А.С. и др.), причем объектом изучения выступали вмещающие отложения, преимущественно до отм. -480 м, т.к. более глубокозалегающих горных выработок на месторождении на тот момент не было, а ниже залегающие толщи описывались только по

региональным нефтепоисковым и разведочным скважинам. Результатом работ явилось построение обобщенных схем в плане и в разрезе (рис. 4.7).

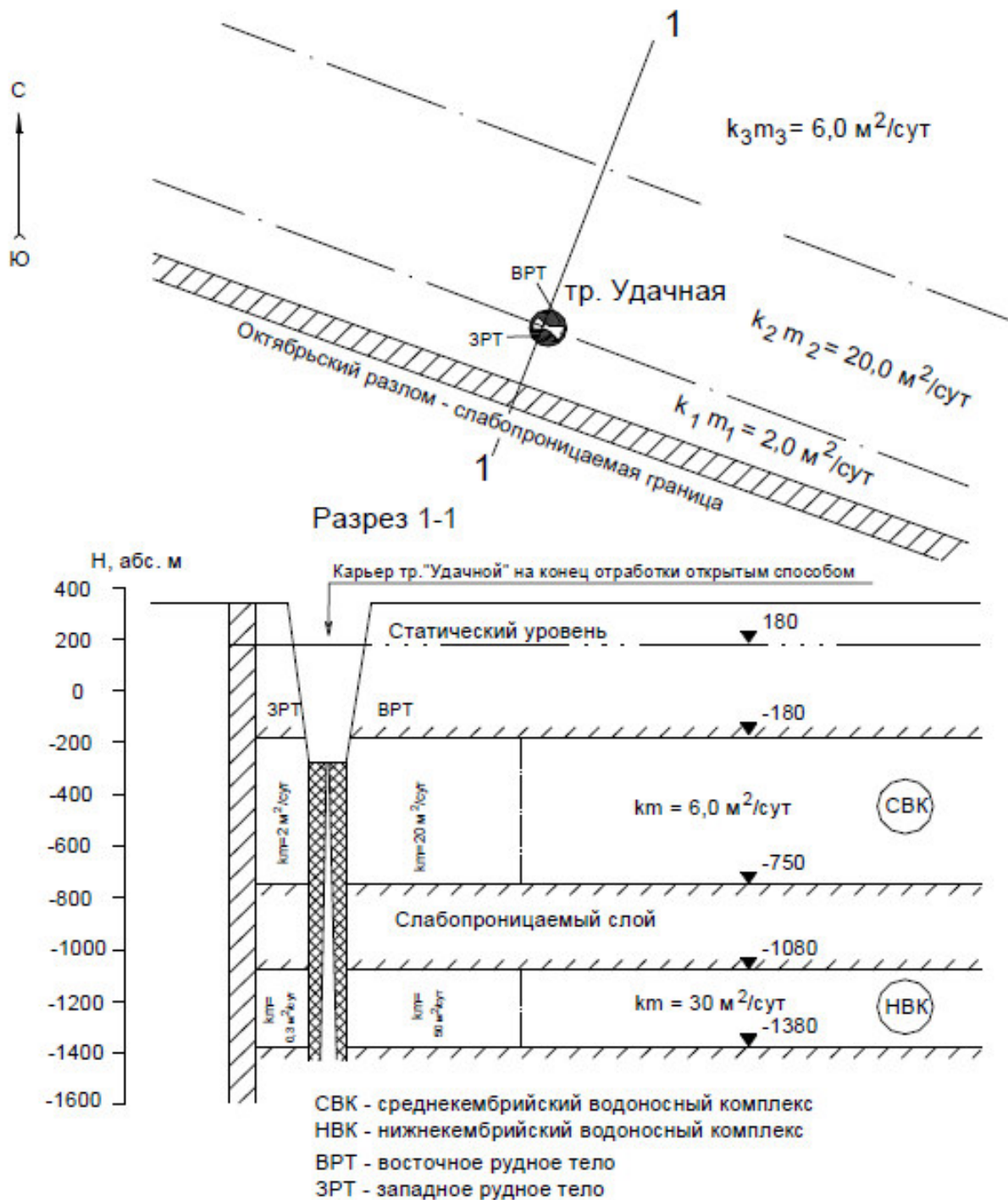


Рис. 4.7 Схематизация гидрогеологических условий трубки Удачная [166]

При анализе проведенных ранее работ, обращает на себя внимание их недостаточная детализация, т.к. при построении планового расположения объекта исследований, учитывалась целиком зона Далдынской флексуры, что, учитывая масштаб структурных элементов, делает данную схематизацию по сути региональной, охватывающей в плане порядка 20 км. Наличие разно порядковых тектонических нарушений требует выделения более низкоранговых зон, в том

числе и по параметрам проводимости. Столь существенная детализация необходима для выбора оптимального планового расположения капитальных выработок, а также ведения горно-подготовительных работ и работ по опережающему водопонижению в более благоприятных условиях, с непосредственным учётом структурно-тектонического фактора.

Структурно-тектоническое строение шахтного поля трубки «Удачная» в рамках проведенных исследований было уточнено по результатам глубокого бурения гидрогеологических, структурных, нефтеразведочных скважин, структурных поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом ГИС, наземными геофизическими исследованиями, а также инструментальными замерами элементов залегания основных и оперяющих тектонических нарушений, выполненными на стадии открытой отработки месторождения (рис. 4.8).



Рис. 4.8 Тектонические нарушения в пределах шахтного поля трубки «Удачная» [408]

Дизъюнктивные структуры (разломы и трещины) являются основным фактором, определяющим блочную делимость горных пород, степень их устойчивости, а также отвечают за распределение и циркуляцию подземных вод в горном массиве. Поэтому информация об особенностях строения разломных зон и распределения трещин в массиве необходима для оценки вероятности возникновения ослабленных зон.

Непосредственное сопоставление выделенных зон (по Дроздову А.В.) притоков, применительно к детальности проводимых исследований приведено на рис. 4.9. В 2019 г. специалистами ИЗК СО РАН были выполнены специализированные тектонофизические и геолого-структурные работы на месторождении трубки «Удачная». Результаты этих работ свидетельствуют о том, что тектоническая структура участка локализации трубки «Удачная» осложнена многочисленными субвертикальными (углы падения  $60^\circ$  и более), наклонными (углы падения  $30-60^\circ$ ) и субгоризонтальными (углы падения менее  $30^\circ$ ) разрывными нарушениями различной мощности и морфологии.

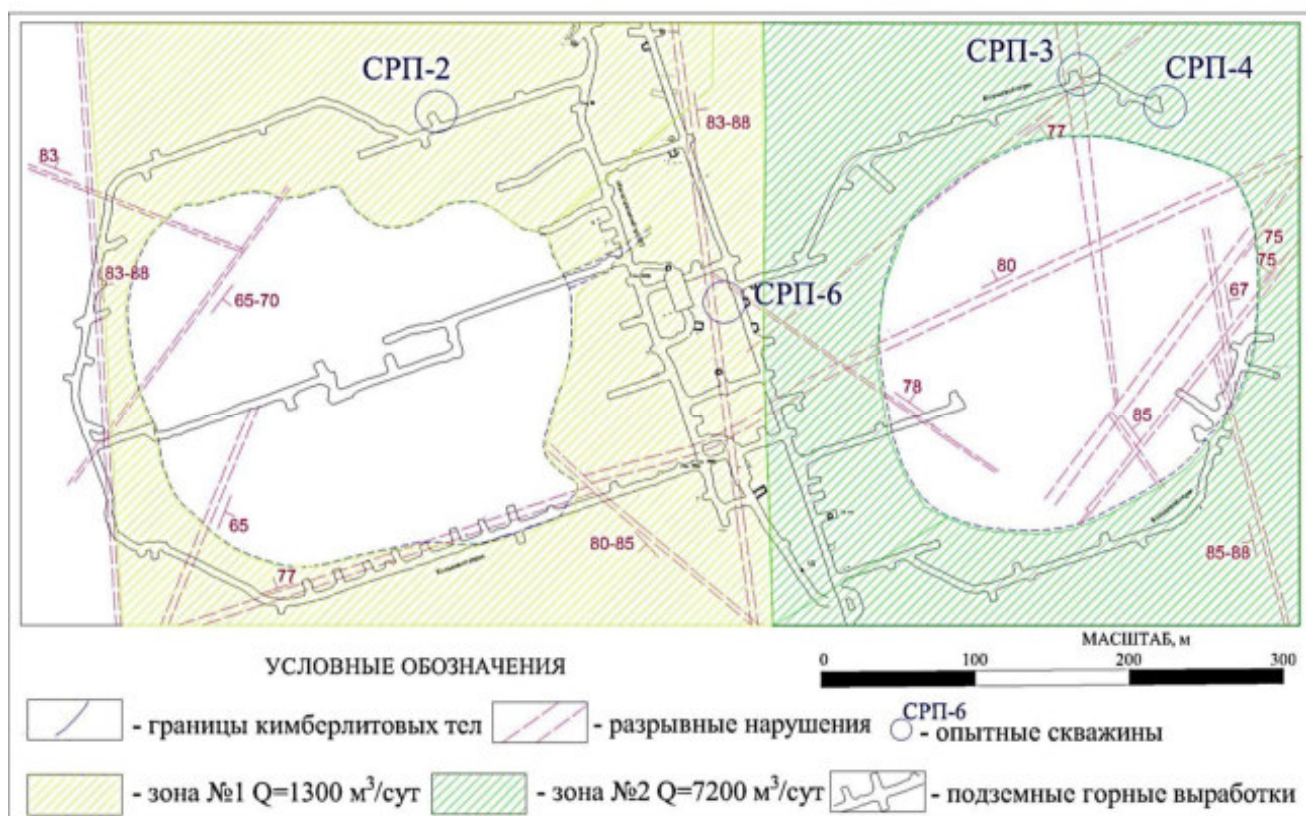


Рис. 4.9 Плановое расположение блоков-зон водообильности среднекембрийского водоносного комплекса (по Дроздову А.В.) до отнм -750 м относительно тела трубки «Удачная» и выделенных в процессе работ оперяющих разломов (составлена по материалам МСШСТ и Удачинского ГОКа) [408]

Разрывные нарушения представляют собой участки горного массива, которые в каждом конкретном случае могут быть выражены зонами повышенной трещиноватости, дробления, брекчирования, милонитизации, тектонического расланцевания. Мощность таких зон колеблется от нескольких см до десяти и более метров. Разрывы первой группы создают блоковую делимость массива и служат вертикальными границами отдельных блоков, а разрывы последней группы являются их горизонтальными границами. Общая структура субвертикальных зон, развитых в пределах участка локализации трубки «Удачная» следующая: в приконтактной

части как в рудном теле, так и во вмещающих осадочных толщах развиты разрывы преимущественно северо-восточной ориентировки. Местами они образуют зоны сгущения и являются путями миграции газов и рассолов. По мере удаления от рудных тел определяющее значение в разрывной структуре приобретают разломы северо-западной ориентировки, которые в околоствольном пространстве сменяются разрывами север-северо-западного направления. Часть из них также насыщена газом, водой и нефтью. Наклонные разрывные нарушения менее развиты в массиве, нежели субвертикальные субгоризонтальные. По внешнему виду они представляют собой зоны повышенной трещиноватости или расланцевания мощностью от 0,7 до 5–8 м, в редких случаях до 10 м. Большая часть зафиксированных наклонных зон располагается по периферии рудных тел (как в пределах кимберлитов, так и во вмещающих толщах), а углы падения направлены к их центральным частям трубок.

На рисунке 4.10 наглядно продемонстрировано воздействие разрывных нарушений на формирование коллекторских свойств карбонатных пород. На левом керне, поднятом со скважины СРП-6 в отметках известняково-доломитовой толщи – отмечаются открытые каверны, развившиеся по системе субвертикальных открытых трещин. Керновые образцы справа - подняты при проходке скважины СРП-2 и приурочены к известняково-доломитовой толще (верхний) и удачининской свите (нижний), демонстрируют возникновение экранирующих свойств разреза из-за «залечивания» систем трещиноватости, образованных в предыдущие геологические периоды.



Рис. 4.10 Вмещающие породы в зоне тектонических нарушений  
(кern слева – открытые полости; образцы справа – трещины залечены) [408]

В результате сопоставления выявленных разрывных нарушений, фактических притоков, полученных по сети опытных скважин, карту притоков, шахтное поле месторождения было разделено на 3 зоны (рис. 4.11).

Зона №1 – вмещающие породы западного кимберлитового тела, данная зона характеризуется наименьшими прогнозными притоками  $Q = 1270 \text{ м}^3/\text{сут}$ . В данной зоне зафиксировано наименьшее количество оперяющих разломов (4 шт.), также для зафиксированных разломов характерна наименьшая альтитуа смещения, большинство наблюдаемых разрывных нарушений залечены гипсом и сульфидами.

Зона №2 – вмещающие породы межтрубочного блока, данная зона характеризуется наибольшим прогнозным  $Q = 3900 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Данная зона характеризуется наибольшей тектонической нарушенностью, причём для наблюдаемых разломов характерны альтитуды смещения (до 5 м), а также существенная открытая тектоническая трещиноватость вмещающих пород.

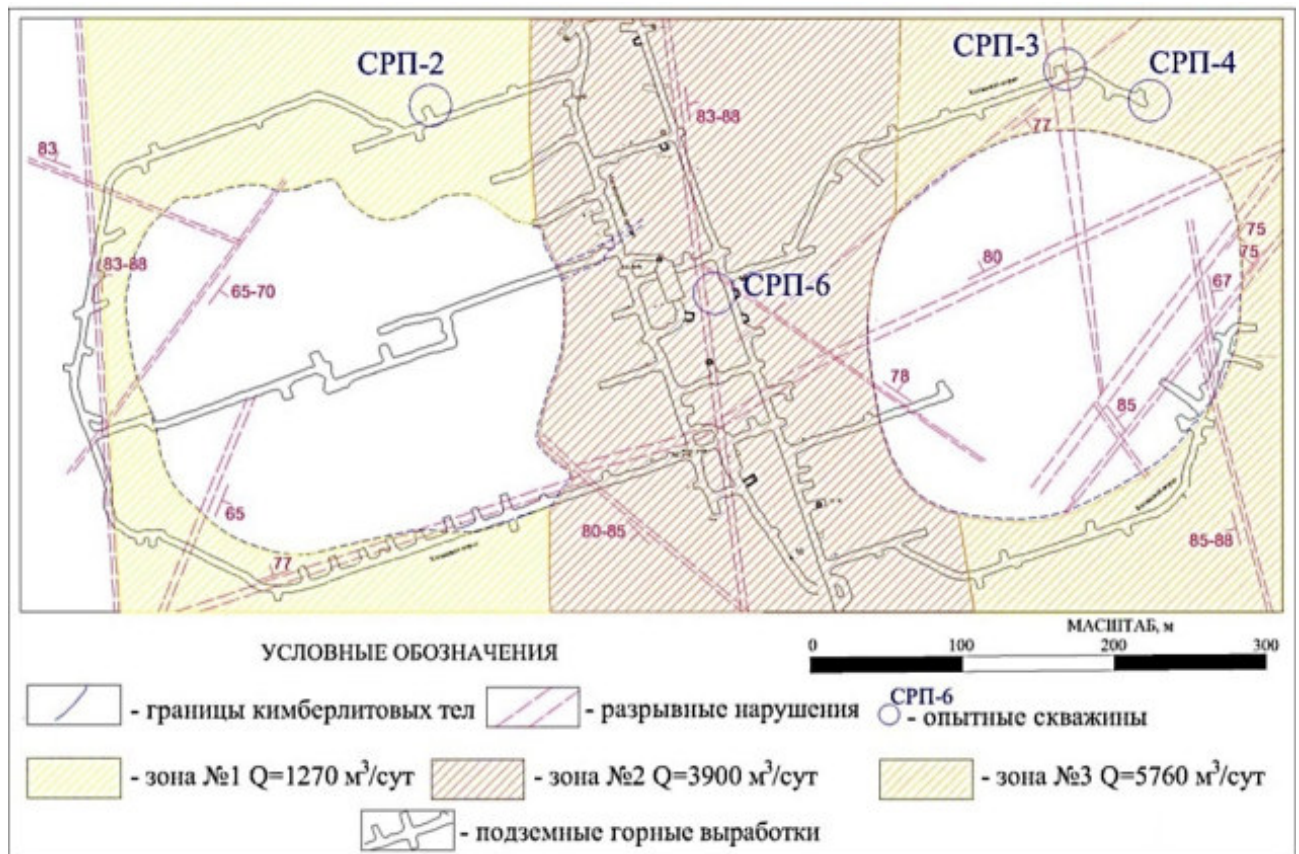


Рис. 4.11 Плановое расположение блоков-зон водообильности среднекембрийского водоносного комплекса в отм -465/ -750 м относительно тела трубки «Удачная» и выделенных в процессе работ оперяющих разломов (составлена по материалам МСШСТ и Удачинского ГОКа) [408]

Зона №3 – вмещающие породы восточного кимберлитового тела, данная зона характеризуется  $Q = 5760 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Столь значимая разница, по всей видимости, обусловлена

влиянием литолого-фациального и тектонического факторов, выделявшимися предыдущими исследователями [148-152; 157-161; 204; 205]. В пределах выделяемой зоны зафиксировано 8 взаимно пересекающихся оперяющих разломов, причём для точек узлового пересечения характерна потеря геофизической корреляции, а также обычны карбонатные брекчии, с большим количеством систем субвертикальных открытых трещин, достигающих 10–15 см.

При выделении указанных зон, использовались не только на данные, полученные в ходе проведения натурных испытаний, по сети совершенных по степени вскрытия к изучаемому интервалу, скважин, но и на результаты опережающего горизонтального бурения при строительстве капитальных подземных горных выработок в отн -465/-630 м (наклонные транспортные штреки, вскрывающие, откаточные выработки и т.д.). Системы вскрытия гор. -530 и -580 м полностью дублируют приведенную на рис. 4.8 схему подземных горных выработок гор. -480 м. Другими словами границы зон определялись, прежде всего, по пикетам проходки, по факту фиксации увеличенного притока природных рассолов из опережающих скважин.

Проведённые исследования, последующая корреляция и выполненные расчёты позволяют сделать вывод, что на проводимость коллекторов изучаемого интервала оказывает непосредственное воздействие малоамплитудная тектоника, проявленная в виде оперяющих разломов и блоковых дислокаций, непосредственно связанных со структурно-тектоническим строением участка, а также литолого-фациальные особенности изучаемых толщ. Указанные факторы достаточно тесно связаны со строением самой трубки Удачная, образованной в результате многофазных внедрений ультрабазитовых тел. Восточное тело, вмещающие породы которого характеризуются большей водопродимостью, сложено пятью типами кимберлита, оно также является уникальным по соотношению ксенолитов глубинных пород, как в массовом, так и в процентном соотношениях. Западное тело, вмещающие породы которого характеризуются меньшей проводимостью, сложено тремя типами кимберлита, образовавшимися в результате самостоятельных фаз внедрения. Породы межтрубья испытали наибольшее влияние от фаз внедрения при формировании кимберлитовых тел [93]. Что, по всей видимости, привело к формированию дополнительной открытой трещиноватости и дополнительной «свободной емкости» коллекторов данной зоны. Перечисленные факторы, вероятно, и сформировали условия по повышенному обводнению северного и северо-восточного флангов месторождения (45% притока природных рассолов, приходится на северо-восточную часть ВРТ, составляющую порядка 20% от площади шахтного поля месторождения).

Структурно-тектоническое строение карьерного поля трубки «Юбилейная» изучено по результатам глубокого бурения гидрогеологических, структурных, нефтеразведочных скважин, структурных поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом ГИС, наземными геофизическими исследованиями, а также инструментальными замерами элементов залегания

основных и оперяющих тектонических нарушений, выполненных на стадии открытой отработки месторождения (рис. 4.12).



Рис. 4.12 Тектонические нарушения в пределах карьерного поля трубки «Юбилейная» (по материалам Айхальского ГОКа и съемки ИЗК СО РАН) [406]

Представленные тектонические нарушения разделяются на три группы:

- первая группа субширотного простирания, связанная с локализацией кимберлитовой трубки «Юбилейная»;
- вторая группа дизъюнктивов север-северо-восточного простирания, они являются разно ранговыми нарушениями, указывающими на наличие этапа сжатия в широтном направлении;
- третья группа разнонаправленных разломов, являющихся оперяющими к первым двум группам.

Глубинные разломы, несомненно, оказывают влияние на фильтрационные свойства месторождения в плане и разрезе. Это подтверждается не только исследованиями автора, но и результатами ранее проделанных работ (Дроздов А. В., Алексеев С. В., Иост Н. А. и другие).

Влияние выявленных тектонических нарушений на толщину вмещающих пород определялось при помощи планового изменения параметра притоков по опытным скважинам. Определение которого проводилось при анализе гидродинамического режима и проницаемости пластов-коллекторов нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносных комплексов. По причине отсутствия подземных или открытых горных выработок в отметках коллекторов.

Выделение зон проводимости было выполнено на основании результатов опытно-фильтрационных работ, проведенных по скважинам разведки глубоких горизонтов месторождения. Непосредственно в околотрубочном пространстве месторождения было выделено несколько различных блоков-зон. Для выделения блоков-зон были проведены опытно-фильтрационные работы по сети скважин, пробуренных на разных стадиях разведки. Необходимо отметить, что наиболее проницаемые блоки были приурочены к северо-восточному флангу месторождения, в зоне динамического влияния Северо-Восточного кимберлит контролирующего разлома (рис. 4.13).

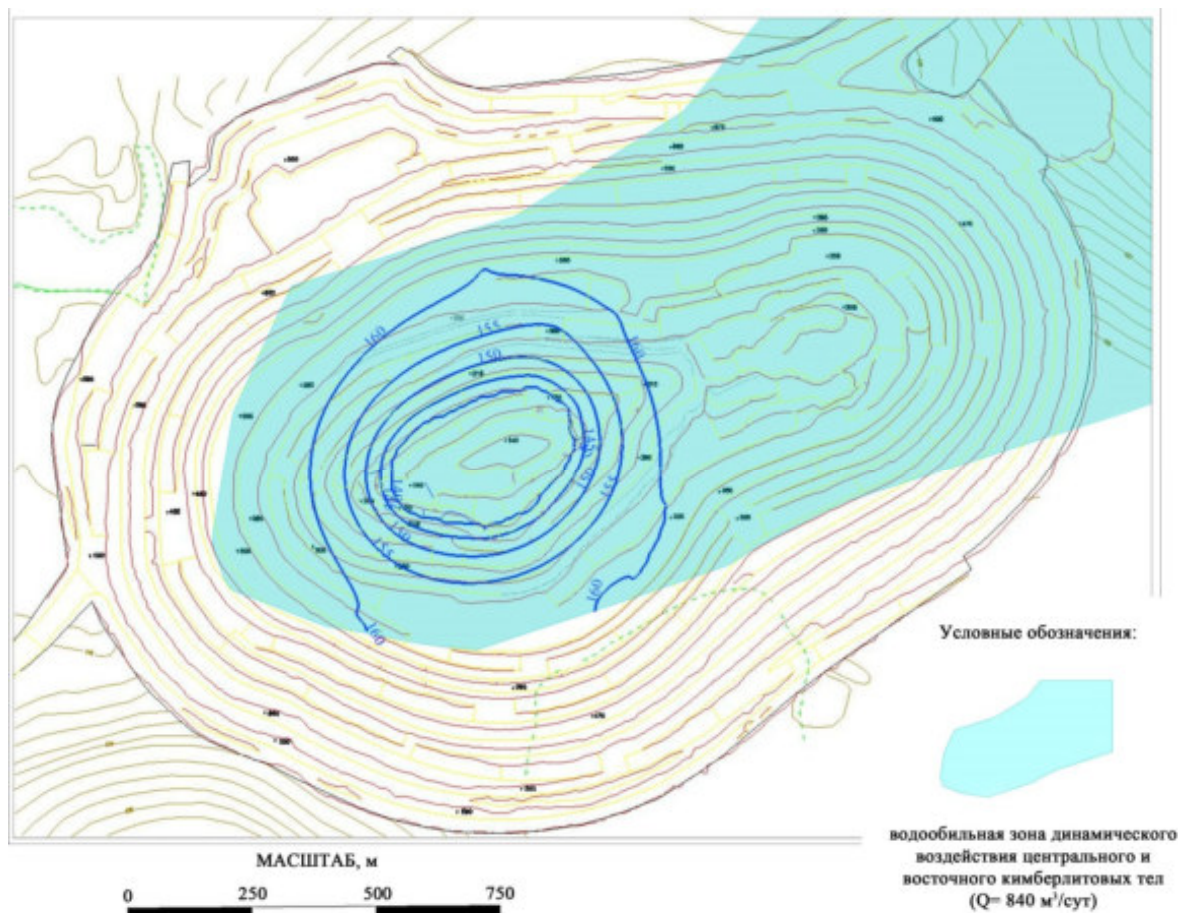


Рис. 4.13 Плановое расположение блоков-зон водообильности в пределах карьерного поля трубки «Юбилейная» [406]

Обозначенная на рис. 4.13 зона формирует 80% прогнозируемого к подземному руднику притока: 840 м³/сут из 1050 м³/сут. Её повышенная, применительно к объекту исследований, обводненность обусловлена тем, что контролирующие разрывные нарушения данных направлений представляют собой сдвиговые структуры, зоны которых состоят из серии кулис, протяжённых сколовых трещин, представленных зонами дробления. Все это приводило к формированию дополнительной ёмкости карбонатных пластов-коллекторов за счёт повышения открытой трещиноватости.

Разломно-блоковое строение шахтного поля месторождения Айхал представлено на рисунке 4.14.

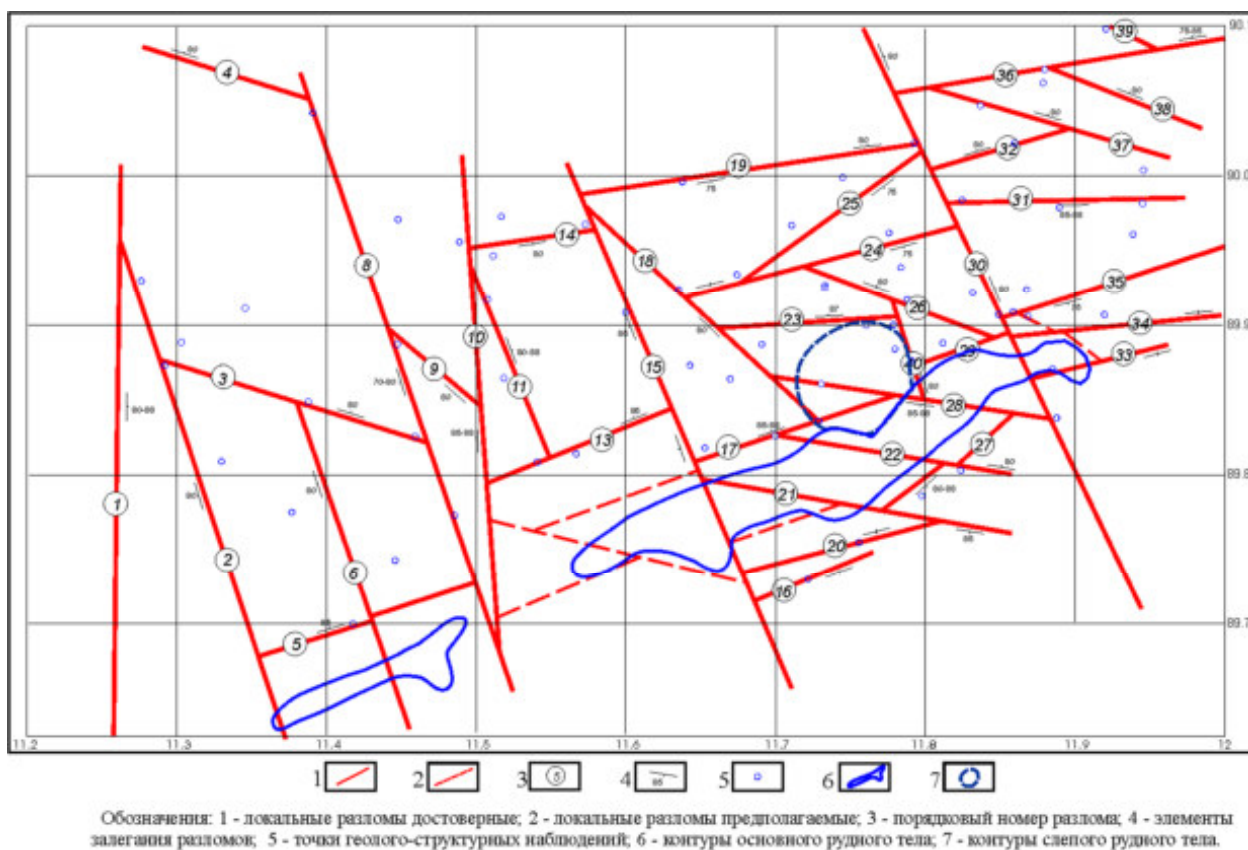


Рис. 4.14 Схема разрывных нарушений (составлена по материалам Айхальского ГОКа и съемки ИЗК СО РАН) [406]

Кимберлитовое тело приурочено к узлу взаимодействия зон разрывных нарушений (мощность в первые сотни метров) субширотного и северо-восточного направлений, формирование которых предшествовало внедрению кимберлитовой магмы. Строение участка осложняется наличием зоны трещиноватости северо-западного ( $290\text{--}300^\circ$ ) направления, которая имеет докимберлитное заложение и испытала синтрубочную активизацию. Во вмещающих отложениях (карбонатно-глинистых толщах) развиты послойные и косо секущие трещины, связанные с диагенезом пород. Согласно исследованиям, А. А. Потуроева, кимберлитовая трубка «Айхал» локализуется в трещинной зоне северо-восточного ( $40\text{--}70^\circ$ ) простирания, к которой приурочено валообразное инъективное поднятие того же направления. Формирование поднятия сопровождалось развитием во вмещающих породах околотрубочного пространства докимберлитовых парных диасистем трещин скола и ортосистем трещин отрыва. Рудное тело расположено в продольно-осевой зоне трещин отрыва. Синхронно с образованием диатремы предполагается формирование зоны сколовых трещин северо-западного простирания, а после образования диатремы – пологосекущих сколовых трещин.

Таким образом, результаты предыдущих и проведённых исследований свидетельствуют о сложной разломной структуре участка локализации трубки «Айхал», обусловленной взаимодействием разноориентированных разрывных нарушений. Блоки представлены трёх-, четырех- и, реже, пятиугольниками различной формы. Их размеры существенно варьируют, причём наиболее крупные блоки имеют место в западной части участка, а мелкие – на востоке. Проведённые исследования позволяют заключить, что это связано не столько с различием в плотности сети наблюдений, сколько с более высокой степенью дислоцированности восточной половины изучаемой площади, которая обусловлена внедрением рудного тела, осложнённого субгоризонтальной апофизой (слепое тело). Количество субвертикальных систем трещин, имеющих место в каждом из изученных блоков, варьирует от трёх до семи, составляя 3 – в семи блоках, 4 – в 15 блоках, 5 – в пяти блоках, 6 – в трёх блоках и 7 – в одном блоке. Преобладание блоков с четырьмя системами согласуется с отмеченным ранее доминированием четырёхугольных в плане блоков, что также, как и предыдущий вывод, связано с трассированием разломных ограничений блоков зонами распространения троек-систем трещин. Это ещё раз подчёркивает определяющую роль разломных зон в структуре месторождения «Айхал» [389; 410].

Непосредственно в подземных горных выработках описываемые разрывные нарушения выглядят в виде зон дробления (рис. 4.15), задиров пластов и микрофлексур (рис. 4.16), также часть разломов относится к сбросово-взбросовым и имеют амплитуду смещения пластов (рис. 4.17).



Рис. 4.15 Зона дробления, зафиксированная в подземных горных выработках [406]

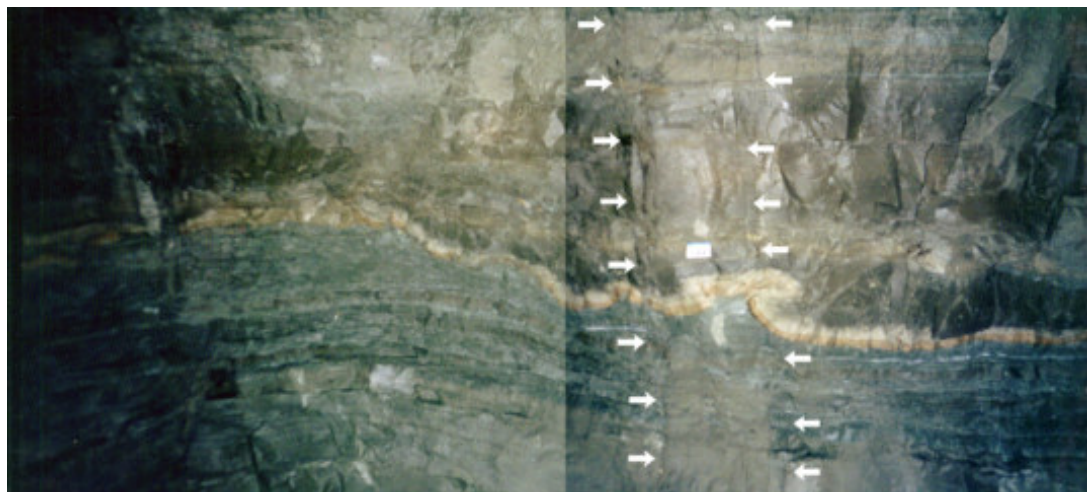


Рис. 4.16 Микрофлексура, зафиксированная в подземных горных выработках [406]



Рис. 4.17 Разрывное нарушение сбросового типа, зафиксированное в подземных горных выработках [406]

Разрывные нарушения формируют увеличенную ёмкость пластов-коллекторов непосредственно в зонах динамического воздействия и на небольшом удалении от них (до 10–15 м). Незначительные мощности выделяемых зон обусловлены в первую очередь низко ранговым характером изучаемых разломов, а также физико-механическими свойствами вмещающих пород. Рассмотрим аспекты влияния применительно к вскрываемым подземными горными выработками рудника Айхал. В рамках изучаемого интервала выделяется до 5 коллекторов, состоящих из серий нескольких маломощных пластов-пропластков, суммарная мощность всех коллекторов редко достигает 10 м. В виду иммобилизационного характера сформированных линз, каждая из них характеризуется своими гидродинамическими

параметрами (водопроницаемость меняется от 0,01 до 0,3 м<sup>2</sup>/сут). Но в целом для всего комплекса характерны малые напоры, составляющие чаще от первых метров, до тридцати, что встречается гораздо реже. Суммарный приток природных рассолов не превышал 50 м<sup>3</sup>/сут, причём в виду того что рассматриваемый водоносный комплекс был вскрыт карьером, именно на этапе открытой отработки месторождения были сработаны основные емкостные запасы.

Подземные горные выработки рудника «Айхал» вскрывают нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс на 16 участках. Местоположение выделенных участков водопроявлений в рамках периода исследований (2018–2022 гг.), не изменялось, отмечались только некоторые колебания расхода, в связи с этим, правомерно привести обобщённую (характеризующую весь период) погоризонтную разбивку выявленных водопроявлений. Все зафиксированные водопроявления характеризуются низкой интенсивностью, обусловленной фильтрационными параметрами водоносного комплекса.

На горизонте +180 м транспортный уклон вскрывает коллекторы нижнеордовикского водоносного комплекса (далее НоВК). Наблюдаемый приток приурочен к двум близкорасположенным (на расстоянии 5 м) локализованным участкам на транспортно-вентиляционном штреке. Он представлен струйным истечением с почвы выработки. Дебит и минерализация по данным водопроявлениям существенно не изменялись и составляют 55 г/л и 0,2–0,3 м<sup>3</sup>/сут соответственно.

На горизонте +175 м вспомогательный закладочный штрек вскрывает рассолы на пяти локализованных участках. Три из которых являются истечением с почвы выработки, а два – капезами различной интенсивности. Минерализация по данным участкам различается незначительно и составляет от 67 до 90 г/л. Суммарный приток ~2,8–3,4 м<sup>3</sup>/сут.

На горизонте +163 м транспортный штрек вскрывает два локализованных участка, представленных ламинарным истечением с левого борта выработки. Дебит и минерализация по данным водопроявлениям существенно не изменялись и составляют 93 г/л и 1,2–1,5 м<sup>3</sup>/сут соответственно.

Один локализованный участок вскрытия коллекторов НоВК зафиксирован на горизонте +145 м, и приурочен к струйному истечению по борту восходящего вентиляционного ходка. Расход в течение периода исследований не менялся и составлял 1,0 м<sup>3</sup>/сут. Минерализация в течение отчётного периода также не изменялась – 75 г/л.

Оставшиеся шесть участков относятся к очистным и добычным выработкам юго-западного кимберлитового тела: - горизонт +175 м, излив из почвы на разведочном штреке, дебит 0,5 м<sup>3</sup>/сут; минерализация – 90 г/л; вскрывающий уклон с горизонта +142 м на горизонт +135 м, капез в кровле; дебит 1,5 м<sup>3</sup>/сут; минерализация – 90 г/л; - горизонт +125 м, капез с кровли очистной камеры, дебит 1,3 м<sup>3</sup>/сут; минерализация – 130 г/л; - горизонт +115 м, капез с кровли

очистной камеры, дебит  $0,3 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; минерализация –  $190 \text{ г/л}$ ; - горизонт  $+105 \text{ м}$ , капез с кровли очистной камеры, дебит  $0,8 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; минерализация –  $170 \text{ г/л}$ ; - горизонт  $+95 \text{ м}$ , капез с кровли очистной камеры, дебит  $1,2 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; минерализация –  $200 \text{ г/л}$ .

Все водопроявления нижнеордовикского водоносного комплекса (далее НоВК) приурочены к узлам пересечения разрывных нарушений. Расход зафиксированных и наблюдаемых участков свидетельствует об отсутствии прямой связи между линзами, так как вскрытие рассолов на нижележащих горизонтах не приводило к резкому уменьшению притока рассолов на вышележащих горизонтах, что свидетельствует в пользу того, что каждый участок разгрузки рассолов НоВК имеет свою сформировавшуюся «зону питания», состоящую, по всей видимости, из естественных ёмкостных запасов иммобилизованной линзы.

Подземные горные выработки рудника «Айхал» вскрывают верхнекембрийский водоносный комплекс на 50 участках. Местоположение выделенных участков водопроявлений в рамках периода исследований (2018–2020 гг.) претерпевало изменения, так как часть наблюдаемых водопроявлений вскрывались на очистных выработках в отн.  $+0/-10 \text{ м}$ . По стационарным водопунктам (технологические скважины, стволы, спиральный съезд) отмечались только незначительные колебания расхода (до  $10 \%$ ). Все зафиксированные водопроявления характеризуются низкой интенсивностью, обусловленной фильтрационными параметрами водоносного комплекса. Суммарный приток природных рассолов ПВВК в подземные горные выработки на настоящий момент не превышает  $150 \text{ м}^3/\text{сут}$ , причём  $70\%$  притоков приходится на зону динамического воздействия северо-восточного кимберлитового тела (рис. 4.18).

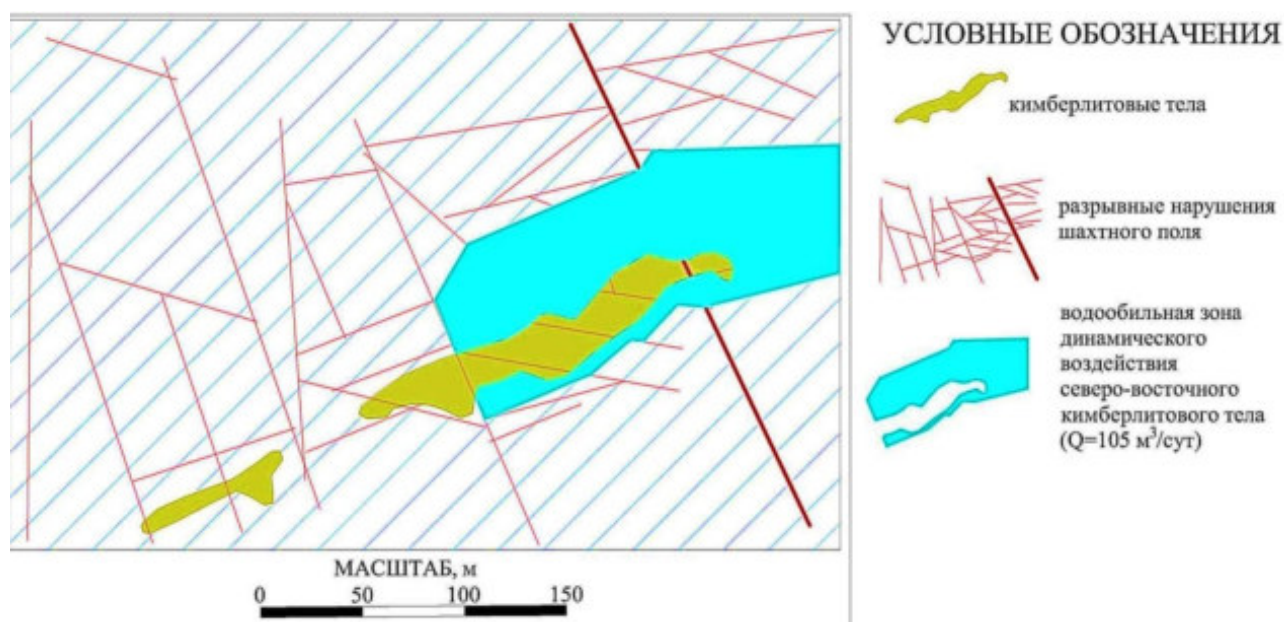


Рис. 4.18. Плановое расположение блоков-зон водообильности в пределах шахтного поля трубки «Айхал» [406]

Анализируя полученную в ходе проведенных исследований информацию, можно отметить, что водопроявления, находящиеся на большем удалении (больше 50 м) от кимберлитового тела Айхал, характеризуются меньшими параметрами, чем аналогичные водопроявления в зоне динамического воздействия, что, по всей видимости, объясняется влиянием структурно-тектонических нарушений, разбивающих вмещающие породы системой субширотных и субмеридиональных разломов сбросового типа, формирующих дополнительную ёмкость коллекторов.

***Из приведенной выше информации по водообильности шахтных полей кимберлитовых трубок можно сделать следующие выводы:***

Проведенные исследования подтвердили закономерности, выносимые в рамках первого защищаемого положения: водообильность коллекторов во вмещающих породах определяется разломно-блоковым строением месторождений, при этом наиболее проводящие зоны по всему разрезу осадочной толщи приурочены к северным и северо-восточным флангам кимберлитовых трубок, а площадь максимально обводнённых участков обусловлена рангом и количеством разрывных нарушений. Причём на крупных трубках (Мир, Удачная и Юбилейная) данные зависимости более выраженные, чем на мелких (Айхал и Интернациональная):

– для трубки Айхал на северо-северо-восточный фланг месторождения приходится 70% суммарных фактических притоков природных рассолов из нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносных комплексов, или  $105 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $150 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; при последующем увеличении глубины отработки месторождения (с текущей отм. -100 м, до -400 м) прогнозный приток составит до  $300 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $430 \text{ м}^3/\text{сут}$

- для трубки Интернациональная на северо-северо-восточный фланг месторождения приходится 80% суммарных прогнозных притоков природных рассолов из толбачанского газодоносного комплекса, или  $59 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $74 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; фактическое распределение притоков при отм. -900 м составляет  $29 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $36 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

– для трубки Мир на северо-северо-восточный фланг месторождения приходится 82% суммарных фактических притоков природных рассолов из метегеро-ичерского водоносного комплекса, или  $27\,120 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $32\,880 \text{ м}^3/\text{сут}$ ;

– для трубки Удачная на северо-северо-восточный фланг месторождения приходится 88% суммарных прогнозных притоков природных рассолов из среднекембрийского водоносного комплекса при достижении отм. -750 м, или  $9\,660 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $10\,930 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; фактическое распределение притоков при отм. -480 м составляет  $5\,904 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $7\,440 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

– для трубки Юбилейная на северо-северо-восточный фланг месторождения приходится 80% суммарных прогнозных притоков природных рассолов из нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносных комплексов, или  $840 \text{ м}^3/\text{сут}$  из  $1050 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

## ГЛАВА 5. ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ, И ИХ СВЯЗЬ С КРИОГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОЛЕЙ<sup>25</sup>

В настоящее время дренажные воды, формируемые при отработке месторождений, закачиваются обратно в недра. Для закачки используется два вида коллекторов – формируемые в толще ММП и региональных водоносных комплексов. Объёмы перемещаемых природных рассолов не имеют аналогов, как на территории нашей страны, так и за рубежом. Процесс откачка-закачка является основообразующим для формирования изучаемых природно-техногенных систем, определяющих гидродинамический режим водоносных горизонтов и комплексов в пределах рассматриваемых кимберлитовых полей [335]. Закачка дренажных вод началась в конце 80-х годов 20-го века, в пределах двух опытных участков: одного – ОПУ, эксплуатирующего коллекторы метегеро-ичерского водоносного комплекса (в Мирнинском кимберлитовом поле) и второго Октябрьского, ориентированного на толщу ММП (в Далдынском кимберлитовом поле). В процессе эксплуатации участков возник ряд проблем, связанных, прежде всего, с прогнозированием формируемого в результате закачки репресссионного купола

---

<sup>25</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО:

Иост Н.А. Отчет по комплексному анализу работы системы обратной закачки дренажных вод карьера Мир за период 1990-2014 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

Янников А.М. Гриков С.В. Информационный отчёт о выполненных гидрогеологических работах на объектах Мирнинского ГОКа за 2015 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

Янников А.М. Информационный отчёт о выполненных опытно-эксплуатационных наливах на участке «Южный». Мирный. Фонды ВГРЭ. 2017.

Янников А. М. Информационный отчёт о выполненных опытных наливах на участке «Заречный» / Фонды АГОК. Айхал, 2019.

Отчет о результатах проведенных работ по геологическому изучению и оценке пригодности участка недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых (поиск и оценка структур для закачки дренажных вод рудника «Удачный» на участке «Левобережный-2») в 2018-2019гг. Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный, 2020.

Янников А. М. Отчёт «Оценка реологических свойств и степени опасности рудопородной подушки подземного рудника «Удачный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Мир» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт по комплексному анализу результатов строительных и опытных работ на участке «Заречный» с обоснованием его дальнейшего промышленного освоения. Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Левобережный-2»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Разработать комплексную гидродинамическую модель двух участков закачки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский Юго-восточный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Дополнение и актуализация постоянно действующей гидродинамической модели трубки «Нюрбинская» с прогнозированием и управлением водопритоками». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

растекания, а также с оценкой эффективной емкости коллекторов толщи ММП и режимом работы закачных скважин.

Информация, полученная в процессе эксплуатации упомянутых участков, а также при выполнении комплекса исследований, позволила не только масштабировать уже имеющиеся наработки по закачке на все кимберлитовые поля, но и уточнить ряд поисковых критериев. В результате было обосновано, что структурно-тектонический фактор, является наиболее важным при формировании полезной ёмкости используемых участков, а также во многом определяет производительность закачных скважин и процесс формирования зон вертикальной фильтрации.

В представленной главе выполнен анализ криогидрогеологических условий, эксплуатируемых в пределах четырёх кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции: Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского участков закачки, для обоснования дополнительных к существующим критериям их размещения, включая выявление роли структурно-тектонического фактора и условий вертикальной зональности водопроницаемости. Гидрогеологическая и геологическая характеристика участков выполнена с учётом имеющихся фондовых материалов, исследований, выполненных ранее (Алексеев, Алексеева, Вигандт, Дроздов, Лобанов, Иост, Гензель и др.) и результатов научно-исследовательской деятельности автора.

Исследования, проводимые автором, безусловно, базировались на имеющейся обширной базе как нормативной документации, так и на опубликованных трудах учёных и специалистов гидрогеологов, геологов, геокриологов и др. (Абрамов В.Ю., Авдеева В.И., Агринский А.В., Акишев А.Н., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Андреева С.М., Анисимова Н.П., Анциферов А.С., Асташкин В.А., Атрощенко Ф.Г., Афанасенко В.Е., Балашов Л.С., Балашов Ю.А., Балобаев В.Т., Баранов И.Я., Басков Е.А., Бобров А.К., Борисов В.Н., Ваганов В.И., Васильчук Ю.К., Вахромеев А.Г., Великин С.А., Вельмина Н.А., Власов Н.А., Всеволожский В.А., Втюрин Б.И., Гавич И.К., Гензель Г.Н., Гиниятулин И.М., Гинсбург Г.Д., Дроздов А.В., Ершов Э.Д., Ефимов А.И., Иванов А.В., Иост Н.А., Карцев А.А., Кирюхин В.А., Климентов П.П., Климовский И.В., Колганов В.Ф., Косыгин Ю.А., Крайнов С.Р., Лобанов В.В., Мельников П.И., Милашев В.А., Мироненко В.А., Овчинников А.М., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Толстихин Н.И., Хаин В.Е., Харьков А.Д., Шварцев С.Л., Швецов П.Ф., Шепелев В.В. и др.).

Рассмотрим, эксплуатируемые участки закачки, а также перспективы дальнейшего их использования, по принадлежности к изучаемым кимберлитовым полям, применительно к отрабатываемым месторождениям.

### *5.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле*

Для месторождений Алакит-Мархинского кимберлитового поля используется два участка закачки Заречный и Ноябрьский. Оба участка используют коллекторы в толще ММП, и в процессе их эксплуатации формируется межмерзлотный водоносный горизонт. Участок Ноябрьский используется для трубок Айхал и Заря (в перспективе с 2028 г.), а участок Заречный для месторождения трубки Юбилейная. Глубина закачных скважин на участке Заречный составляет 200-250 м; а на участке Ноябрьский – 230 м. Эксплуатация участка закачки Заречный и Ноябрьский приведёт к формированию в 2040–2050-х гг. межмерзлотных техногенных водоносных горизонтов, объёмом 3,2 млн. м<sup>3</sup> и 5,5 млн. м<sup>3</sup> соответственно, что в итоге приведет к формированию зон дополнительного питания нижнеордовикского водоносного комплекса, активно дренируемого в настоящее время подземными горными выработками рудника Айхал и карьером Юбилейная (в будущем карьером Заря).

Участок «Ноябрьский» находится в бассейне реки Сохсоллоох, в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазоносного района. В геоморфологическом отношении район участка «Ноябрьский» представляет собой водораздельную часть структурно-денудационного плато, рек Сохсоллоох и Ойюр-Юреге. Согласно Техническому проекту промышленной эксплуатации (отв. исполнитель Янников А.М.) узла закачки дренажных вод рудника «Айхал» на участке «Ноябрьский» было пробурено 19 скважин [499], в том числе: - 6 закачных скважин № 101, 102, 103, 104, 105, 106 глубиной по 230 м; - 13 наблюдательных скважин №№ 1н, 2н, 3н, 4н, 5н, 6н, 9н – по 230 м; 1, 2, 5/1, 5/2 – по 250 м; 7н – 400 м и 8н – 600 м (рис. 5.1).

В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхойюряхской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной (силурийской системы); айхальской свиты (каменноугольной системы). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойского-раннемезозойского периода (P<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>), образованным внедрением магмы основного состава - долеритами, слагающей крупные пластовые тела интрузий и дайки, а также туфами [261]. Структурно-тектоническое строение участка изучено по результатам бурения гидрогеологических, структурных и поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом ГИС, наземными геофизическими исследованиями.

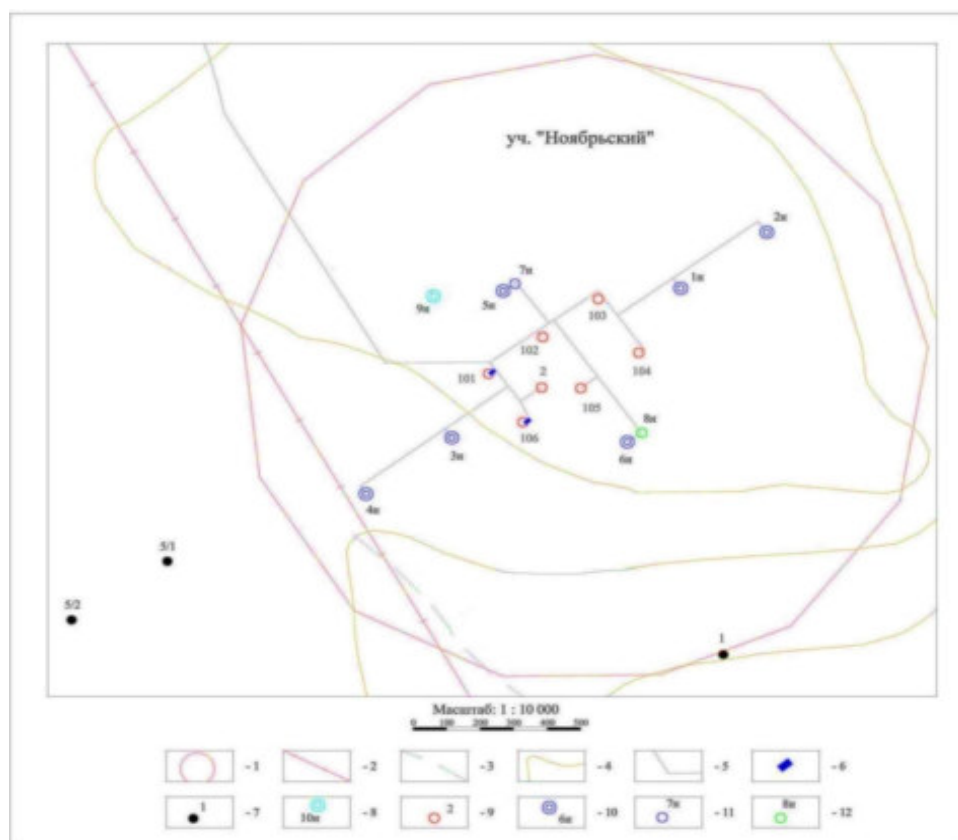


Рис. 5.1. Схема участка закачки «Ноябрьский» [410]

Плановое расположение выявленных разрывных нарушений приведено на рисунке 5.2.

В структурно-тектоническом отношении весь участок приурочен к зоне динамического воздействия Ноябрьского глубинного разлома, относящегося к группе чукукских разломов [294]. В пределах участка сформирована система оперяющих разломов, имеющих подчинённое положение. Необходимо отметить, что данный разлом относится к кимберлит контролирующим для таких трубок как Заря, Надежда, Ноябрьская и Подтраповая. Из перечисленных кимберлитовых тел, только трубка «Заря» имеет промышленные содержания алмазов, остальные характеризуются убогой алмазоносностью [337].

По результатам проведенных гидрогеологических и геофизических исследований, породы, обладающие наилучшими коллекторскими свойствами («рабочие интервалы»), залегают на глубинах 145-193 м. Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми известняками сохсоллоохской свиты ( $O_{1sh}$ ), трещиноватыми известняками и мергелем сытыканской свиты ( $O_{2st}$ ) и трещиноватым, пестроцветным мергелем кылахской свиты ( $O_{2-3kl}$ ). В настоящее время участок закачки «Ноябрьский» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме с суммарной производительностью закачки до  $430 \text{ м}^3/\text{сут}$  (фактически в течение 2018-2022 гг. до  $320 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) в режиме свободного налива на базе 6 поглощающих скважин. В результате закачки дренажных вод, в пределах изучаемого участка началось формирование *техногенного водоносного горизонта*.



Рис. 5.2. Структурно-тектоническая схема участка закачки «Ноябрьский» (составлена по материалам Мирнинской ГРЭ и Айхальского ГОКа) [406]

По состоянию на январь 2022 г. в толщу ММП участка «Ноябрьский» закачено ~ 300 тыс. м<sup>3</sup> минерализованных дренажных вод рудника «Айхал» (рис. 5.3).

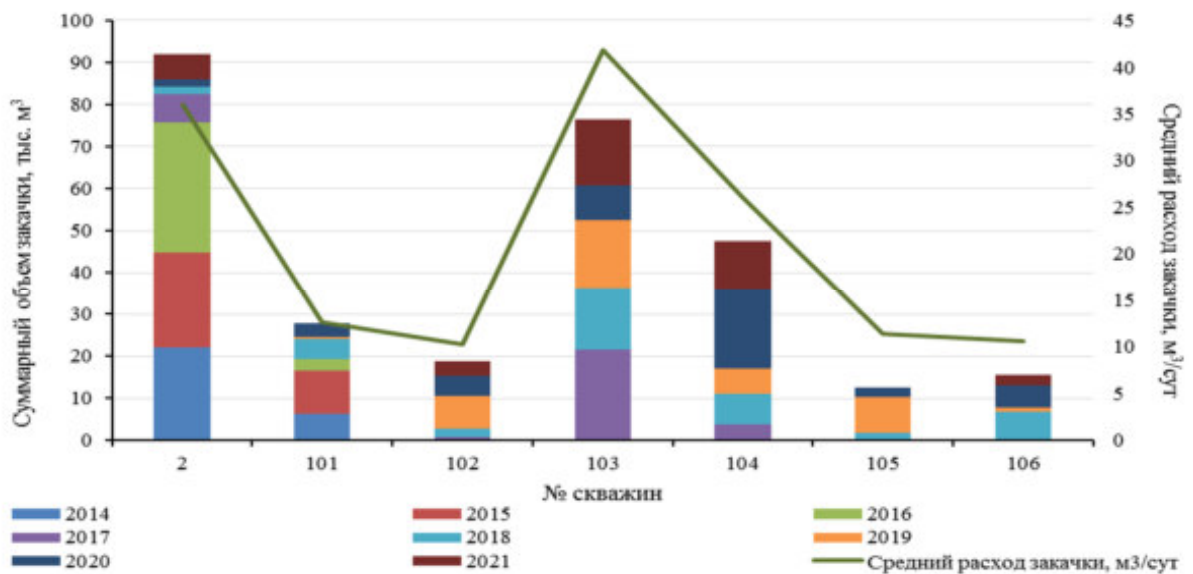


Рис. 5.3. Суммарные объемы закачки рассолов в эксплуатационные скважины [410]

В настоящее время сформированная линза рассолов характеризуется неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло и массопереноса при использовании толщи ММП для закачки дренажных вод [37; 390; 393]. Основные характеристические параметры приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Параметры по опытным скважинам участка «Ноябрьский» [410]

№ п/п	№ скважины	Дебит налива, м <sup>3</sup> /час	Повышение уровня, м	Фактическое (полученное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Расчетное (максимальное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Удельное водопоглощение W, м <sup>3</sup> /час на 1 метр
1	<b>101</b>	15	8,3	4,8	17,0	1,8
2	<b>103</b>	15	8,0	3,5	17,0	1,9
3	<b>104</b>	15	2,9	3,1	17,0	5,2
4	<b>106</b>	15	4,8	4,7	17,0	3,1

По данным опытно-фильтрационных работ водопроницаемость техногенного горизонта составляет 13-90 м<sup>2</sup>/сут., пьезопроводность –  $n \times 10^4$  м<sup>2</sup>/сут. Приемистость скважин составляет 250-800 м<sup>3</sup>/сут [406].

Изменение уровня воды техногенного горизонта в толще ММП и уровня воды в НоВК по данным режимных наблюдений, учитывая небольшие объемы закачки, не дает представления о распространении рассолов ниже выделенных коллекторов. На данном этапе закачки рассолов дренажные воды распространяются в основном по выделенным коллекторам, а также в свободном ото льда трещинном пространстве нижележащих толщ пород, что видно по понижению уровня в скважинах в периоды простоя между периодами закачки рассолов (рис. 5.4).

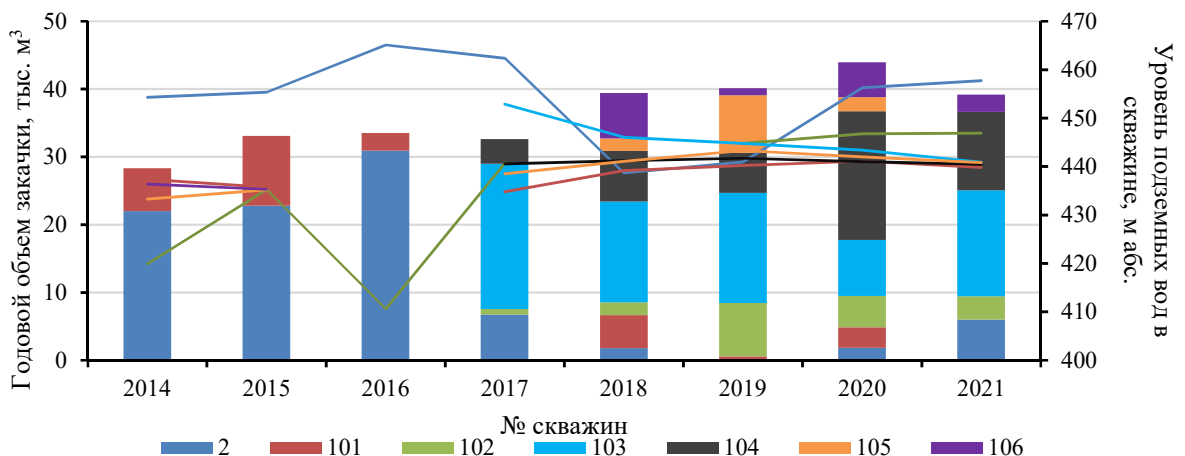


Рис. 5.4. Изменение уровня техногенного горизонта по замерам в эксплуатационных скважинах в зависимости от объемов закачки рассолов в многолетнемерзлые породы [410]

Распределение дренажных рассолов в плане можно проследить по появлению воды в наблюдательных скважинах, расположенных в периферийной части (рис. 5.5).

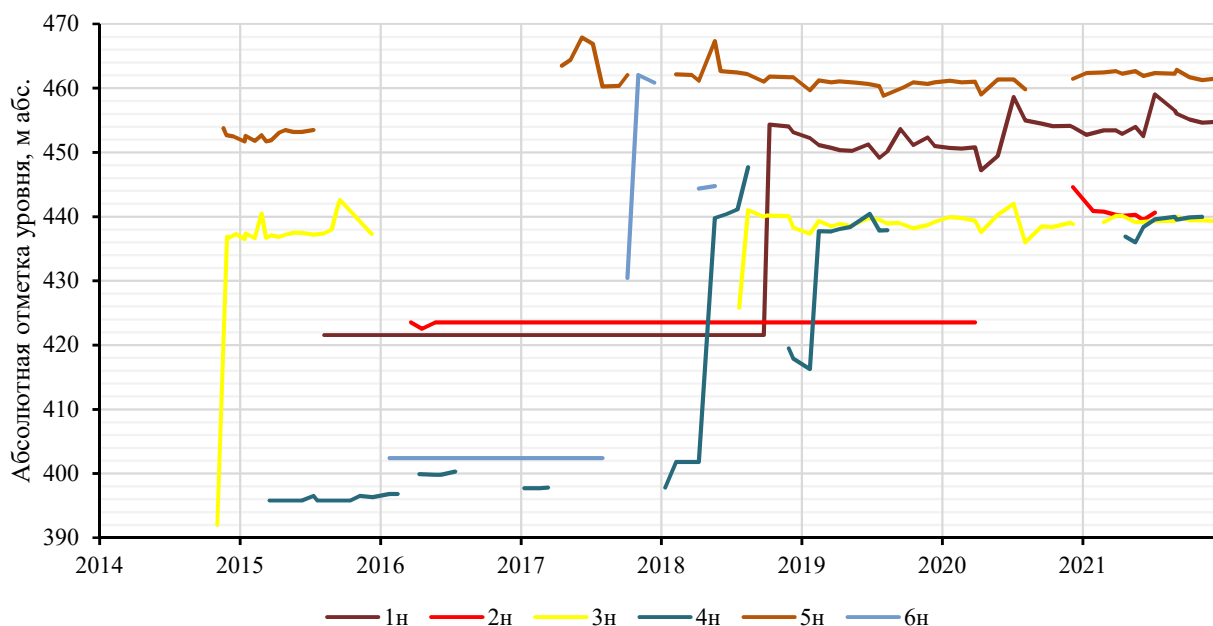


Рис. 5.5. Изменение уровня подземных вод в техногенном горизонте по данным режимных наблюдений в наблюдательных скважинах [410]

В конце 2014 г. наблюдалось появление подземных вод в скважинах, расположенных в северной и западной части с минерализацией 149 г/л. В скважинах восточной и западной частей в 2018 г было зафиксировано появление рассолов с минерализацией 143 и 65 г/л. По последним данным (сентябрь 2022 г.) минерализация подземных вод, отобранных в скважинах участка закачки, составляет 60–80 г/л при средней минерализации закачиваемых рассолов 100-180 г/л. Так как данная минерализация при температуре ММП  $-3...-2^{\circ}\text{C}$  не позволяет растворять существенного объёма льдистой фазы, то можно предположить, что на данный момент растекание вод происходит в основном по открытым трещинам (рис. 5.6).

Сопряжённый с месторождением участок «Заречный» находится в бассейне реки Марха, в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазонасного района. В геоморфологическом отношении район участка «Заречный» представляет собой водораздельную часть структурно-денудационного плато, рек Марха и Кылах [169].

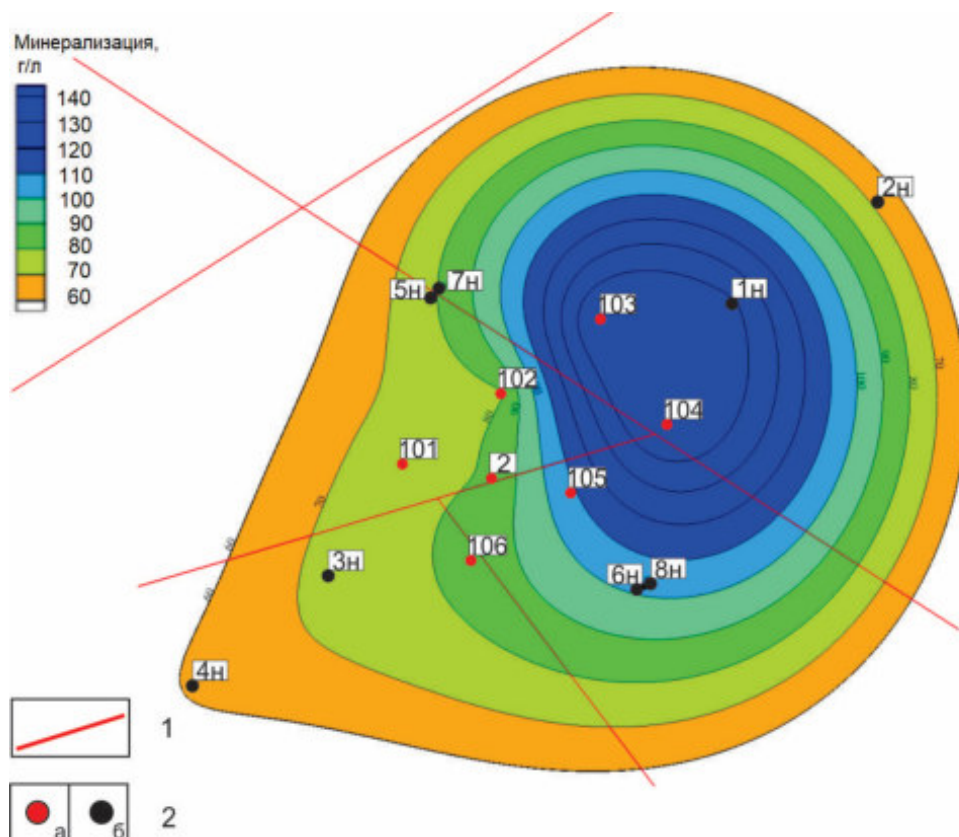


Рис. 5.6. Изменение минерализации в плане по данным на 2022 г. [410]. Условные обозначения: 1 – разрывные нарушения; 2 – скважины: а – закачные, б – наблюдательные.

Согласно Техническому проекту промышленной эксплуатации (отв. исполнитель Янников А.М.) узла закачки дренажных вод карьера «Юбилейный» на участке «Заречный» по состоянию на 2026 г. участок будет состоять из 21 скважины, в том числе: – 8 закачных скважин № 2з, 3з, 4з, 5з, 6з, 7з и 8з глубиной по 200 м.; – 1 закачной скважины №10з глубиной 230 м; – 3 закачных скважин № 16н, 18н и 20н, глубиной по 250 м; – 8 наблюдательных скважин № 1н, 1н', 2н, 3н, 4н, 5н, 6н и 7н глубиной 200 м; – 1 наблюдательной скважины №9н, оборудованной для режима НоВК, глубиной 400 м (рис. 5.7).

Структурно-тектоническое строение участка обусловлено его нахождением в зоне динамического влияния Северо-восточного разлома, наибольшей проницаемостью характеризуется блок в узле его пересечения с Центральным разломом. Для использования данного блока пробурены скважины №№ 7з, 8з, 10з, 16з(н), 18з(н) и 20з(н). В геолого-стратиграфическом разрезе толщи принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения кылахской свиты ( $O_{2-3} kl$ ), байтахской ( $S_1 bt$ ), башенной ( $S_1 bš$ ) и машковской ( $S_1 mš$ ) свит; айхальской ( $C_{2-3} ah$ ) и ахтарандинской свит ( $P_1 aht$ ). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 14–21 м) позднепалеозойско-раннемезозойского периода, образованным внедрением магмы основного состава (долеритами), слагающей крупные пластовые тела интрузий и дайки [169; 493].

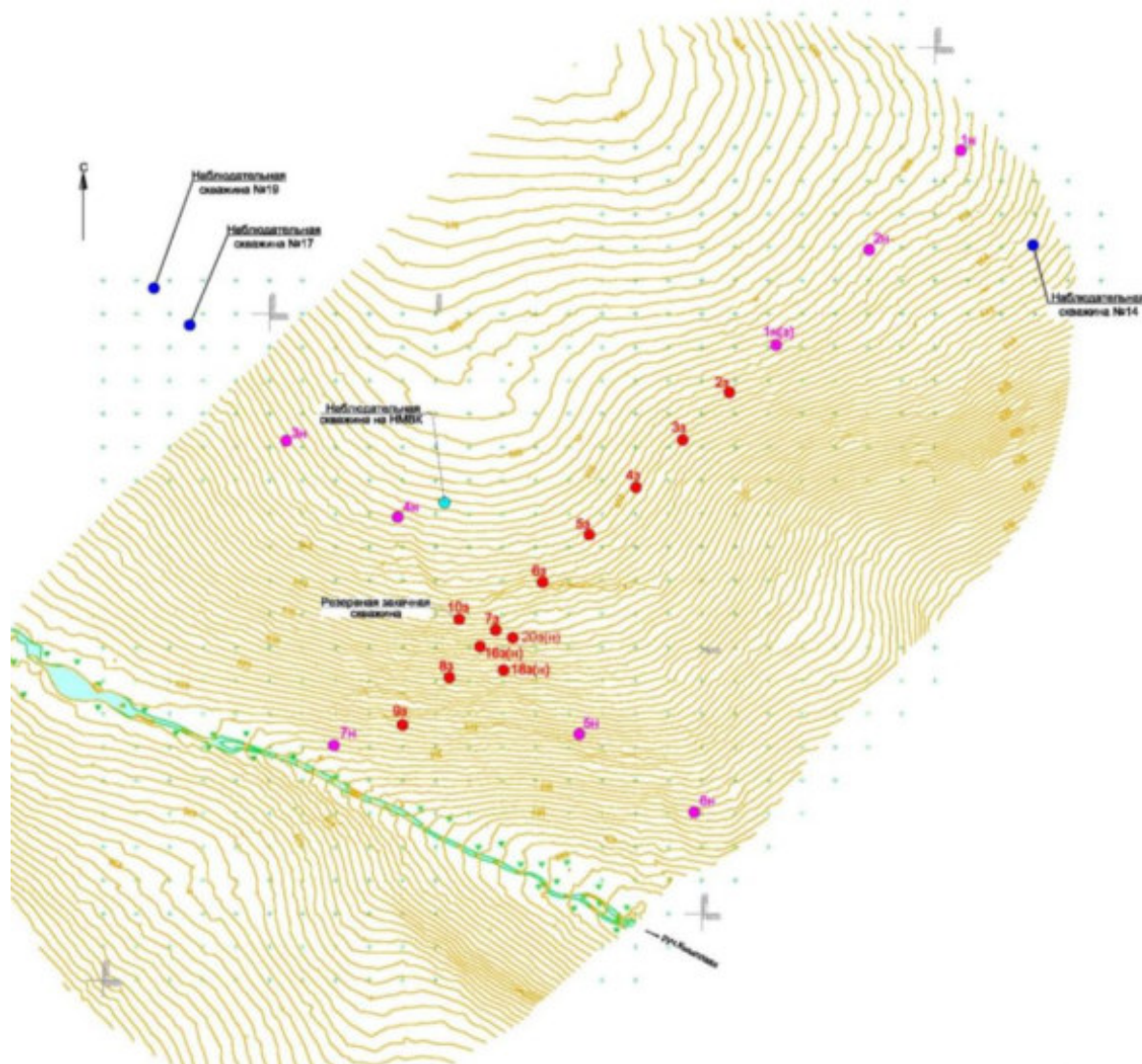


Рис. 5.7. Схема расположения скважин на участке «Заречный» [406]

Скважинами вскрыта трапповая интрузия, мощностью около 2 м на глубинах 103,0–115,5 м. На рисунке 5.8 приведена корреляционная схема-разрез, построенная по информации, полученной в процессе бурения скважин первой очереди. На участке «Заречный», по результатам проведенных наливов и расходомерии, породы, обладающие наилучшими коллекторскими свойствами, залегают на глубинах от 120 до 168 м. Интервал коллекторов представлен трещиноватыми известняками, доломитистыми известняками и доломитами машковской ( $S_{1m\delta}$ ) и башенной свит ( $S_{1b\delta}$ ) силурийской системы. Наиболее проницаемые коллекторы, по результатам расходомерии, отмечены в интервале глубин 143–168 м. Байтахская ( $S_{1bt}$ ) и кылахская ( $O_{2-3kl}$ ) свиты не обладают явно выраженными коллекторскими свойствами (по результатам расходомерии), однако, также являются потенциальными коллекторами при насыщении пород толщи ММП закачиваемыми рассолами за счёт пористости пород. В настоящее время участок закачки «Заречный» находится в стадии строительства и опытного освоения скважин.

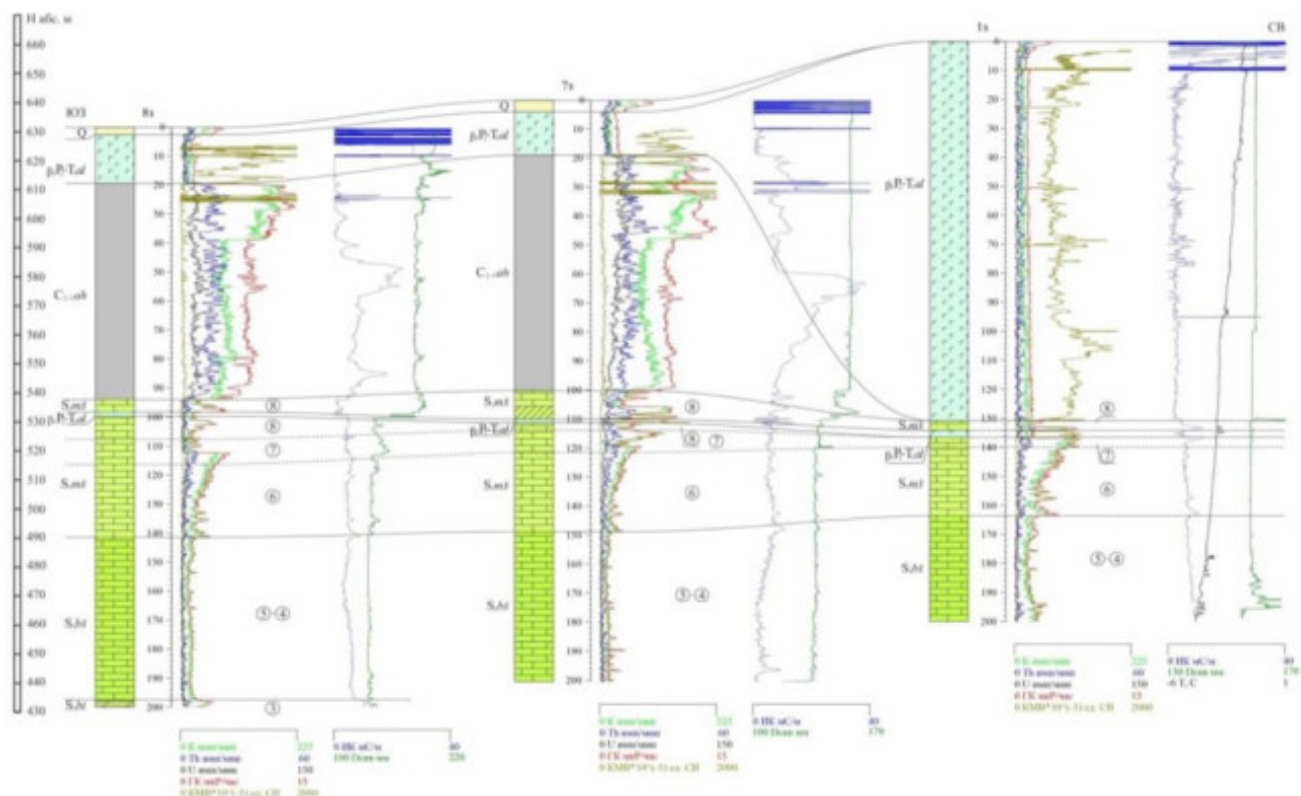


Рис. 5.8. Корреляционная схема по скважинам №№ 1н(з), 7з и 8з участка «Заречный» (составлена по материалам Мирнинской ГРЭ и Айхальского ГОКа) [406]

*Техногенный водоносный горизонт* – формирование связано с опытно-фильтрационными работами [286; 290; 493; 503]. По состоянию на январь 2021 г. в толщу ММП участка «Заречный» закачано  $\approx 5$  тыс. м<sup>3</sup> минерализованных дренажных вод рудника «Айхал». В настоящее время сформированные разрозненные линзы рассолов приурочены только к пристволовым зонам (из-за небольшого объема закаченных вод) и характеризуются крайне неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло и массопереноса при использовании толщи ММП для закачки дренажных вод. Для предварительной оценки приемистости коллекторов толщи ММП, а также для определения интервалов поглощения в породах вскрываемого разреза проведены пробные наливы рассолов во все пробуренные скважины. Для выполнения наливов использовались дренажные рассолы трубки «Удачная». Максимальная приемистость на стадии поисков составила 5 м<sup>3</sup>/ч. При повторном наливе в 2019 г. приемистость составила до 43,2 м<sup>3</sup>/ч. В эксплуатационных скважинах экспресс-наливы показали приемистость в 2,5 м<sup>3</sup>/ч в скважинах, расположенных в южной части и 0,02 м<sup>3</sup>/ч в северной. Интервалы коллекторов представлены в таблице 5.2.

Для оценки фильтрационных характеристик пород в 2013 и 2019 гг. были проведены кустовые наливы. Для выполнения кустовых наливов использовались дренажные рассолы трубок «Айхал» и «Удачная». В южной части участка были получены значения приемистости 20,9 и 29,4 м<sup>3</sup>/ч. Максимальная приемистость составила 43,2 м<sup>3</sup>/ч.

Таблица 5.2 – Выделенные интервалы коллекторов в пределах участка «Заречный» [406]

№ скважины	Интервалы коллекторов, выделенные по ГИС, м абс.	Интервалы коллекторов, выделенные по расходомерии, м абс.
1бз	-	+498/+473
1н	+531/+530,2;+470/+465,6	-
7з	-	+530,82/+523,82;+519,82/+506,82;+501,82/+483,82; +460,82/+450,82; +473,82/+470,82
8з	-	+529,6/+486,6; +472,6/467,6; +442,6/441,6

Изменение уровней в наблюдательных скважинах не превысило 0,4 м, что говорит о распространении рассолов в прискважинном пространстве. Анализируя полученные данные по выполненным опытно-фильтрационным работам (ОФР) в скважинах участка «Заречный» можно сделать следующие выводы: - основной поглощающий интервал (+480 - +530 м абс.) приурочен к отложениям башенной и машковской свит, представленным известняками и доломитами мелкозернистыми трещиноватыми. Породы средне трещиноватые до 5–7 трещин на 1 п. м. Трещины открытого типа, частично залечены льдом; - расчётная водопроницаемость от 1,9 до 27,6 м<sup>2</sup>/сут; - приемистость закачных скважин до 20 м<sup>3</sup>/ч; - недостаток насыщения для выделенного интервала коллекторов при средней открытой пористости 5,6% и влажности 2% оценивается величиной 0,036.

По изменению приемистости во время выполнения наливов и результатам расходомерии установлено присутствие эффекта увеличения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов за счет выщелачивания льда, что в последующем влияет на изменение фильтрационно-емкостных параметров во времени [58; 198; 199]. Всего на участке «Заречный» закачено ≈ 5 тыс. м<sup>3</sup> рассолов. Опробований образованного техногенного талика на настоящий момент ввиду малого объема закачки не было проведено.

### 5.2 Далдынское кимберлитовое поле

Для закачки рассолов трубок Далдынского кимберлитового поля используются как коллекторы толщи ММП, так и коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (далее НВК) [87]. В настоящее время в толщу ММП, в пределах участков «Октябрьский», «Киенгский», «Левобережный» и «Левобережный – 2» в период 1985–2022 гг. было закачено 45 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов трубки Удачная. Глубина закачных скважин составляет 260–280 м. Закачка такого объема рассолов привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к перечисленным участкам. Причём в результате растворения льдистой составляющей были сформированы вертикальные зоны массопереноса в ниже залегающий подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (далее ВВК), дренируемый в настоящее время карьерами трубок Удачная и Зарница. В виду невысоких фильтрационных

параметров, возврат закачиваемых к карьерным полям в настоящее время не происходит, наблюдается локальное изменение напоров, в пределах прямого воздействия от участков закачки. Расход перетекания из техногенного водоносного горизонта в ВВК на участке Киенгский в зоне динамического влияния Октябрьского разлома составляет 490 м<sup>3</sup>/сут; а на участке Левобережный – 4570 м<sup>3</sup>/сут, что обеспечивает наличие зоны техногенного питания для частично сдренированного верхнекембрийского водоносного комплекса.

Залегающий ниже среднекембрийский водоносный комплекс (далее СВК), в настоящее время формирует 99% дренажных вод рудника Удачный, по причине закачки всего объёма дренажных вод в зону коллекторов ММП или НВК, в пределах СВК формируется обширная депрессионная воронка [2], не компенсированная процессом закачки.

Начиная с 2020 г. начато использование коллекторов НВК, глубина закачных скважин составляет 1700 м. В настоящее время НВК выработками рудника не вскрыт, т.е. формируется только репрессивный купол растекания, возникший в результате закачки 3,5 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов трубки Удачная. При последующей отработке месторождения пьезометрическая поверхность НВК претерпит сложные изменения, схожие с МИВК, т.к. в пределах шахтного поля тр. Удачная сформируется ограниченная по площади депрессионная воронка, компенсирующаяся закачкой на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».

Представленная в главе 2 характеристика гидрогеологических условий рассматриваемых кимберлитовых полей подчёркивает существенные различия вертикальной зональности, причём для Далдынского кимберлитового поля характерна обратная (аномальная) зональность, увеличения водообильности водоносных комплексов с глубиной, которая обусловлена синергетическим влиянием структурно-тектонических, литолого-фациальных и криогидрогеологических условий, а также их изменениями в различные геологические периоды [4]. Описанные особенности строения предопределили условия и принципы строительства систем обратной закачки дренажных вод трубки Удачная.

Выбору участков, в том числе обратной закачки, предшествует комплекс изучения гидрогеологических условий и годы научно-методических исследований. Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля, а именно наличие высокопроницаемых коллекторов, пригодных для обратной закачки на глубинах более 1200 м от дневной поверхности, предопределило на первоначальном этапе тип участков, используемых для возврата в недра дренажных рассолов. Исследования, проведенные коллективом учёных ИЗК СО РАН (под руководством Алексеева С.В. и Алексеевой Л.П.), с последующей адаптацией применительно к участкам Октябрьский и Киенгский (Дроздов А.В., Лобанов В.В., Иост Н.А. и др.) позволили обосновать использование толщи многолетнемерзлых пород для закачки высоко минеральных

вод. Для выбора перспективных криогенных структур разработан и успешно применен на практике комплекс поисковых критериев, включающий: структурные, тектонические, геоморфологические, геофизические, газодинамические, температурные, гидрогеологические, геохимические признаки. Каждый критерий имеет свою физическую подоплеку, напрямую или косвенно связан с фильтрационно-емкостными свойствами криогидрогеологической среды [24; 138; 284; 30; 33; 39; 158-167; 474].

Предложенная технология уже имеет 30-ти летний опыт применения в АК АЛРОСА. Преимуществом данного метода являются относительно неглубокие закачные скважины, составляющие 250-280 м, главным недостатком – ограниченность объемов таких участков. В настоящее время начата эксплуатация уже четвертого участка закачки, использующего коллекторы толщи ММП. Дренажные воды трубки Удачная в разные периоды отработки закачивались в участки «Октябрьский» (1985–2002 гг.), «Киенгский» (2003–2012 гг.), «Левобережный» (2012–2023 гг.) и в настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2, с оцененным объемом ~ 17 млн. м<sup>3</sup>. Всего за весь период эксплуатации во внутримерзлотные коллекторы криолитозоны по состоянию на 01.01.2023 г закачено порядка 45 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов, в том числе: 10,6 млн. м<sup>3</sup> в участок «Октябрьский»; 13,0 млн. м<sup>3</sup> в участок «Киенгский»; 21,0 млн. м<sup>3</sup> в участок «Левобережный» и 0,4 млн. м<sup>3</sup> в участок «Левобережный-2».

Механизм миграции рассолов в ММП может быть представлен следующей схемой. Рассолы, поступающие в ММП, имеют высокую минерализацию. Первоначально они заполняют свободную ото льда емкость трещинно-порового пространства. В этот период подаваемые в ММП рассолы продвигаются в массиве преимущественно по ослабленным зонам (зоны повышенной трещиноватости, дробления с неполным заполнением льдом), которые вскрываются поглощающей (закачной) скважиной. Фильтрующиеся рассолы, обладая агрессивностью по отношению к ледовому заполнителю за счет высокой минерализации, выщелачивают лед из трещин и пор, что приводит к увеличению открытой трещиноватости и проницаемости массива. По мере увеличения плановых размеров ореола рассолов возрастает роль вертикального проникновения их через освобождающиеся ото льда трещины и ослабленные зоны в относительно водоупорных разделяющих слоях. Этому способствует плотностная конвекция рассолов – более плотные рассолы опускаются в нижние интервалы проводящих зон и за счет высокой агрессивности освобождают ото льда относительно водоупорные слои ММП. На этой стадии миграция рассолов носит черты влаго- и массопереноса в ненасыщенной среде (недонасыщенность ММП по содержанию влаги). Рассолы занимают свободное от воды и ото льда порово-трещинное пространство, при этом существенную роль играет капиллярное всасывание рассолов в пористые блоки и осмотические и молекулярно-диффузионные процессы. В результате происходит насыщение рассолами не только трещинного, но и порового

пространства ММП. Таким образом, при длительной миграции рассолов на большие расстояния скорость распространения рассолов отвечает общей свободной емкости ММП, которая значительно больше емкости трещин [63; 64; 65; 68; 87; 162-167; 174; 175; 176; 235].

Распространение рассолов в ММП связано, с уменьшением минерализации рассолов, за счет разбавления растаявшим льдом и диффузионного отвода солей в блоки. Это снижает агрессивность рассолов ко льду, что в наибольшей мере проявляется на периферийных участках ореола растекания рассолов. Вследствие повышения температуры замерзания в краевых частях ореола растекания рассолов образуются центры кристаллизации льда, рассолы начинают смерзаться и их плановое перемещение постепенно затухает. Подаваемые в ММП рассолы начинают практически полностью уходить в ниже залегающие проницаемые слои через относительные водоупоры за счет большой площади и гравитационной дифференциации рассолов. После прекращения подачи рассолов происходит снижение минерализации до значений 50–80 г/л (равновесная величина минерализации с температурой массива ММП, при которой рассолы замерзают при данной температуре), после чего рассолы замерзают и консервируются внутри массива ММП [386; 417]. Механизм воздействия рассола на ММП можно представить следующим образом. Под действием диффузии рассолы проникают из трещин в блоки. Продвигаясь по занятому льдом поровому пространству блоков, рассолы химически и физически взаимодействуют с кристаллами льда, смешиваясь с ними в определенной пропорции. Процесс смешения приводит к снижению точки замерзания ниже температуры ММП и оттаиванию пород [165; 167; 259; 305; 330; 431].

Минерализация рассолов трубки «Удачная» порядка 300-380 г/л, температура ММП на глубине 250–300 м составляет  $-4 - -2^{\circ}\text{C}$ . Минерализация рассолов, при которой раствор будет находиться в жидком состоянии, должна быть больше 50 г/л. Таким образом, 1 м<sup>3</sup> рассола с минерализацией 300–380 г/л при температуре  $-3^{\circ}\text{C}$  может растопить около 5 м<sup>3</sup> льда [392; 416; 421].

Рассмотренный выше процесс носит длительный крупномасштабный характер, параметры которого не могут быть определены в рамках относительно кратковременных стандартных опытно-фильтрационных работ. Эти процессы могут быть изучены только при проведении и анализе крупномасштабных опытно-фильтрационных наблюдений. Физически эффекты термохимической проработки ММП рассолом приводят к появлению дополнительной емкости пород в процессе закачки и идут в запас достаточно длительной эксплуатации участков закачки.

Ограничений в закачке по нижней границе принципиально не существует, определяется залеганием эффективных приемистых интервалов разреза. Перетоки из зоны многолетнемерзлых пород (ММП) в интервал подмерзлотного водоносного комплекса (ВВК) является

дополнительной и существенной гарантией экологической безопасности технологии закачки дренажных вод в зону ММП, т.к. существенно снижают темп заполнения емкости многолетнемерзлых пород, положительно влияя на динамику уровня в этом интервале закачки дренажных вод [65; 77; 140; 171; 172; 173; 372; 428]. По физико-химическим характеристикам подземные и дренажные воды, горные породы совместимы. По экологическим показателям такие участки безопасны, так как ореол растекания дренажных вод в пласте сравнительно невелик, значительная величина подъема уровней характерна непосредственно только для зоны закачных скважин, а в рельефе не имеется значительно врезанных поверхностных водотоков и водоемов [242–245; 276; 338; 339]. Дополнительным положительным фактором выступает формирование упомянутых ранее зон перетока в нижележащий верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК). Фактически наблюдаемые по результатам мониторинговых наблюдений и подтвержденные последующими расчётами расходы перетока составили по участку «Киенгский» 490 м<sup>3</sup>/сут; по участку «Левобережный» – 4570 м<sup>3</sup>/сут. Интервалы формирования коллекторов, как правило, приурочены к карбонатным разностям моркокинской (Є<sub>3</sub> mrk) и мархинской (Є<sub>3</sub> mrh) свитам, т.е. на глубинах 150–280 м от дневной поверхности (рис. 5.9).



Рис. 5.9. Коллекторы криогенной толщи, формирующиеся в результате плавления жильных льдов (по [167] с дополнениями)

Верхним пределом интервала закачки дренажных вод в такие участки является положение гидрографической сети, т.е. положение уровней техногенного горизонта поддерживается на экологически безопасной глубине от дневной поверхности. Процесс контролируется режимом закачки (количеством закачных скважин, объемами закачки, безнапорным режимом закачки), а также режимными наблюдениями по сети наблюдательных скважин и по профилям наземной геофизической сети. Толща не трещиноватых без льдистых пород ММП верхней части разреза служит региональным водоупором.

Участок Киенгский расположен на водоразделе рек Сытыкан и Далдын, вблизи ручья Правый Киенг, в 8 км на ЮВ от трубки «Удачная». Согласно Техническому проекту

промышленной эксплуатации (отв. исполнитель Янников А.М.) узла закачки дренажных вод рудника «Удачный», участок «Киенгский» включает 65 скважин: 8 закачных, 57 наблюдательных (рис. 5.10). Глубина скважин определялась необходимостью изучения зоны многолетнемерзлых пород и подмерзлотного водоносного комплекса [502]. Конструкции скважин обеспечивают надёжную изоляцию принимающего коллектора от дневной поверхности.

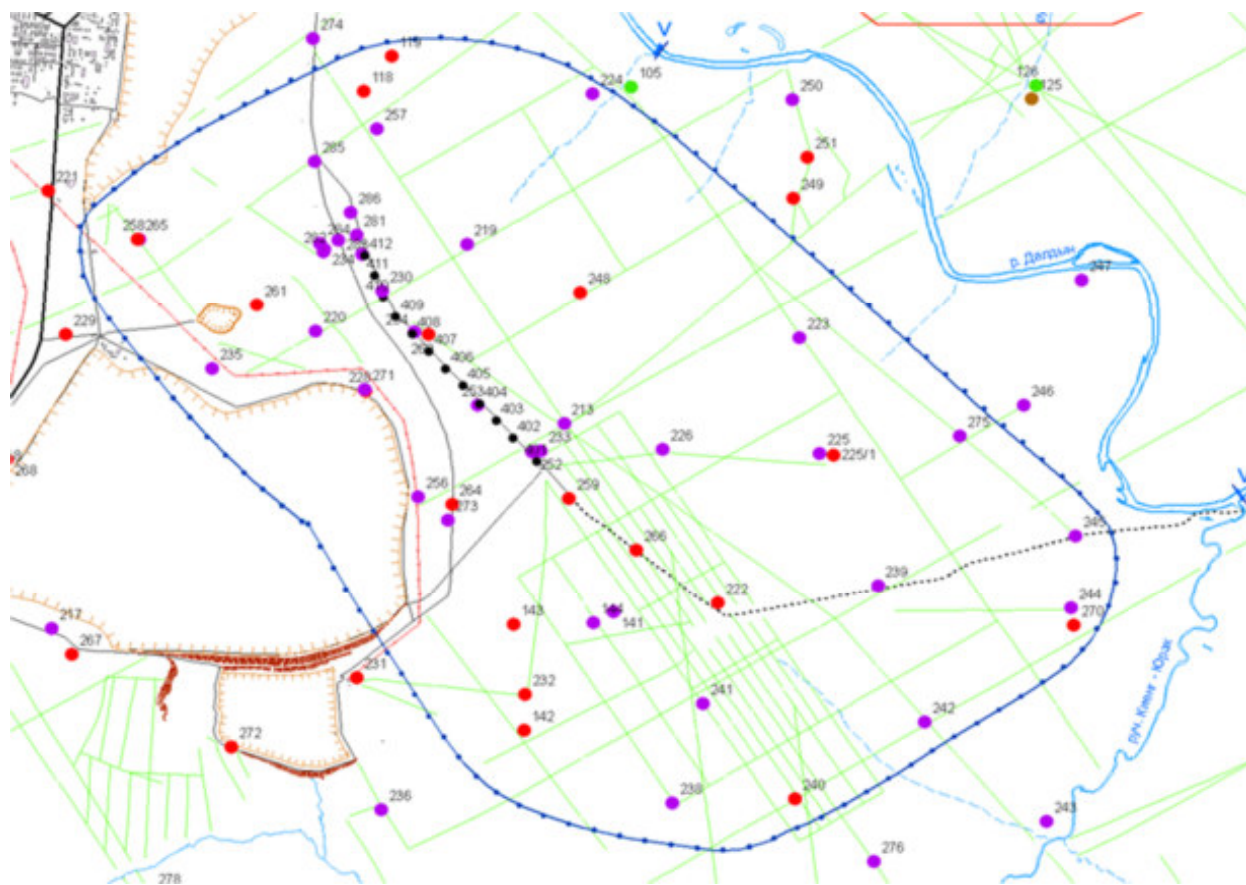
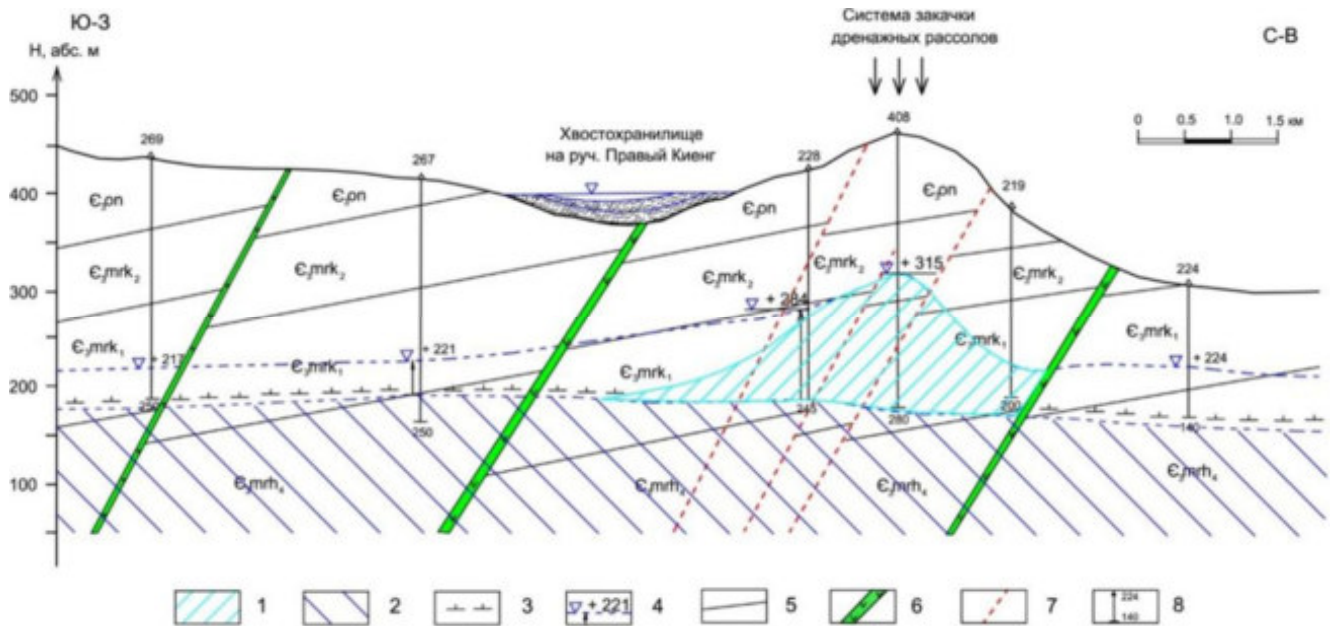


Рис. 5.10. Схема расположения скважин на участке «Киенгский» (по [167] с дополнениями)

Закачка дренажных вод на участке «Киенгский» в толщу ММП осуществлялась в период 2001–2013 гг. Суммарный объём закаченных вод 12,9 млн. м<sup>3</sup>. С 2013 по 2021 гг. закачка на участке не производилась. Результатом эксплуатации участка «Киенгский» в 2001–2013 гг. стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 3–5 раз), характеризующих массив ММП. Анализ полученных значений говорит о том, что объект исследований, необходимо рассматривать как техногенный водоносный горизонт, в котором уже сформирован упругий режим фильтрации, в общем характерный для субнапорных водоносных горизонтов и комплексов [406; 408]. Наличие данных блоков легко объясняется не только литолого-фациальными особенностями пород и структурно-тектоническими факторами. Полученные основные расчётные фильтрационные параметры подтвердили, что существующий ряд закачных скважин полностью обеспечивает заявленную потребность в экологически-безопасной закачке

дренажных вод рудника «Удачный», и будет способен обеспечить её в будущем (до 2032 г.), так как в данной ситуации ограничительной величиной выступает остаточная емкость участка.

В геологическом строении мерзлого яруса в пределах участка принимают участие карбонатные породы кембрия и ордовика, которые прорываются многочисленными секущими телами кимберлитовой ( $D_3-C_1$ ) и траптовой ( $P_2-T_1$ ) формаций (рис. 5.11). Интрузивные образования представлены кимберлитовыми трубками и жилами, а базитовые – штокообразными интрузиями и дайками [211].



1 – зона распространения техногенного водоносного горизонта в толще ММП; 2 – подмерзлотный водоносный горизонт; 3 – подошва ММП; 4 – пьезометрический уровень подмерзлотного горизонта, стрелка – напор, цифра – абсолютная отметка, м; 5 – стратиграфические границы свит; 6 – дайки долеритов; 7 – предполагаемые тектонические нарушения; 8 – гидрогеологическая скважина: сверху – ее номер, снизу – глубина, м

Рис. 5.11. Схематический криогидрогеологический разрез через Киенгский участок закачки (по [167] с дополнениями)

Структурно-тектоническое строение верхней части участка закачки сложное. В мерзлом ярусе центральной части полигона на уровне верхнекембрийских и ордовикских отложений наблюдаются несколько крупных неравномерно опущенных блоков пород. Границы объекта проходят: на севере, северо-востоке – по линии Октябрьского разлома; на юго-западе – по крайнему западному нарушению Вилуйско-Котуйской зоны, заполненной трапповыми интрузиями. Южная и юго-восточная границы блока несколько условные и не имеют четких геологических критериев, так как не были окончательно исследованы и, следовательно, полезные объемы формируемого резервуара в ММП могут быть существенно увеличены.

По данным геофизических исследований в пределах участка выделено несколько тектонически активных зон, которые нашли отражение в свойственных им системах разрывных

нарушений яруса мерзлых толщ пород. Это предопределило существующую повышенную трещиноватость и льдистость пород, а также емкость формируемого резервуара в ММП и, следовательно, перспективность использования криогенного массива для закачки дренажных рассолов. В разрезе осадочной толщи преобладают доломиты (50–60 %), известняки (30–40 %), присутствуют мергели (5,0–10 %). По шлифам для доломитов установлена микро-тонкозернистая структура и микрослоистая текстура. *Основная поглощающая толща на участке «Киенгский» залегает в интервале глубин 214-273 м.*

Участок Левобережный расположен на левом берегу реки Далдын, вблизи ручья Улахан-Бысыттаах, в 10 км на СВ от трубки «Удачная». Согласно Техническому проекту промышленной эксплуатации (отв. исполнитель Янников А.М.) узла закачки дренажных вод рудника «Удачный», участок «Левобережный» включает 45 скважин: 18 закачных, 27 наблюдательных (рис. 5.12).

В геолого-стратиграфическом разрезе участка принимают участие карбонатно-терригенные отложения *мархинской, моркокинской и онхойюряхской* свит верхнего кембрия. На участке «Левобережный» отложения верхнего кембрия вскрыты всеми скважинами, они хорошо коррелируются с опорным геофизическим разрезом для Далдыно-Алакитского кимберлитового поля и представлены отложениями верхней пачки *мархинской свиты* ( $C_3 m r h_4$ ), объединенной в геолого-геофизические пласты 24-25, нижней (пласты 22-23), верхней пачками (пласт 21) моркокинской свиты и нижней пачкой онхойюряхской свиты (пласт 20).

Выполненный комплекс работ и исследований позволил установить:

– на участке «Левобережный» многолетнемерзлые породы (ММП), имеющие включения видимого льда, заполняющего поры, каверны, трещины и слагающие верхний ярус криолитозоны, имеют мощность 260-300 м. Ниже располагается ярус охлаждённых пород, содержащих рассолы с отрицательной температурой (криопэги);

– подземные воды ВВК вскрываются на глубинах от 260 м до 299,5 м. Воды слабонапорные, напоры составляют от 12,9 м до 29,8 м;

– по результатам опытных наливов поглощающие коллекторы располагаются в интервале 180,0-295,0 м.

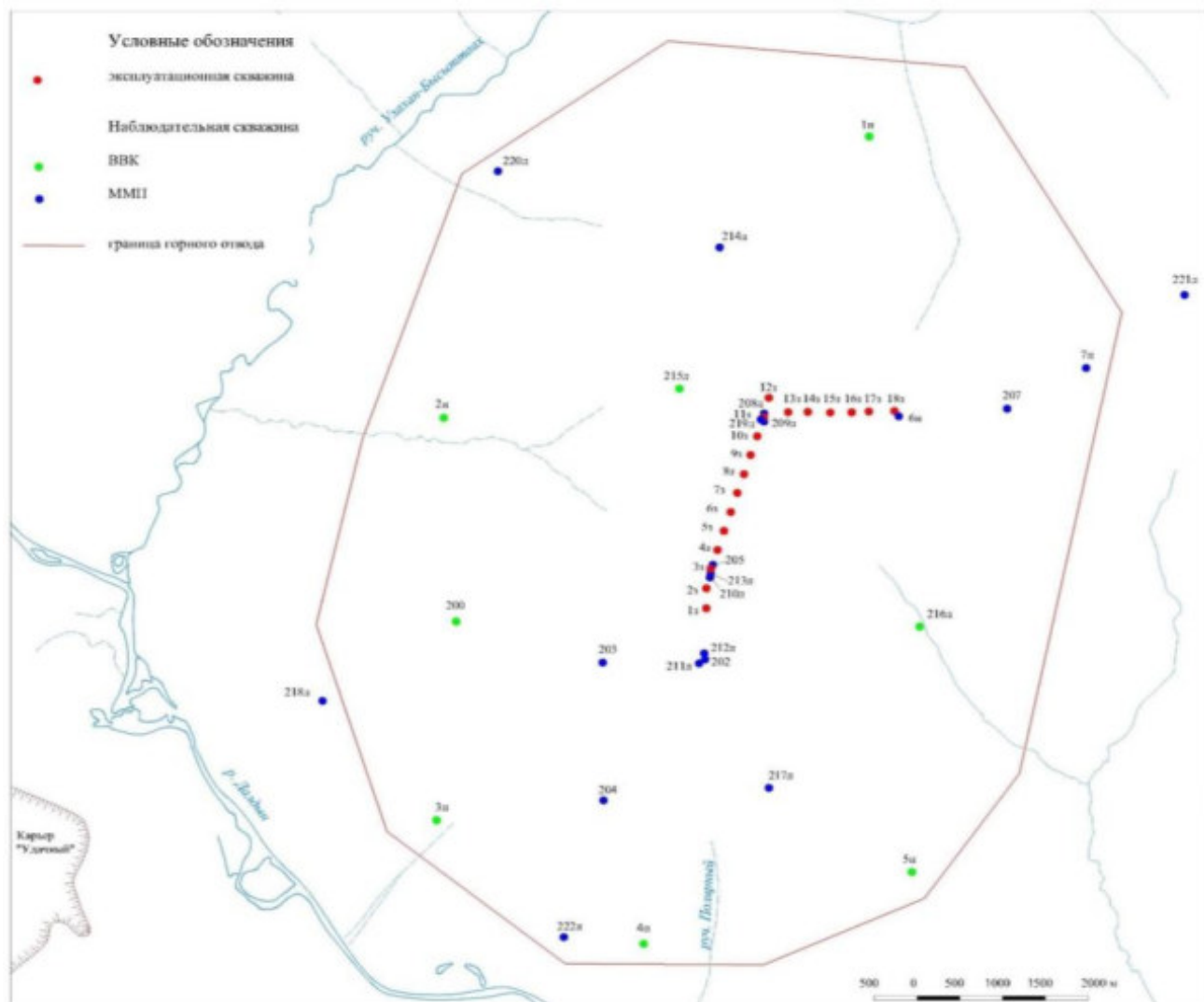


Рис. 5.12. Схема расположения скважин на участке «Левобережный» [408]

Эксплуатация участка в опытно-промышленном режиме началась в 2013 г. Всего с 2013 по 2019 г. на участке «Левобережный» закачено 18 038 100 м<sup>3</sup> дренажных вод, характеризующихся как хлоридно-кальциевые рассолы с минерализацией от 250 до 350 г/л. Результатом эксплуатации участка «Левобережный» стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 5 раз), характеризующих массив ММП. Полученные результаты коэффициентов водопроницаемости и приемистости, однозначно позволяют говорить о том, что максимальными параметрами характеризуется центральная и восточная часть участка [399; 401; 404]. Анализ полученных значений говорит о том, что в данном случае, в пределах участка сформировался техногенный водоносный горизонт, с упругим режимом фильтрации, в общем характерный для субнапорных водоносных горизонтов и комплексов. Наличие данных блоков легко объясняется не только литолого-фациальными особенностями пород и структурно-тектоническими факторами.

На основании анализа результатов поиска структур для закачки дренажных вод рудника Удачный и по результатам проведенных опытно-фильтрационных работ, для опытной

эксплуатации был выбран участок «Левобережный-2». Выбор данного участка обусловлен наиболее благоприятными фильтрационными, структурно-тектоническими и криогидрогеологическими характеристиками. Проведенные буровые работы и исследования по опытным скважинам показали, что участок Левобережный-2 может рассматриваться как перспективный для строительства узла закачки, эксплуатирующего коллекторы толщи ММП. Согласно проекту, на строительство участка закачки дренажных вод рудника «Удачный», участок «Левобережный-2» должен состоять из 39 скважин, в том числе: - 17 закачных скважин №№ 19з, 20з, 21з, 22з, 23з, 24з, 25з, 26з, 27з, 28з, 29з, 30з, 31з, 32з, 33з, 34з и 35з; - 10 наблюдательных скважин №№ 223л, 224л, 225л, 226л, 227л, 228л, 229л, 230л, 231л и 232л (рис. 5.13); - 12 опытных скважин №№ 8н, 9н, 10н, 11н, 12н, 13н, 14н, 15н, 16н, 17н, 18н и 19н.

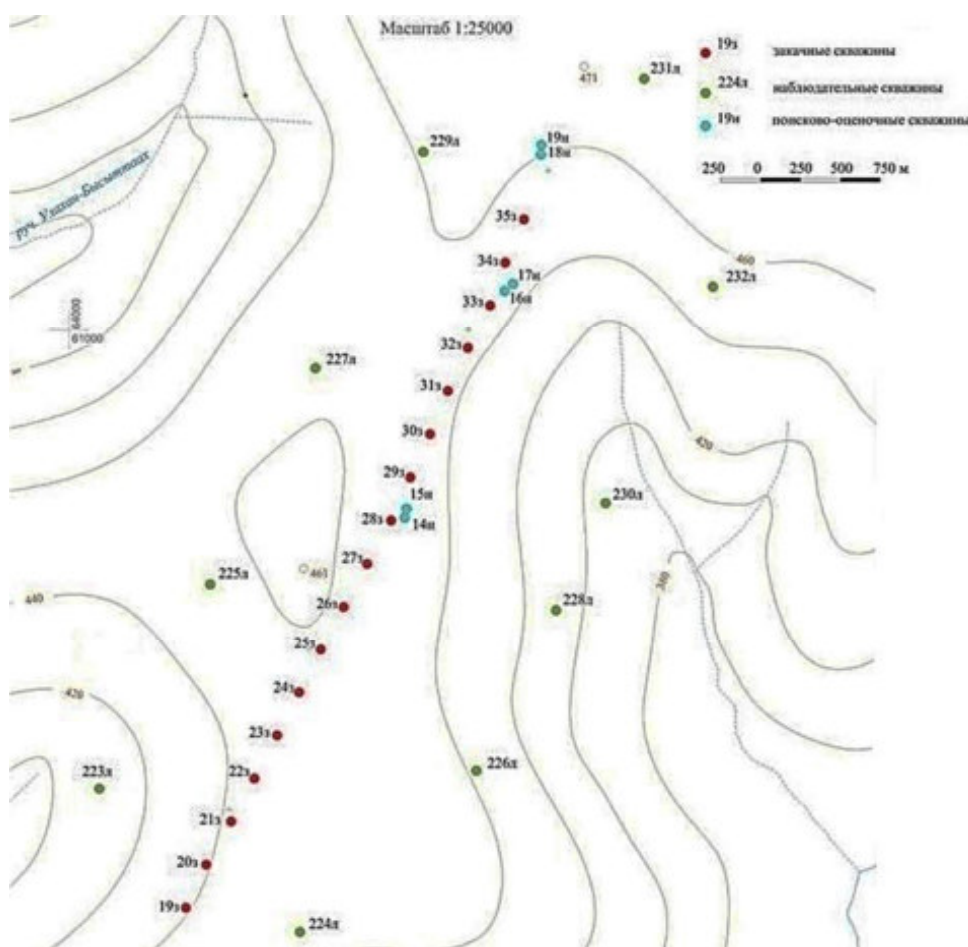


Рис. 5.13. Проектная схема расположения наблюдательных, закачных и опытных скважин участка «Левобережный-2» [408]

В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи ММП участка принимают участие нижнепалеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения кембрийской системы: онхойюряхской ( $C_3\text{ on}$ ), моркокинской ( $C_3\text{ mrk}$ ) и мархинской ( $C_3\text{ mrh}$ ) свит. По результатам проведенных гидрогеологических и геофизических исследований, породы,

обладающие наилучшими коллекторскими свойствами («рабочие интервалы»), залегают на глубинах 148–267 м.

Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми и кавернозно-трещиноватыми карбонатными породами моркокинской ( $C_3\ trk$ ) и мархинской ( $C_3\ trh$ ) свит. *Наиболее проницаемые пласты-коллекторы, по результатам расходомерии, отмечены в интервалах глубин 157,0–190,0 м и 206,0–266,0 м.*

В настоящее время участок обратной закачки «Левобережный-2» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме, согласно соответствующему Техническому проекту (ответственным исполнителем которого является автор) с суммарной производительностью закачки до  $270\text{ м}^3/\text{час}$  [478], в режиме свободного налива на базе 12 поглощающих скважин. По причине незначительного объёма закаченных вод  $\sim 400\text{ тыс. м}^3$ , формирование техногенного водоносного горизонта, также, как и зон вертикального массопереноса в верхнекембрийский водоносный комплекс в пределах участка не произошло. Схема расположения всех перечисленных участков закачки (на ММП и НВК) приведена на рисунке 5.14.

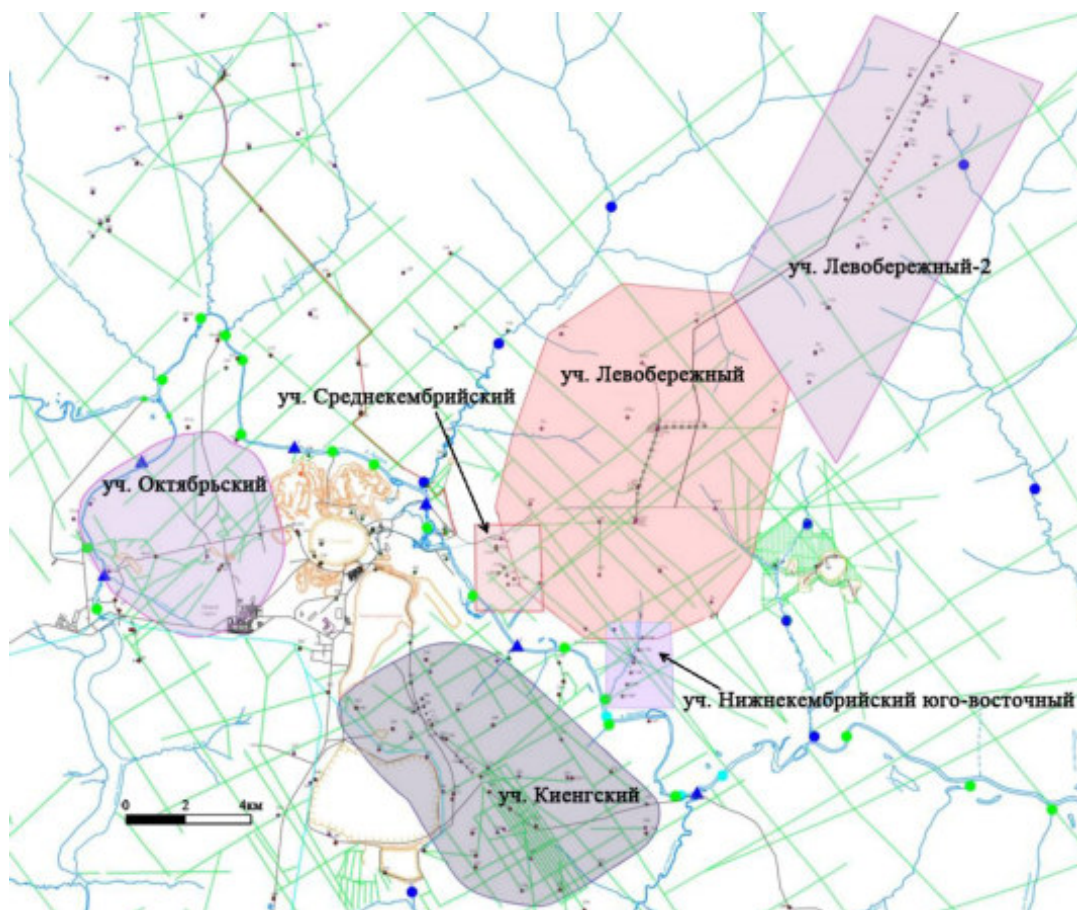


Рис. 5.14. Ситуационный план расположения участков закачки [408]

Учитывая текущую гидрогеологическую ситуацию на руднике Удачный (приток природных рассолов  $\sim 9000\text{ м}^3/\text{сут}$ ), прогнозируемый рост притоков к системе подземных горных выработок (до  $\sim 40\ 000\text{ м}^3/\text{сут}$  к 2062 г), в процессе отработки месторождения, а также

перспективу работы рудника до 2060 г., закачка дренажных вод в зону ММП не смогла бы решить в полной мере проблемы утилизации дренажных вод. Поэтому в пределах Далдынского кимберлитового поля потребовалось строительство новых участков, основанных на принципах обратной закачки. Для решения этой задачи был поставлен комплекс исследований нижнекембрийского водоносного комплекса (НВК).

Всего в пределах двух участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» было пробурено 10 опытных скважин глубиной 1700 м (рис. 5.15), с последующей постановкой опытно-фильтрационных работ.



Рис. 5.15. Схема расположения скважин [408]

Закачка дренажных вод на участках в коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса (рис. 5.16), выявленных на глубине 1450-1700 м от дневной поверхности, осуществлялась в опытном режиме в период 2016-2021 гг., всего в рамках опытно-фильтрационных работ было закачено ~ 3,7 млн. м<sup>3</sup>.

По результатам выполненного полевого комплекса работ, автором в период 2020-2022 гг. было выполнено гидрогеологическое моделирование, с последующим выпуском и успешной защитой Технических проектов опытно-промышленной эксплуатации узлов закачки шахтных и дренажных вод рудника «Удачный» на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».



Рис. 5.16. Интервал известняков кавернозных (коллекторы нижекембрийского водоносного комплекса) [408]

В рамках проектов были обоснованы параметры эксплуатации каждого из участков, учитывающие локальные особенности структурно-геологического и гидрогеологического строения. Были выполнены подтверждающие расчёты, позволяющие производить закачку в каждый из участков с расходом до 7200 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 14 400 м<sup>3</sup>/сут) в режиме свободного налива, и с расходом до 9600 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 19 200 м<sup>3</sup>/сут) с избыточными давлениями на устье, величиной до 3 МПа [479]. Необходимо отметить, что в процессе расчёта коэффициента водопроводимости было выявлено его неоднородное распределение даже в пределах участков закачки (таблица 5.3).

Таблица 5.3 - Основные гидродинамические коэффициенты участков «Среднекембрийский» и «Нижекембрийский юго-восточный» [416]

№ п/п	№ скважины	Коэффициент водопроводимости Км, м <sup>3</sup> /сут	Коэффициент пьезопроводности а, м <sup>2</sup> /сут
Среднекембрийский			
1	1 НК	20	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
2	2 НК	40	
3	3 НК	35	
4	4 НК	45	
5	2531	50	
Нижекембрийский юго-восточный			
6	5 НК	15	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
7	6 НК	55	
8	7 НК	10	
9	8 НК	60	
10	9 НК	40	

Учитывая прогнозируемый к руднику Удачный приток, приоритетным направлением

дальнейших исследований является определение перспективных участков закачки, ориентированных на коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса, с последующей интенсификацией их приёмистости, не только методами гидроразрыва и соляно-кислотных ванн, но и с учётом структурно-тектонического фактора, как определяющего в формировании емкостных параметров данного типа участков. Учитывая особенности литолого-фациальных условий Далдынского кимберлитового поля, наиболее предпочтительным выглядит их расположение севернее Октябрьского разлома [393; 405], как границы, влияющей не только на распределение фильтрационных параметров коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса, но и являющимся границей между криоартезианскими бассейнами [25; 29; 317;].

Участки, рекомендуемые для дальнейшего развития системы обратной закачки [395; 406], приведены на рис. 5.17.

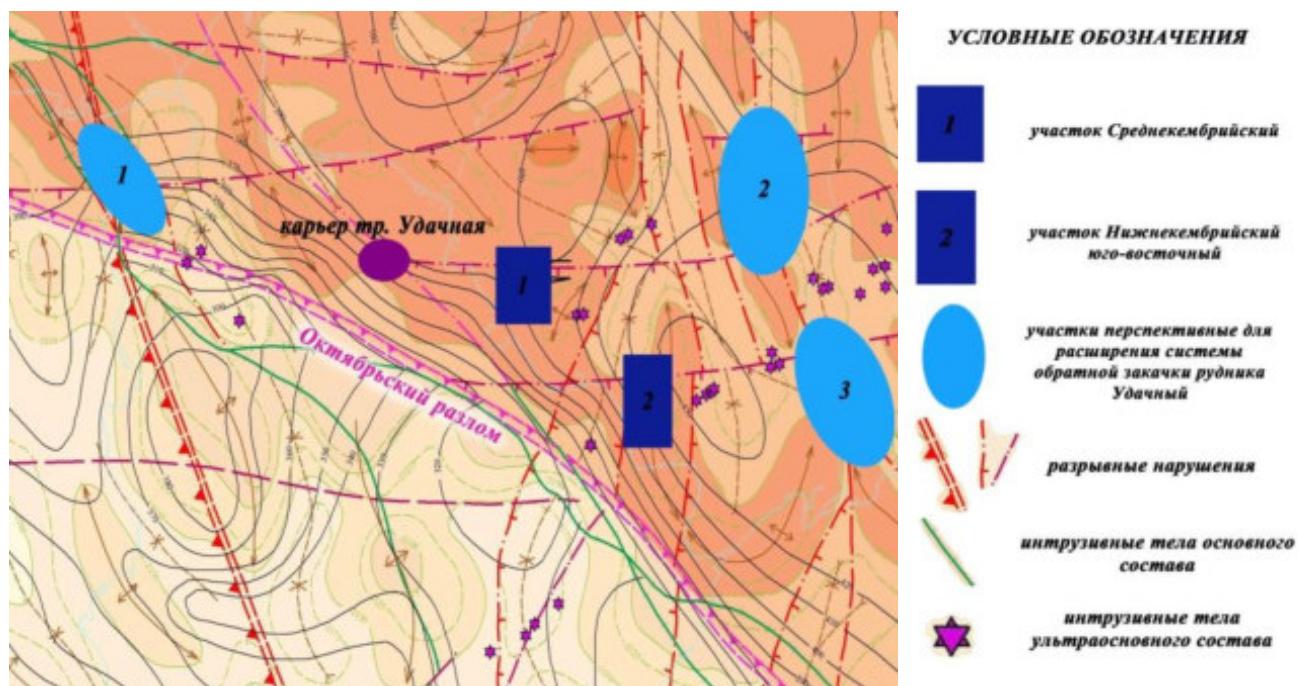


Рис. 5.17. Карта-схема перспективных участков для расширения системы обратной закачки рудника Удачный [416]

### 5.3 Мирнинское кимберлитовое поле

Для закачки дренажных рассолов месторождений Мирнинского кимберлитового поля используются коллекторы первого подмерзлотного метегеро-ичерского комплекса, испытывающего наибольшее техногенное воздействие, из-за отработки месторождений тр. Мир и Интернациональная [105; 106; 69; 371; 382; 480; 482 и др.]. Техногенная нагрузка на гидродинамический режим в предыдущие периоды тесно связана с этапами отработки трубки Мир. В настоящее время дополнительным, всё более значимым фактором выступает рудник Интернациональный. Пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского водоносного комплекса в результате промышленного освоения будет представлять собой две депрессионных

воронки от рудников Мир и Интернациональный, на которые накладываются репрессивные купола растекания, формируемые вот участков закачки, расположенных в зонах динамического воздействия Восточного и Западного разломов. Процесс обратной закачки сформировал техногенную границу обеспеченного питания, полностью компенсирующую текущую откачку на месторождениях, и, как следствие формирует планово ограниченные депрессионные воронки [380]. Всего с 1989-2022 гг. в метегеро-ичерский водоносный комплекс было закачено 340 млн. м<sup>3</sup> дренажных вод. При этом объём природных рассолов МИВК откаченных рудничными водоотливами составляет 294 млн. м<sup>3</sup>. 46 млн. м<sup>3</sup> – это дренажные воды, формируемые за счёт рассолов олекминской и толбачанской свит, а также вовлекаемых дебалансных вод буферных накопителей, представленных, как правило, метеорными водами, выпадающими непосредственно на их водную площадь, ограниченную нагорными канавами. Глубина закачных скважин составляет 525-550 м [457, 458, 459; 486].

В пределах олекминского водоносного горизонта и толбачанского водоносного комплекса, в результате отработки месторождений, формируются депрессионные воронки ограниченной площади, по причине невысоких фильтрационных параметров.

Экологическая надежность использования коллекторов подмерзлотных водоносных горизонтов, прежде всего, обеспечивается глубиной их залегания и надежностью экранирования вышележающими водоупорными пачками пород и отложений. Эффективность технологии обратной закачки подтверждается 32 летним периодом промышленной эксплуатации соответствующих участков. В общей сложности в пласты коллекторы метегеро-ичерского водоносного комплекса в зонах динамического влияния Восточного и Западного разломов, по состоянию на 01.01.2023 г, закачено порядка 340 млн. м<sup>3</sup> [358, 359; 360; 463; 464].

Участок Тымтайдахский расположен в 8 км от карьера «Мир» в верховьях ручья Тымтайдах, являющегося левым притоком реки Малая Ботуобия, в районе действующего накопителя минерализованных вод карьера «Мир», за региональным разломом «Восточный». С 1990 г. используется для закачки дренажных вод из карьера и рудника «Мир». На участке расположены три закачных скважины (9вн, 10вн, 11вн). Все поступающие в накопитель минерализованных вод карьера «Мир» дренажные воды закачиваются через систему закачных скважин обратно в ниже-среднекембрийский метегеро-ичерский водоносный комплекс. Закачка осуществляется в безнапорном постоянном режиме. В настоящее время откачка рассолов метегеро-ичерского водоносного комплекса на трубке Мир не осуществляется из-за приостановки добычных работ на месторождении. Возобновление осушения месторождения планируется в начале 30-х годов XXI века [402]. Действующий магистральный водовод состоит из двух линий трубопроводов, обеспечивающих суммарную подачу воды до 1600 м<sup>3</sup>/ч. По химическому составу транспортируемые воды представляют собой сероводородные хлоридные

натриевые рассолы с минерализацией 90-130 г/л, имеющие отрицательную температуру (минус 1,5 - минус 2° С), содержащие растворенные природные газы преимущественно углеводородно-азотного состава. Концентрация сероводорода в рассолах составляет от 20 до 80 мг/л. Рассолы обеднены микрокомпонентами, агрессивны к бетонам и металлам [363].

В состав сооружений накопителя минерализованных вод (НМВ) карьера «Мир» входят грунтовая плотина, нагорная канава, аварийный водосброс, дренажная насосная станция, для возврата фильтрационного расхода, поступающего через плотину. Максимальная высота плотины – 35,5 м (абсолютная отметка +325,00 м), длина по гребню составляет 1010 м [491]. Для отвода от накопителя минерализованных вод карьера «Мир» естественного стока ручья Тымтайдах сооружена нагорная канава по контуру чаши накопителя на абсолютных отметках +332,500 ÷ +330,00 м. Ширина канавы по дну - 6 м, заложение откосов - 1:23. Общая длина нагорной канавы - 6,26 км. Принципиальная схема системы обратной закачки (СОЗ) приведена на рисунке 5.18.

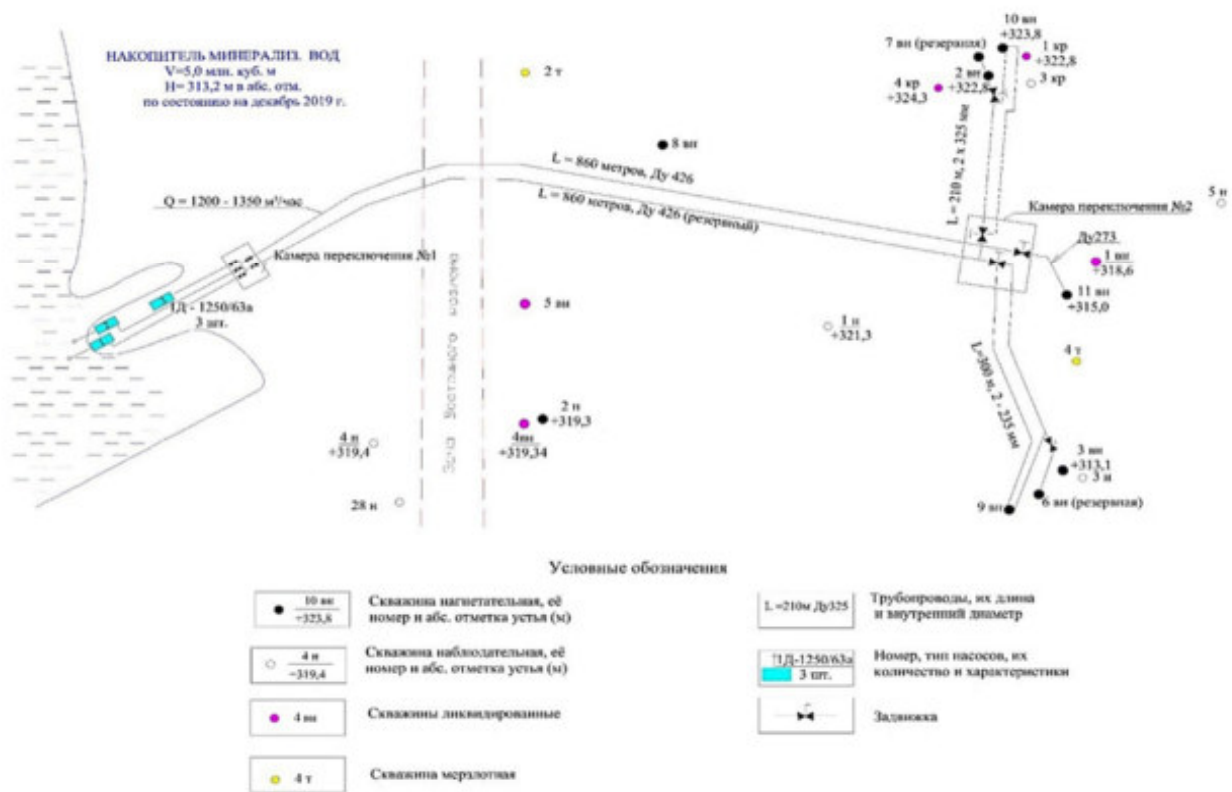


Рис. 5.18. Схема участка системы обратной закачки воды из накопителя минерализованных вод на ручье Тымтайдах (по [167] с дополнениями Янникова А.М.)

Она включает в себя три действующие насосные станции (2 рабочие, 1 резерв) производительностью 1000 м³/ч, напором 56 м и подающие трубопроводы диаметром 426-325 мм. Комплекс насосных установок водоотлива рудника рассчитан на откачку суммарного, практически установившегося многолетнего подтвержденного водопритока 1250 м³/ч.

Необходимо отметить, что данный участок являлся пионерным объектом для изучения возможности и целесообразности закачки дренажных вод обратно в коллекторы метегеричерского водоносного комплекса. Именно здесь в 1989 г. был организован опытно-производственный участок (ОПУ), который впоследствии, после подтверждения перспективности использования данного метода, был оборудован дополнительными закачными скважинами и переведён в систему обратной закачки (СОЗ) рудника Мир. Дальнейшее развитие добычных работ на трубке Мир (в рамках предыдущего проекта до аварии 2017 г.), привело к формированию дополнительного объема дренажных вод, что в свою очередь не могло быть обеспечено только уже построенным участком «Тымтайдахский». Это потребовало дополнительного изучения зоны Восточного разлома в пределах участков «Северный» и «Южный» (рис. 5.19), которым занимался непосредственно и занимался автор [404].

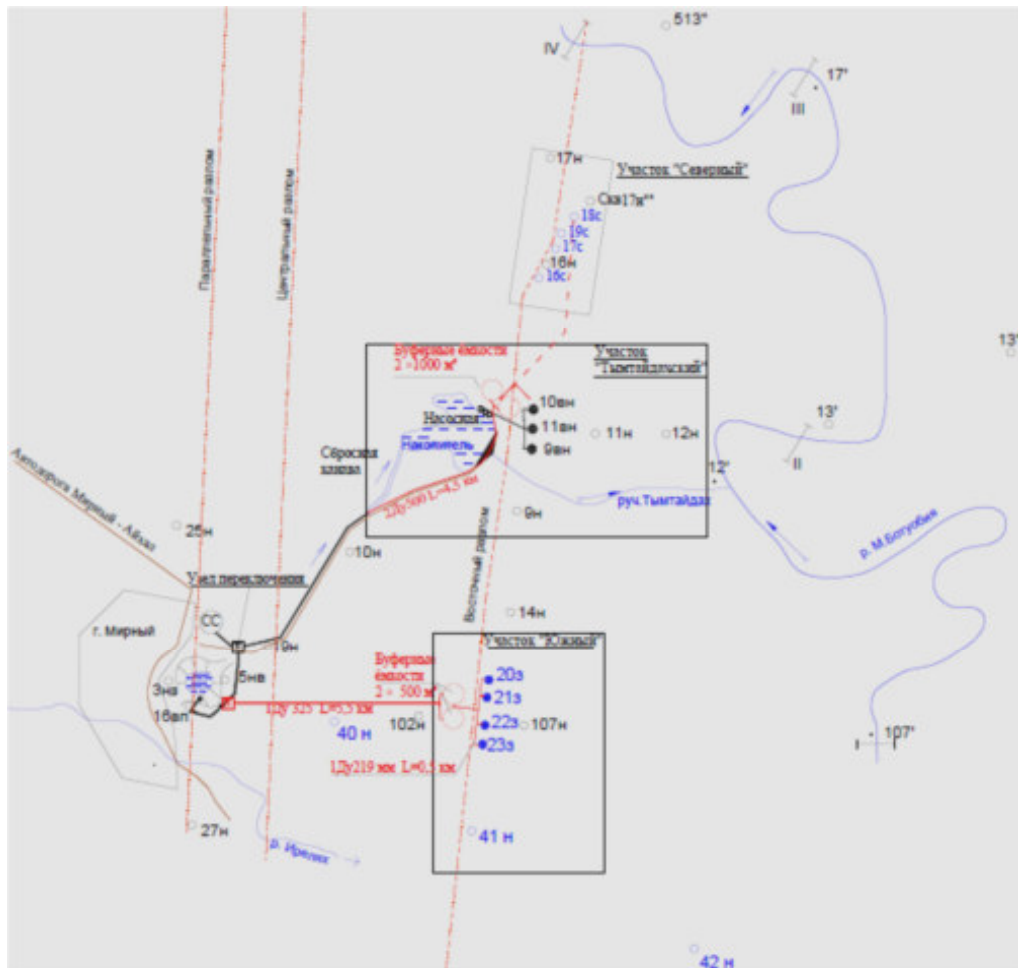


Рис. 5.19. Схема развития системы обратной закачки дренажных вод рудника «Мир» [393]

Необходимость гидрогеологических исследований в пределах участка «Южный» продиктована развитием системы обратной закачки рудника «Мир», а именно, распределением закачиваемых рассолов между существующим участком «Тымтайдахский» и участками «Южный» и «Северный». Объектом изучения выступали коллекторы метегерской и ичерской свит, как целевые пласты для реализации технологии обратной закачки. Основную роль в

формировании структурно-тектонического плана участка играет Восточный региональный разлом, определяемый по результатам магниторазведочных работ, как линейная аномалия. На площади участка «Южный» ширина аномалии около 400 м. По данным геологоразведочных работ мощность вертикально залегающей дайки порядка 50 м, глубина залегания 200–300 м. В пределах изучаемого участка зона динамического воздействия Восточного разлома характеризуется блоковым строением. Амплитуда взбросов и сбросов изменяется от 10 до 20 м. Характерной особенностью в пределах изучаемого участка является понижение кровли метегерской свиты к зоне региональных разломов [486].

Нижне-среднекембрийский подмерзлотный метегеро-ичерский водоносный комплекс на исследуемой площади залегает в интервале 304,7-534,0 м. Водоупорной кровлей служит подошва многолетнемерзлых пород, а подошвой – галогенно-карбонатные породы чарской свиты нижнего кембрия. В пределах участка прослеживается блоковое строение в зоне динамического влияния Восточного разлома. Кровля комплекса западного блока (скв. 102) отмечается на абс. отм. +28,6 м., восточного блока – на абс. отм. +43,1 м. Центральная часть зоны динамического влияния Восточного разлома разбита на множество блоков: кровля водоносного комплекса отмечается от +11,47 м. (скв. 105) до -58,6 м. (скв. 110/1). Общая мощность комплекса достигает 163 м. Стратиграфически водоносный комплекс приурочен к отложениям метегерской и ичерской свит. В разрезе комплекса выделяется 11 водоносных горизонтов (пласты-коллекторы), общей эффективной мощностью до 70,9 м. Первые семь коллекторов (№№ 1-7) приурочены к отложениям метегерской свиты и представлены доломитами известковыми. Мощность пластов-коллекторов от 1,0 м (коллектор № 5) до 8,4 м (коллектор № 7). В центральной части зоны динамического влияния Восточного разлома первые верхние пласты (коллекторы №№ 1, 2) замещены долеритами или огипсованной брекчией карбонатных пород. Тип коллекторов метегерской свиты, в основном, межзерновой и кавернозно-межзерновой. Коэффициент общей пористости, определённый геофизическими методами от 1,0 до 16,8 %. Коллекторы маломощные, не сообщающиеся и мало представляющие интерес с точки зрения приёмистости.

В разрезе ичерской свиты выделяется 4 пласта-коллектора (№№ 8-11). Наибольший интерес с точки зрения приёмистости представляет коллектор № 8, распространённый на изучаемой площади повсеместно; его кровля отмечается на гипсометрических отметках от -52,1 до -67,9 м. за пределами зоны влияния Восточного разлома. В пределах зоны влияния разлома его кровля изменяется от (-52,1 м.) до (-95,1 м). По скважине 101 блок скарнированных известняков поднят до глубины (-27,8 м). Эффективная мощность восьмого коллектора от 31,3 м. (скв. 102 – западная часть за пределами зоны влияния Восточного разлома) до 64,6 м. (центральная часть Зоны разлома – скв. 110/1). Коллектор представлен известняками с трещинной составляющей пористости. Коэффициент пористости по БК изменяется от 1,2 до

17 %. Интервалы коллекторов метегерской и ичерской свит по скважинам, расположенным непосредственно на изучаемом участке «Южный» приведены в таблице 5.4 [393; 416].

Определение основных гидродинамических параметров выполнялось при помощи организации опытных наливов в закачные скважины участка. Опытно-фильтрационные работы производились в режиме налива со свободной поверхностью. Для налива использовались дренажные рассолы карьера трубки «Мир», которые подавались по постоянному водоводу до опытных скважин. Суммарное время опытов, с учётом восстановления, составило 1 300 часов. За это время было закачено ~ 100 тыс. м<sup>3</sup> рассолов, в результате рост уровней по наблюдательным скважинам составил от 1 до 10 м.

Таблица 5.4. - Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса на участке «Южный» [393]

№ скважины	Интервал коллекторов, м	Интервал коллекторов в абс. отм., м	Мощность, м.	№ скважины	Интервал коллекторов, м	Интервал коллекторов в абс. отм., м	Мощность, м.
20з	339,0-340,0	+9,9/+8,9	1,0	21з	347,5 – 348,5	+4,2/+3,2	1.0
	346,0-347,0	+2,9/+1,9	1,0		353,6 – 355,0	-1,9/-3,3	1.4
	358,8-359,9	-9,9/-11,0	1,1		365,6 – 367,4	-13,9/-15,7	1.8
	362,0-363,0	-13,1/-14,1	1,0		370,4 – 372,4	-18,7/-20,7	2.0
	375,0-376,0	-26,1/-27,1	1,0		398,0 – 398,8	-46,3/-47,1	0.8
	442,0-476,0	-93,1/-127,1	34,0		409,6 – 411,4	-57,9/-59,7	1.8
22з	325,0-326,7	+23,8/+22,1	1,7	23з	337,0-338,4	+11,1/+9,7	1,4
	331,4-333,3	+17,4/+15,5	1,9		350,0-351,8	-1,9/-3,7	1,8
	342,8-344,0	+6,0/+4,8	1,2		368,8-370,0	-20,7/-21,9	1,2
	346,8-348,0	+2,0/+0,8	1,2		390,0-391,4	-41,9/-43,3	1,4
	364,5-366,0	-15,7/-17,2	1,5		412,0-414,0	-63,9/-65,9	2,0
	394,5-396,6	-45,7/-47,8	2,1		442,4-475,0	-94,3/-126,9	32,6
	410,7-417,0	-61,9/-68,2	6,3				
	426,3-475,6	-77,5/-126,8	49,3				

Расчёт основных гидрогеологических параметров ( $a$ ,  $T$  (km)) был выполнен на основании обработки результатов ОФР. Купол растекания, формируемый от производства опытных наливов на участке закачки «Южный» во время выполнения гидрогеологических исследований накладывался на уже сформированную пьезометрическую поверхность (в результате эксплуатации участка «Тымтайдахский»). Причём воздействие действующей системы обратной закачки на формирование единого купола растекания было доминирующим, поскольку средний дебит закачки на участке «Тымтайдахский» составлял 1 200 м<sup>3</sup>/час, а средний дебит при выполнении опытно-эксплуатационного налива по скважинам – 90-120 м<sup>3</sup>/час. Определение параметров производилось в результате интерпретации кустовых наливов, с постоянным

дебитом по возмущающей скважине, т. к. воздействие, от постоянно (стабильно) работающей системы обратной закачки рудника «Мир», было стационарно. Влияние Восточного разлома закладывалось граничным условием 3-го рода. Определение параметров производилось после качественной интерпретации графиков комбинированного прослеживания, позволяющих полноценно оценить влияние структурно-тектонического фактора при определении параметров. На кривых графиков отмечается влияние неоднородности среды при фильтрации и миграции пластовых вод. Расчёты выполнены с помощью графоаналитического метода программным продуктом ANSDIMAT. По параметру водопроницаемости опытный участок можно представить схематично в плане следующим образом:

1. Межразломный блок-зона «Восточный-Центральный», в ней расположена скважина № 102, который характеризует межразломную зону между Восточным и Центральным разломами. Эта зона характеризуется величиной  $T = 93-244 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; величина пьезопроводности,  $a$  составляет  $0,12-0,46 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

2. Блок-зона Восточного разлома. В ней расположены наблюдательные скважины №№ 108, 110, 111 и 41н. Характеризует зону Восточного разлома, непосредственно используемую для обратной закачки дренажных вод карьера трубки «Мир». Эта зона характеризуется величиной  $T = 76-104 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; величина пьезопроводности,  $a$  составляет  $0,4-0,47 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

3. Межразломный блок-зона «Восточный-Аппаинский». В ней расположена скважина № 42н, которая характеризует межразломную зону между Восточным и Аппаинскими разломами. Эта зона характеризуется величиной  $T = 114-136 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; величина пьезопроводности,  $a$  составляет  $0,51-0,59 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Необходимо отметить, что натурные наблюдения за изменением пьезометрической поверхности во времени и по площади на протяжении всего периода работ подтвердили тесную взаимосвязь между выделенными зонами.

В пределах участка «Северный» зона динамического воздействия Восточного разлома также характеризуется блоковым строением. Отличительной особенностью является существенное увеличение амплитуды взбросов и сбросов от 70 м. Отдельно необходимо отметить впервые выявленное наличие в осевой части разлома обводненных пород мирнинской свиты, причём насыщение пестроцветных мергелей происходит рассолами метегеро-ичерского комплекса, что подтверждается химией вскрываемых вод и уровнем режимом опытных скважин [393; 408]. Вскрытие вод происходит на глубине 230 м от дневной поверхности. Ширина зоны аномального обводнения составляет от 40 до 80 м, что также подтверждено опытным бурением на этапе поисково-оценочных работ.

Нижне-среднекембрийский подмерзлотный метегеро-ичерский водоносный комплекс на исследуемой площади залегает в интервале 398,0-618,2 м. Водоупорной кровлей служит подошва многолетнемерзлых пород, а подошвой – галогенно-карбонатные породы чарской свиты нижнего кембрия. Помимо увеличенной мощности в пределах зоны динамического влияния Восточного разлома, отличительной особенностью метегерской свиты в пределах участка «Северный» является преобладание терригенно-карбонатных разностей до 70%. В разрезе ичерской свиты в отметках 8-го коллектора (на скважине 17") были зафиксированы не свойственные плотные песчаники и запесоченные известняки, а по скважинам 16С, 17С, 18С и 19С – замещение карбонатных пород 9-го коллектора на сульфатно-галогенные. По скважине 16С в отметках пласта №21 метегерской свиты зафиксирована пластовая интрузия долеритов мощностью 20,1 м. По скважине 18С в отметках пластов №№ 2-6 и №№ 8-19 происходит потеря корреляции, т.к. вскрывается сильно перемятая карбонатная брекчия. Интервалы коллекторов метегерской и ичерской свит по скважинам, расположенным непосредственно на изучаемом участке «Северный», приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5. - Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса на участке «Северный» [393]

№ скважины	Интервал коллекторов, м	Интервал коллекторов в абс. отм., м	Мощность, м.	№ скважины	Интервал коллекторов, м	Интервал коллекторов в абс. отм., м	Мощность, м.
16С	440-441	-106,8/-107,8	1,0	17С	470-471	-135,6/-136,6	1,0
	445-446	-111,8/-112,8	1,0		477-479	-142,6/-144,6	2,0
	460-468	-126,8/-134,8	8,0		488-490	-153,6/-155,6	2,0
	470-477	-136,8/-143,8	7,0		493-494	-158,6/-159,6	1,0
	505-512	-171,8/-178,8	7,0		502-505	-167,6/-170,6	3,0
	525-536	-191,8/-202,8	11,0		528-530	-193,6/-195,6	2,0
	566-601	-232,8/-267,8	35,0		544-549	-209,6/-214,6	5,0
18С	506-511	-183,1/-188,1	5,0	19С	561-599	-226,6/-264,6	38,0
	518-558	-195,1/-235,1	40,0		460-462	-134,9/-136,9	2,0
			478-481		-152,9/-155,9	3,0	
			489-492		-163,9/-166,9	3,0	
			529-533		-203,9/-207,9	4,0	
			538-542		-212,9/-216,9	4,0	
			564-597	-238,9/-271,9	33,0		

Поисково-разведочные и ОФР на участке «Северный» проводились в два этапа. На первом этапе исследований оценивались приёмистость скважин и определялись основные гидрогеологические параметры метегеро-ичерского водоносного комплекса, непосредственно для каждой вновь сооружённой скважины. Определение проводились по кустовым наливам,

продолжительностью от 5 до 10 суток. На втором этапе был произведён кустовой налив продолжительностью 40 суток.

После выполнения ОФР была произведена интерпретация полученных натуральных наблюдений и определены расчётные параметры участка. На первом этапе гидрогеологических исследований (после проведённого освоения скважин и опытных откачек), были произведены кустовые опытные наливов во вновь пробуренные скважины. Для наливов использовались дренажные рассолы карьера трубки «Мир», рассолы подавались из существующего накопителя на участке СОЗ по временному водоводу до опытных скважин.

Схематично в плане, по параметру водопроницаемости, опытный участок можно представить следующим образом:

1. Блок-зона расположения скважин 16н и 16С характеризует непосредственно зону эндо- и экзо-контактов разлома и частично тело долеритов. Скважина 16С в интервале 405,5-417,0 м вскрыла согласно залегающий силл сильно выветрелых долеритов, также по стволу скважины выделено несколько зон интенсивного дробления. Скважина 16н с глубины 360 м вскрыла тектоническую брекчию, состоящую из обломков долеритов и известняков, на глубине 567.2 вскрыта интрузия долеритов. Данный блок осложнён наличием основного магматизма трапповой формации и характеризуется величиной  $KM = 4-30 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

2. Блок-зона, ограниченная скважинами 17С, 19С и 17н. Характеризует приразломную зону, расположенную в непосредственной близости от оси Восточного разлома (100–250 м). Главной особенностью зоны являются повышенные значения проводимости, обусловленные формированием дополнительной «свободной ёмкости» из-за воздействия постгенетических (постседиментационных) процессов, связанных с внедрением серии кулисообразных даек (магматизм трапповой формации) Восточного разлома. Характеризуется величиной  $KM = 40-88 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

3. Блок-зона, ограниченная скважинами 18С и 17". Характеризует приразломную зону, расположенную от оси Восточного разлома на удалении 300–500 м. Характеризуется величиной  $T = 17-30 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

Проводимость опытного участка «Северный» ниже проводимости на участках «Южный» и «Тымтайдахский» в 1,5–2,0 раза. Таким образом, в рамках Восточного разлома опробованы и эксплуатируются два участка – «Южный» и «Тымтайдахский». Участок «Тымтайдахский» - являлся пионерной разработкой в рамках реализации системы обратной закачки, и успешно эксплуатируется более 30 лет. Участок «Южный» - разведан, опробован и введен в строй в 2017 г.

Необходимость гидрогеологических исследований Западного разлома продиктована развитием системы обратной закачки рудника Интернациональный. Объектом изучения

выступали коллекторы метегеро-ичерского водоносного комплекса в зоне динамического влияния Западного разлома, как целевые пласты для реализации технологии обратной закачки.

Зона Западного разлома до момента его испытания в качестве рассоло-поглощающей структуры [161] была изучена структурно-разведочными скважинами различной глубины и сейсморазведочными профилями. Разлом на всем протяжении характеризуется, в отличие от других, небольшими амплитудами блоковых смещений приконтактных вмещающих пород и, как следствие, незначительными зонами дробления их и дайки долеритов, выполняющей разлом. Разлом по своей тектонической активности испытывал спокойное развитие. В настоящее время в зоне динамического влияния Западного разлома построено и эксплуатируется *два узла закачки УОЗ (узел обратной закачки) и УЗВ (узел закачки вод)*. УОЗ располагается в 2,5 км по отношению к промышленной площадке рудника «Интернациональный», за региональным западным разломом (являющимся естественным барражирующим экраном).

Помимо УОЗ, эксплуатируемого с 2001 г., с 2008 г. (с момента возобновления открытых работ в карьере трубки «Интернациональная»), началась эксплуатация узла закачки воды (УЗВ) из карьера «Новинка». Откачка с карьера «Новинка» и закачка в метегеро-ичерский водоносный комплекс происходит в летне-осенний период. Закачные скважины УЗВ располагаются в пределах границ горного отвода, эксплуатируемого узла обратной закачки, промышленной площадки рудника. Узел закачки вод (УЗВ) включает в себя: закачные скважины северной (5 скважин) и южной веток (7 скважин), наблюдательные скважины, систему трубопроводов, накопитель (карьер «Новинка»), плавучую насосную станцию, узлы переключения. Функциональная схема УЗВ приведена на рис. 5.20.

Схема закачки предполагает подачу ненасыщенных рассолов непосредственно из накопителя (карьер «Новинка»). Система обратной закачки представляет собой линейный ряд скважин, рассчитанный на суммарную производительность 1180 м<sup>3</sup>/час. В качестве закачных скважин используются 5 существующих и 7 дополнительных скважин глубиной до 560 м. Скважины располагаются на расстоянии 150 м друг от друга.

Длина линейного ряда закачных скважин составляет 1350 м при приемистости каждой скважины до 100 м<sup>3</sup>/час. Строительство скважин южной ветки УЗВ и их опробование были выполнены в 2014-2015 гг., в гидрогеологическом сопровождении данных скважин автор принимал личное участие. ОФР проводились с 15.09.2015 по 18.10.2015 и были организованы в виде поочередных наливов-нагнетаний по закачным скважинам южной ветки.

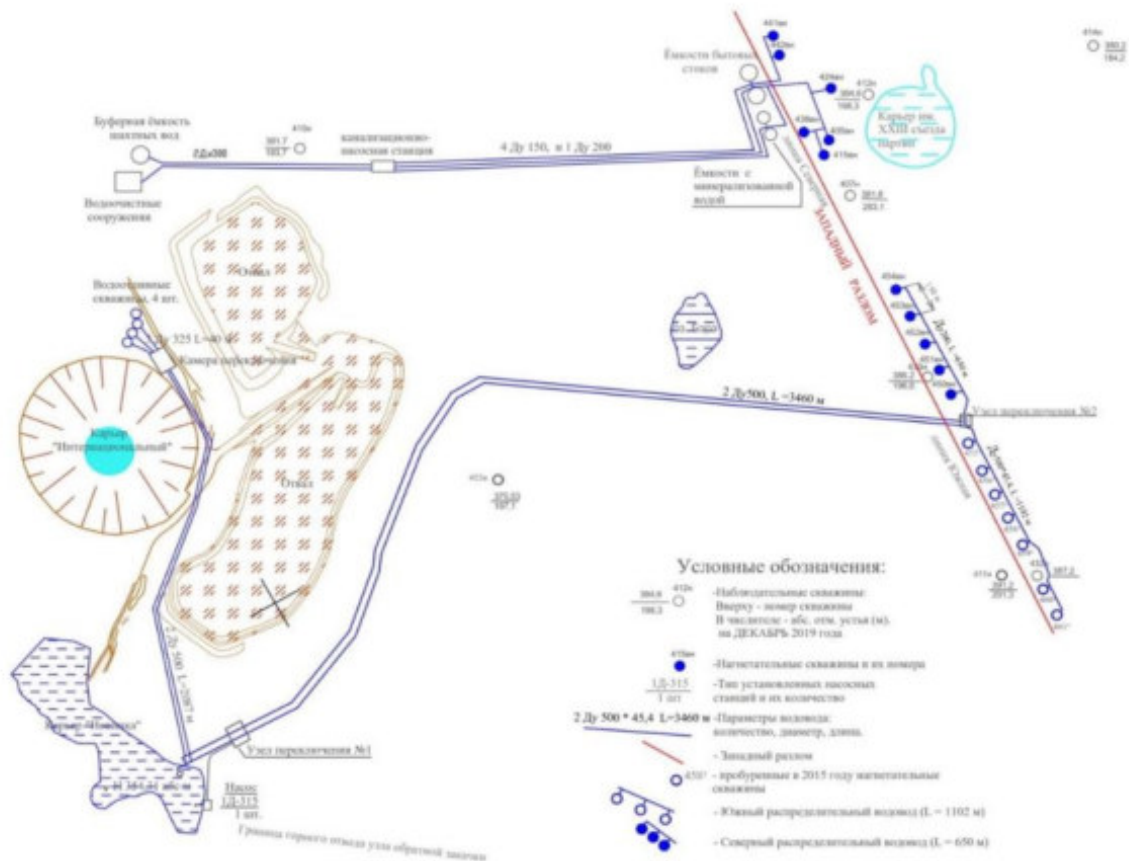


Рис. 5.20. Схема заправки воды на участках обратной заправки и участках заправки вод рудника «Интернациональный» [393]

Максимальная приемистость скважин составила: 456з – 200 м<sup>3</sup>/час (в режиме свободного налива); 457з – 150 м<sup>3</sup>/час (избыточное давление на устье 5,3 кгс/см<sup>2</sup>); 458з – 95 м<sup>3</sup>/час (избыточное давление на устье 3,9 кгс/см<sup>2</sup>); 459з – 200 м<sup>3</sup>/час (в режиме свободного налива); 460з – 47 м<sup>3</sup>/час (избыточное давление на устье 4,3 кгс/см<sup>2</sup>); 461з – 125 м<sup>3</sup>/час (избыточное давление на устье 4,2 кгс/см<sup>2</sup>). Интервалы коллекторов и гидродинамические характеристики по скважинам южного ряда приведены в приложении 8.

По скважинам №458з и №461з интервалы коллекторов не определялись, коэффициент водопроницаемости для этих закачных скважин составил: 15 м<sup>2</sup>/сут для №458з и 20 м<sup>2</sup>/сут для №461з соответственно. Обращает на себя внимание большой разброс значений водопроницаемости от 7 до 91 м<sup>2</sup>/сут, причём распределение параметра не подлежит простому прогнозированию, уменьшение или увеличение по направлениям север-юг и т.д.

Наибольшими параметрами характеризуются скважины №455з (60 м<sup>2</sup>/сут) и №456з (91 м<sup>2</sup>/сут), наименьшими – №460з (7 м<sup>2</sup>/сут). Учитывая характер изменения водопроницаемости скважин, и тот факт, что их конструктивное исполнение одинаково, наиболее логичным объяснением такого распределения является наличие опережающих низкоранговых разрывных структур и удаленность закачных скважин от них. Другими словами, опережающие разломы прогнозируются в районе скважин №№ 455з, 456з и 459з. Зоны расположения скважин №458з и

№460з, по всей видимости, отдалены от оперяющих разломов на расстояния более 15-20 м. Скважины №457з и №461з – характеризуются усреднёнными гидродинамическими параметрами, в целом характерными для зоны динамического влияния Западного разлома.

Проведенными работами подтверждено, что структура Западного разлома обладает более низкими гидродинамическими характеристиками по сравнению с Аппаинским, Восточным и Центральным разломами. Однако, выявленные низкоранговые неоднородности разломной зоны и потенциально-блоковое строение с отдельными более проницаемыми блоками (до 90 м<sup>2</sup>/сут) позволяют принципиально рассматривать данную структуру, как основную для производства обратной закачки дренажных вод рудника «Интернациональный».

#### *Перспективы развития системы обратной закачки в коллекторы МИВК*

Как видно из представленной выше информации, дренажные воды, поступающие в рудник «Интернациональный», закачиваются в пределах динамического воздействия зоны Западного разлома, для рудника «Мир» использовалась, и будет использоваться в будущем, аналогичная зона Восточного разлома. Дальнейшая безопасная отработка данных месторождений формирует следующие проблемы:

1. Существующие системы обратной закачки в своем современном виде не смогут полностью обеспечить потребность в закачке формируемых дренажных вод, особенно учитывая рост объёмов дренажных вод при возобновлении добычи на руднике Мир, связанный с ликвидацией водного объекта (затопленных выработок) и увеличением площади осушения [234; 236; 237].

2. Концентрированность существующих закачных скважин приводит к формированию избыточного напорного фронта в эпицентрах закачки, что в свою очередь, является причиной проблемы обратного возврата закачиваемых вод к горным выработкам. Величина возврата, по разным оценкам составляет от 25 до 40%. Увеличение расстояний и разделение закачиваемых объёмов между разными участками приведёт к общему понижению уровней в эпицентрах закачки, и как следствие уменьшению разницы напоров.

Решение указанных проблем лежит в плоскости дальнейшего развития систем обратной закачки, а именно строительстве дополнительных закачных скважин в рамках как уже опробованных разрывных структур, так и опробование перспективных блоковых дислокаций. Обязательным условием выглядит учёт не только структурно-тектонического строения территории, но и литолого-фациальные особенности, а также направление естественного потока. В настоящее время основным направлением увеличения производительности систем закачки выступает увеличение количества закачных скважин, в рамках уже исследованных участков, с понятной геологией, ранее прошедших поисково-оценочный этап. Например, бурение семи

дополнительных закачных скважин в зоне Западного разлома, для дренажных вод рудника «Интернациональный», суммарной производительностью закачки  $\sim 800$  м<sup>3</sup>/час; или строительство участка «Южный», в логе Горелый, для развития системы обратной закачки рудника «Мир» за Восточным разломом (было пробурено 4 закачных скважины, с суммарной производительностью  $\sim 300$  м<sup>3</sup>/час).

Перечисленные решения, безусловно, позволяют создать необходимый резерв мощностей. Но главная проблема принимаемых решений – это безальтернативность использования динамических зон Западного разлома (для рудника Интернациональный) и Восточного разлома (для рудника Мир). Из-за возможного падения производительности уже построенных систем обратной закачки, в случае кольматации коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса, а также из-за прогнозируемого увеличения объема формируемых дренажных вод, есть необходимость рассмотрения перспективы использования в качестве рассолопоглощающих других блоковых дислокаций и зон тектонических нарушений. Для обоснования перспективности зон динамического воздействия региональных разломов (кроме Восточного и Западного), было выполнено изучение площадных вариаций коэффициента водопроводимости. Объектом изучения выступали коллекторы МИВК, как целевые пласты для реализации технологии обратной закачки. Для графического отображения площадных закономерностей распределения коэффициента водопроводимости автором составлена карта-схема водопроводимости Мирнинского кимберлитового поля (рис. 5.21).

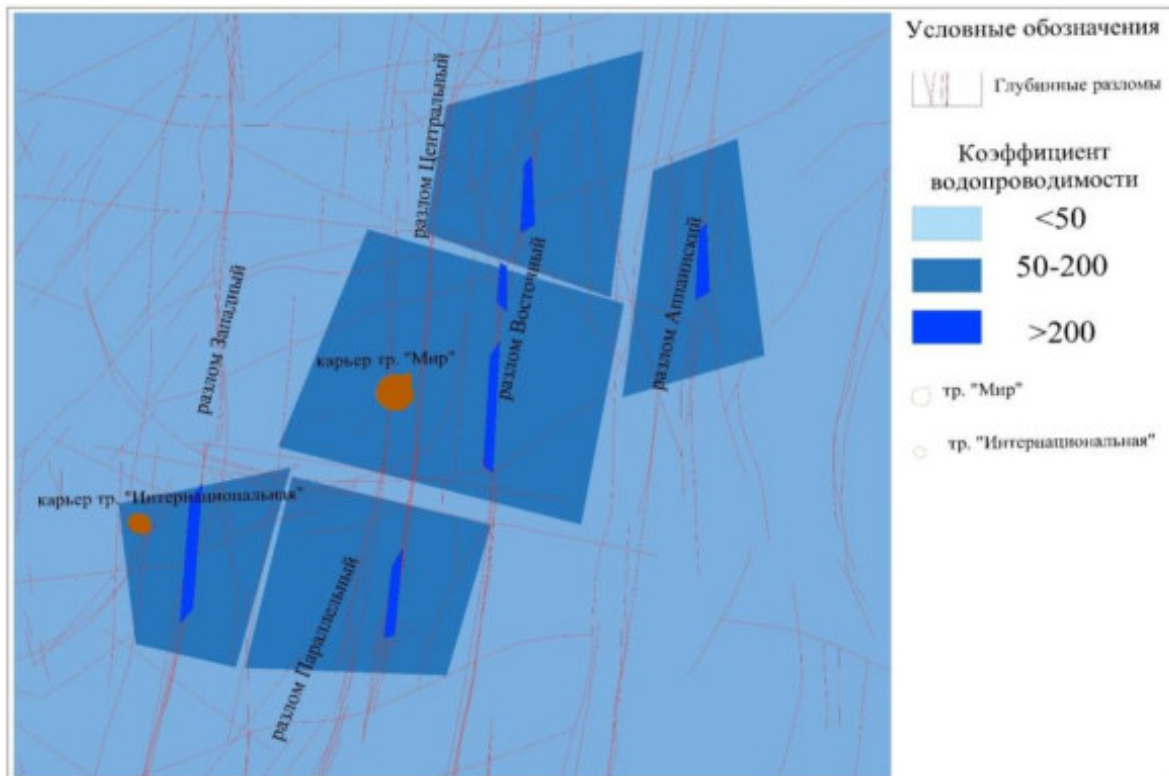


Рис. 5.21. Карта-схема водопроводимости метегеро-ичерского водоносного комплекса

Для построения приведенной схемы были проанализированы более 500 опытно-фильтрационных работ, а также более 50 тыс. замеров уровней подземных вод. Результатирующим явилось определение коэффициента водопроницаемости в зонах опытных скважин (прил. 9).

Определение параметра водопроницаемости проводилось в результате анализа проведенных за последние 20 лет по сети опытных скважин опытно-фильтрационных работ. В целом для МИВК в пределах Мирнинского кимберлитового поля характерной размерностью  $T$  является значение от 10 до 50 м<sup>2</sup>/сут. Однако влияние региональных разломов приводит к формированию нескольких межразломных блоков-зон, отличающихся повышенной водопроницаемостью (от 50 до 200 м<sup>2</sup>/сут). Название блоков-зон были даны автором, по главным региональным разломам (Западный, Параллельный, Центральный, Восточный и Аппаинский): - Маччобинско-Западно-Центральная блок-зона; - Центрально-Параллельная блок-зона; - Параллельно-Центрально-Восточная блок зона; - Центрально-Восточная блок-зона; - Центрально-Аппаинская блок зона.

Пространственное выделение блоков хорошо коррелируется с наличием подчиненной субширотной системы глубинных разломов, которые контролируют распределение открытой трещиноватости в северном и южных направлениях.

Отдельно необходимо выделить зоны динамического влияния региональных разломов, характеризующихся максимальными коэффициентами водопроницаемости (более 200 м<sup>2</sup>/сут). В пределах данных линейных зон, шириной не более 50–100 м и производится бурение закачных скважин. Чаще всего выбирается линейное расположение. В настоящее время для обратной закачки активно используются зоны Западного и Восточного разломов, характеристика участков закачки была приведена ранее.

Выделяемая в рамках Центрального разлома зона повышенной водопроницаемости была заверена и разведана в пределах участка «Юлегир». Однако особенности строения данного разлома, а именно его палеорифтовая природа, с фактическим отсутствием экранности в северном направлении делает его эксплуатацию нецелесообразной, по причине высокого процента возврата в направлении карьера «Мир».

Необходимость гидрогеологических исследований Аппаинского разлома продиктована развитием системы обратной закачки рудника Мир. А именно, в строительстве дополнительных закачных скважин в рамках как уже опробованных разрывных структур, так и опробование перспективных блоковых дислокаций, к числу которых принадлежит зона динамического воздействия Аппаинского разлома, имеющего более сложно-сочлененное строение, чем рассмотренный ранее Восточный разлом, что связано со структурно-тектоническим строением всего участка в целом. Перспективность использования данного разрывного нарушения заключается не только в том, что он состоит из двух сочлененных, сопровождаемых зонами

дробления, и сетью подчиненных тектонических нарушений, разломов, но и в общем понижении в направлении на северо-восток, с последующим корытообразным раскрытием в направлении Вилуйской синеклизы. В настоящее время в рамках зоны динамического влияния данного разлома изучено два участка северный и центральный (гидрогеологическое сопровождение осуществлялось лично автором). Литологические разности метегерской и ичерской свит на изучаемом участке соответствует строению данных свит в региональном плане. В рамках северной части было подтверждено выявленное ранее фациальное изменение ичерской свиты с увеличением галогенных пород в разрезе. Обращает на себя внимание высокая кавернозность интервалов коллекторов (рис. 5.22), но из-за высокой степени залеченности каверн каменной солью и разделенностью кавернозных доломитов солями и ангидритами, характеристические гидродинамические коэффициенты коллекторов значительно ухудшаются.



Рис. 5.22. Коллекторы ичерской свиты в северной части (по скважине 513") (фото А.М. Янникова)

Кавернозность карбонатных пород в интервале метегерской и ичерской свит по центральной части гораздо меньше (рис. 5.23), но из-за большей мощности коллекторов и открытости зафиксированных каверн гидродинамические характеристики участка расположения данной скважины гораздо выше (табл. 5.6).



Рис. 5.23. Коллекторы ичерской свиты в центральной части (по скважине 13') (фото А. М. Янникова)

Учитывая полученные гидродинамические параметры  $T = 112 \text{ м}^2/\text{сут}$ , геоморфологическое расположение и структурно-тектоническую приуроченность, зона динамического влияния Аппаинского разлома (центральный участок), может рассматриваться как потенциальное место строительства еще одного участка обратной закачки дренажных вод рудника Мир. Северный участок, как и весь блок между субширотными оперяющими разломами с точки зрения строительства участка закачки – бесперспективны.

Таблица 5.6 - Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса [393]

№ коллектора	Интервал, м	Мощность, м.	Коэффициент водопроводимости (Т), $\text{м}^2/\text{сут}$ .	Коэффициент пьезопроводности (а), $\text{м}^2/\text{сут}$ .
1	2	3	4	5
<b>Северная часть</b>				
7	482–485	3,0	1,25	$10^5$
8	503–507; 512–515; 518–520; 520,7–526,2; 528–528,5	15,0		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>18.0</b>		
<b>Центральная часть</b>				
6	438–442	4,0	112	$10^6$
7	448,2–452,9	4,7		
8	465–508	43,0		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>51.7</b>		

Центральная зона Аппаинского разлома в настоящее время выглядит наиболее перспективной для дальнейшего развития системы обратной закачки рудника «Мир», т.к. в процессе восстановления добычи на данном месторождении потребуется увеличение производительности обратной закачки в рамках, выделенных Параллельно-Центрально-Восточного, Центрально-Восточного и Центрально-Аппаинского межразломных блоков-зон. Распределение закачиваемых рассолов между участками будет способствовать формированию

меньшего градиента напора в рамках участков и приведёт к закономерному уменьшению процента возврата закачиваемых рассолов.

#### 5.4 Накынское кимберлитовое поле

Дренажные воды месторождений Накынского кимберлитового поля – трубок Ботуобинская и Нюрбинская закачиваются на участке Ботуобинский, используя коллекторы толщи ММП. Глубина закачных скважин составляет 205-210 м. В результате эксплуатации участка будет сформирован техногенный водоносный горизонт объёмом 1,9 млн. м<sup>3</sup>, который выступит зоной дополнительного питания для межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса, дренируемого карьером трубки Нюрбинская. Участок Ботуобинский состоит из 14 скважин (рис. 5.24), в том числе: – 6 закачных скважин №№ 101, 102, 103, 104, 105, 106 глубиной по 210 м; – 8 наблюдательных скважин №№ 4с-8с, 1кр, 2кр, 3н скважин, глубиной от 205 до 350 м.

В геолого-стратиграфическом разрезе участка принимают участие карбонатно-терригенные отложения *чаргольской* свиты верхнего кембрия, терригенно-карбонатные отложения *балыктахской* свиты нижнего ордовика, мезозойские терригенные отложения и магматические образования трапповой формации [123]. В пределах участка толщи пород, обладающие коллекторскими свойствами и поэтому представляющие интерес для дальнейшего изучения, выявлены в интервалах *балыктахской* свиты нижнего ордовика [386; 481].

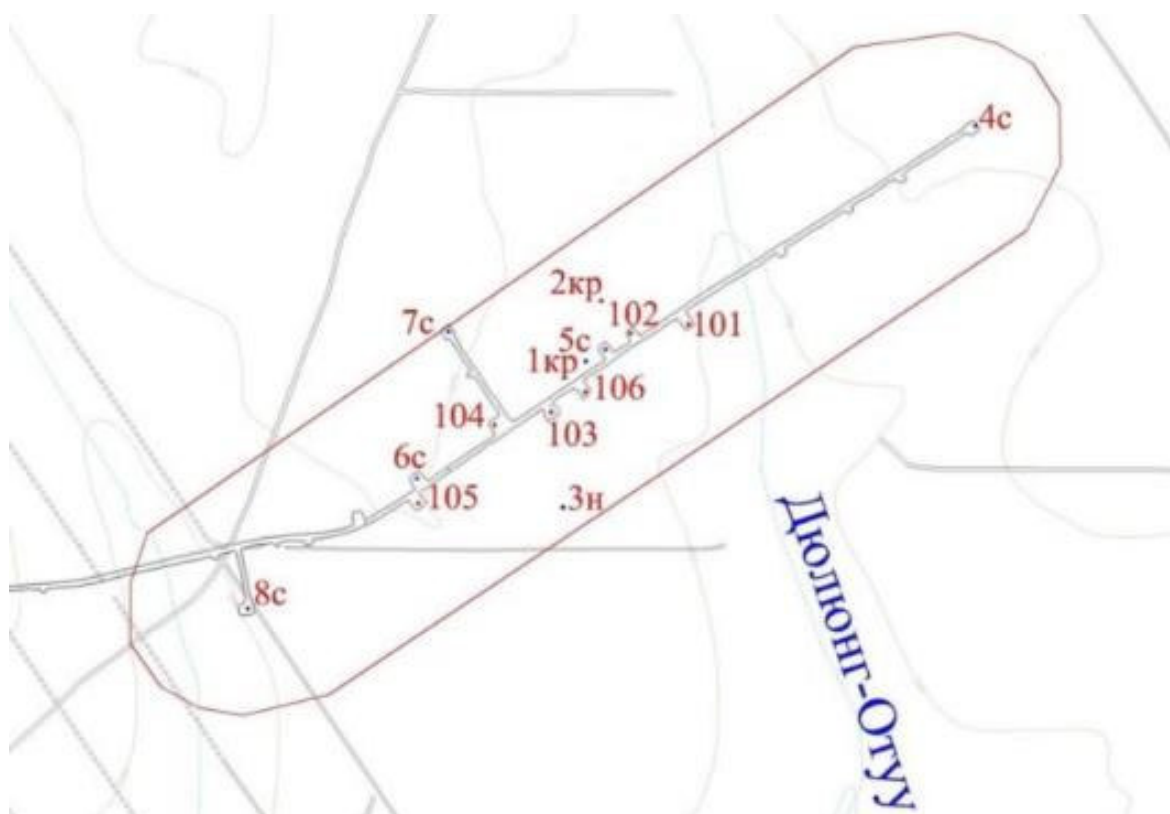


Рис. 5.24. Ситуационный план-схема участка закачки «Ботуобинский» [386]

Нижнеордовикские терригенно-карбонатные отложения балыктахской свиты на участке «Ботуобинский» вскрываются всеми скважинами. Отложения представлены двумя пачками. Первая пачка по результатам проведенного комплекса специализированных работ и изысканий является основным поглощающим горизонтом. Приведем более подробное описание основных поглощающих интервалов, остановившись на основных литотипах пород, слагающих коллекторы в толще ММП. По лабораторным определениям известняки и доломиты характеризуются следующими параметрами: коэффициенты открытой пористости изменяются от 0,95 до 22,04%.

Таким образом, в разрезе коллекторскими свойствами обладают прослои выщелоченных пористо-кавернозных и трещиноватых известняков, доломитов и алевролитов в интервалах глубин 116–170 м. Выявленные природные внутримерзлотные коллекторы представляют собой криогенные геологические структуры с определенной, в основном, тектонической нарушенностью и пластово-поровой пустотностью ММП, обладающие естественной и наведенной емкостью. При воздействии на льдистую составляющую пород этих структур высокоминерализованными рассолами происходит формирование дополнительной гравитационной емкости, и, как следствие, техногенного водоносного горизонта внутри мерзлого массива. Изучение изменения фильтрационных параметров выделенных коллекторов в результате закачки выполнялось при помощи проведения опытно-фильтрационных работ в период 2014–2017 гг. В результате было установлено, что опытная эксплуатация участка Ботуобинский привела к увеличению (в 3–5 раз) фильтрационных параметров, характеризующих техногенный водоносный горизонт. Полученные результаты коэффициентов водопроводимости и уровнепроводности позволяют говорить о выделении четырех блоков-зон отличных друг от друга по данным параметрам: - первый блок (зона) приурочен к скважинам №№ 101, 102 и 2кр. Среднее из полученных значений  $T$ , равное  $242 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; среднее значение,  $a$ , составило  $2,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; - второй блок (зона) приурочен к скважине №104. Среднее из полученных значений  $T$ , равное  $14 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; среднее значение,  $a$ , составило  $1,2 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Данный блок характеризуется более низкими параметрами, чем другие. - третий блок (зона) приурочен к скважине №106. Среднее из полученных значений  $T$ , равное  $24 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; среднее значение,  $a$ , составило  $2,8 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; - четвертый блок (зона) - значения коэффициента уровнепроводности напротив – на целый порядок выше, по сравнению с остальными блоками. Для расчетов будет использовано среднее из полученных значений  $T$ , равное  $184 \text{ м}^2/\text{сут}$ ; среднее значение,  $a$ , составило  $1,5 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$ .

В настоящее время участок обратной закачки «Ботуобинский» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме с суммарной производительностью закачки до  $243 \text{ м}^3/\text{сут}$  в режиме свободного налива на базе 6 поглощающих скважин, на начало 2021 г. в коллекторы ММП

закачено порядка 200 тыс. м<sup>3</sup> дренажных вод, при расчётной ёмкости участка 1,9 млн. м<sup>3</sup>. На настоящий момент заполнено менее 15% полезной ёмкости участка, что не позволяет сформировать устойчивые зоны вертикального массопереноса в межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс.

***Из приведенной выше информации по гидродинамическим условиям кимберлитовых полей можно сделать следующие выводы:***

1. Криогидрогеологические условия месторождений Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей: невысокие дебиты (до 243 м<sup>3</sup>/сут для месторождений Накынского поля; 430 м<sup>3</sup>/сут – для трубки Айхал; 1000 м<sup>3</sup>/сут – для трубки Юбилейная), при высокой минерализации рассолов предопределили использование участков закачки, эксплуатирующих коллекторы толщи ММП.

2. Наличие высокопроницаемых пород в разрезе вмещающих пород в пределах Далдынского кимберлитового поля, а именно наличие коллекторов в интервале зоны интенсивного водообмена, существовавшей в предыдущие геологические периоды (до формирования толщи ММП), а также в интервале нижнекембрийского водоносного комплекса, определило строительство участков закачки. На первом этапе отработки месторождения, связанном с полным осушением верхнекембрийского водоносного комплекса и с частичным осушением среднекембрийского водоносного комплекса, производительности участков закачки, использующих коллекторы ММП, было достаточно. Дальнейшая отработка трубки Удачная приведёт к полному вскрытию коллекторов среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов, что, в свою очередь, обеспечит увеличение притока к подземным горным выработкам рудника с текущих 300 м<sup>3</sup>/час до 2000 м<sup>3</sup>/час (и выше). Существенное увеличение объёма дренажных вод потребовало реализации в пределах кимберлитового поля принципов обратной закачки, интенсивно используемой в пределах Мирнинского кимберлитового поля. Дальнейшее развитие участков, использующих коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса, будет производиться с обязательным учётом влияния структурно-тектонического фактора. Расположение новых закачных скважин будет осуществляться согласно выявленным в процессе проведенных под руководством автора исследований закономерностей формирования зон наведенной трещиноватости, в том числе с учётом расположения оперяющих разрывных нарушений и зон динамического влияния региональных разломов.

3. Криогидрогеологические и структурно-тектонические условия Мирнинского кимберлитового поля не только определяют текущее состояние системы обратной закачки рудников Интернациональный и Мир, но и будут оказывать ключевое воздействие при их развитии. Динамические зоны региональных разломов являются базисом для строительства

участков, а наличие в осевых частях данных разрывных нарушений даек магматических пород основного состава определяет, как параметры закачки, так и процент возврата закачиваемых вод к шахтным полям месторождений.

Проведенные исследования указывают на определяющее влияние региональных разломов на проницаемость коллекторов региональных подмерзлотных водоносных комплексов. Выявленные закономерности вертикальной зональности, а также площадные вариации фильтрационных параметров, были использованы при заложении участков обратной закачки. Последующее опробование подтвердило правильность подходов при определении и выделении гидрогеологических структур с их последующей увязкой к зафиксированным разрывным нарушениям. Причём при увеличении детализации исследований, как правило, подтверждалось блочное строение территории, обусловленное формированием палеорифтовых долин, прослеживающихся, в том числе, в рамках кристаллического фундамента и являющихся главными маркерами для обнаружения как кимберлитовых полей, так и отдельных трубок, что дополнительно указывает на тесную взаимосвязь данных факторов, и взаимное влияние друг на друга.

## ГЛАВА 6. ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ОТРАБОТКЕ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ И ФОРМИРОВАНИЕ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ВОДОНАПОРНЫХ СИСТЕМ В ПРОЦЕССЕ ОТКАЧКА-ЗАКАЧКА<sup>26</sup>

Отработка уникальных коренных месторождений алмазов (трубки Интернациональная, Мир, Нюрбинская, Удачная, Юбилейная и др.) на всю глубину разведанных запасов возможна только при эксплуатации систем опережающего водопонижения, и сопряжённых участков закачки. Осушение месторождений во всех случаях приводит к формированию депрессионных воронок в интервалах осушаемых водоносных комплексов и горизонтов, однако, в зависимости

---

<sup>26</sup> При подготовке раздела диссертации использовались фондовые отчеты компании АК АЛРОСА ПАО:

Власова Т.А. Отчёт о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории, за 2007-2009 гг. (объект «Режимный-Мир-8») в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2010.

Власова Т.А. Отчёт о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботуобинского алмазоносного района и прилегающей территории, за 2010-2012 гг. (объект «Режимный-Мир-9») в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2013.

Валеев П.В. Проект на геологическое изучение и оценку тектонических структур для обратной закачки дренажных и шахтных вод рудника «Мир» для расширения участка системы обратной закачки в 2019-2021гг. Мирный. Фонды ВГРЭ. 2019.

Ильин А. В. Отчёт о результатах бурения геолого-разведочных скважин в районе камеры РПП гор. -100 м и северо-восточного рудного тела рудника «Айхал» в абс. отм. /-100 м/ ÷ /-400 м/. / Фонды ВГРЭ. Мирный, 2019.

Гриков С.В. Янников А.М. Отчет о результатах проведённых работ по опытно-промышленной эксплуатации ботуобинского полигона захоронения высокоминерализованных дренажных вод карьеров трубок Нюрбинская и Ботуобинская в 2011-2016 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

Гриков С.В. Янников А.М. Отчёт о результатах проведённых работ по поиску и оценке структур для обратной закачки дренажных вод рудника «Мир» в районе восточного разлома в 2015-2017 гг. Мирный. Фонды ВГРЭ. 2018.

Янников А.М. Информационный отчёт о результатах бурения контрольно-стволовой скважины по трассе слепого скипового ствола (ССС) рудника «Интернациональный». И дополнительных материалов к нему. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

Янников А. М. Отчёт о методах ликвидации и консолидации специфического водного объекта на руднике «Айхал». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2019.

Янников А. М. Отчёт «Оценка фильтрации на гидроузле на р. Сытыкан, прогноз дальнейшего развития ситуации с фильтрационным и температурным режимом сооружения с разработкой мероприятий и заключением о безопасности ГТС». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Янников А. М. Отчёт «Дополнение и актуализация постоянно действующей гидродинамической модели трубки «Юбилейная» с прогнозированием и управлением водопритоками». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Дополнение и актуализация постоянно действующей гидродинамической модели трубки «Нюрбинская» с прогнозированием и управлением водопритоками». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Дополнение и актуализация постоянно действующей гидродинамической модели трубки «Интернациональная» с прогнозированием и управлением водопритоками». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Янников А. М. Отчёт «Разработать комплексную гидродинамическую модель двух участков закачки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский Юго-восточный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

от выбора способа закачки дренажных вод, конфигурации депрессионных воронок и их площадь существенно отличаются.

В рамках данной главы выполнен анализ гидродинамического режима водоносных горизонтов и комплексов в пределах четырёх кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции: Алакит-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского, и прогноз его изменений под влиянием эксплуатации месторождений, с применением инструментов гидрогеологического моделирования (в ПО Feflow были созданы «цифровые двойники» обрабатываемых месторождений и сопряжённых участков закачки). В рамках проводимых исследований были решены следующие задачи:

- выполнена гидрогеологическая схематизация моделируемых объектов (участок закачки или месторождение);
- определены степени влияния литолого-фациальных и структурно-тектонических условий на формирование фильтрационных параметров;
- определены граничные условия, а также площади моделирования (размеры модели);
- выполнена верификация полученных по результатам моделирования результатов, в части их соответствия фактическим параметрам;
- по результатам построенных моделей выполнен прогноз по остаточной емкости участков, а также определен оптимальный режим эксплуатации систем защиты рудников и карьеров от затопления, и сопряжённых участков закачки.

Гидродинамический режим кимберлитовых полей изучен с учётом имеющихся фондовых материалов, исследований, выполненных ранее (Дроздов, Лобанов, Иост, Гензель и др.) и результатов научно-исследовательской деятельности автора. Исследования, проводимые автором, безусловно, базировались на имеющейся обширной базе, как нормативной документации, так и на опубликованных и фондовых трудах учёных и специалистов (Акишев А.Н., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Анциферов А.С., Атрощенко Ф.Г., Бобров А.К., Гавич И.К., Гензель Г.Н., Дроздов А.В., Иост Н.А., Колганов В.Ф., Лобанов В.В., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Шварцев С.Л., Шепелев В.В. и др.).

Рассмотрим изменения гидродинамического режима в результате техногенного воздействия применительно к объектам изучения, сгруппировав по принадлежности к кимберлитовым полям.

### ***6.1 Алакит-Мархинское кимберлитовое поле***

В пределах изучаемой территории выделяется два кластера природно-техногенных систем, которые могут быть рассмотрены отдельно, т.к. из-за особенностей криогидрогеологических условий они не оказывают друг на друга взаимного воздействия.

Первый кластер включает в себя: - рудник Айхал, подземными выработками которого дренируются нижнеордовикский и верхнекембрийский водоносные комплексы, с сопутствующим образованием локальной депрессионной воронки, с учётом фильтрационных параметров вскрываемых коллекторов не превышающей радиуса 1,5-2,0 км; - участок закачки дренажных вод Ноябрьский, расположенный в 3 км на юго-восток от месторождения (характеристика участка приведена в гл. 5). На рассматриваемом участке для закачки рассолов используются коллекторы, формирующиеся в толще ММП. Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима в пределах шахтного поля трубки Айхал и участка Ноябрьский были осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. Приведём краткую характеристику участка Ноябрьский, информация по трубке Айхал (геокриологические, криогидрогеологические и газодинамические условия, а также структурно-тектоническое строение) была приведена ранее в главах 2-5. На основании анализа имеющихся данных по мерзлотно-гидрогеологическим условиям Ноябрьского участка закачки дренажных вод, результатов бурения и освоения скважин, результатов опытно-промышленных работ 2014-2022 гг. по закачке дренажных вод, в рамках проведённых исследований, разработана гидродинамическая модель, определены перспективы использования ёмкости участка и срок его эксплуатации. Также уточнен режим эксплуатации, выявлены возможные негативные направления миграции закачиваемых рассолов в толще ММП, подтверждена представительность комплекса исследований (гидрогеологических, геофизических и др.) и наблюдений по контролю миграции рассолов, предложены меры по обеспечению эффективной и экологически безопасной эксплуатации узла закачки [385].

Режим эксплуатации участка напрямую связан с притоком природных рассолов к системе подземных горных выработок рудника Айхал. Увеличение суммарного расхода будет происходить с увеличением глубины отработки месторождения, из-за увеличения площади вскрытия коллекторов. По Техническому проекту отработка балансовых запасов месторождения трубки «Айхал» подземным способом предполагается в 3 этапа: - 1 этап – отрабатываются запасы в отм. +163 м/-100 м (реализуется в настоящее время); - 2 этап – отработка запасов в отм. -100 м/-400 м (планируемое начало реализации в 2027 г.); - 3 этап – отработка запасов кимберлитовой потолочины в отм. +230 м/+163 м.

Оценка прогнозных притоков проведена с использованием специализированного ПО, реализующего пространственную фильтрацию подземных вод методом конечных разностей в многослойной толще для областей произвольной конфигурации с изменяющимися по известному закону ГУ I, II и III рода при наличии фильтрационных неоднородностей в плане и разрезе, инфильтрации. В соответствии с геолого-гидрогеологическим строением области фильтрации при схематизации природных условий была принята двухслойная плановая модель

фильтрации подземных вод. *Первый слой* представлен нижнеордовикскими водоносными отложениями, залегающими в интервале средних абсолютных отметок +250 – +120 м. *Ко второму слою* отнесены верхнекембрийские водоносные отложения, располагаемые в абсолютных отметках +120 – -480 м.

Размеры района исследований в плане выбраны таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе разработки, т.е. внешние границы области фильтрации были удалены за пределы зоны техногенного воздействия. Площадь района исследований включает представительную часть области развития нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносных комплексов, отработанное пространство карьера с техногенным массивом на его дне, систему дренажа и водоотведения. В плане слои в силу изменчивости фильтрационных свойств приняты кусочно-однородными. В разрезе каждый водоносный комплекс схематизировался как единый водоносный пласт с осредненным коэффициентом фильтрации. Фильтрационный поток исследуемой области имеет 40000 (200×200) узловых точек. Размеры блоков составляют 25 м<sup>2</sup> (5×5 м). Граничные условия на внешних границах модели принимались в виде ГУ I рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке +260 м. Условия питания подземного потока от закачки на участке Ноябрьский реализовались на модели ГУ III рода. Результаты прогнозных расчетов водопритоков к руднику «Айхал» за счет подземных рассолов нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносных комплексов с учетом перетока карьерных вод по экзоконтакту рудного тела при отработке подкарьерных запасов до разведанной глубины представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Прогнозные притоки к горным выработкам рудника «Айхал»<sup>27</sup>

Горизонт горных работ, м абс.	-100	-200	-300	-400
Прогнозный водоприток, м <sup>3</sup> /сут	310	370	410	430

Полученные прогнозные значения водопритоков (90-430 м<sup>3</sup>/сут.) характеризуются, как низкие [472]. Согласно календарному плану, запасы первого этапа отрабатываются с 2021 по 2029 гг. до отметки -100 м. Максимальные притоки при этом составят до 310 м<sup>3</sup>/сут. С 2029 по 2039 гг. притоки к горным выработкам рудника составят до 410 м<sup>3</sup>/сут. С 2039 по 2044 гг. отработка центральной части трубки до отметки -400 м увеличит притоки подземных вод к руднику до 430 м<sup>3</sup>/сут.

<sup>27</sup> Янников А. М. Отчёт о гидрогеологических условиях месторождения до отм.-400 м рудника «Айхал». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2019.

*Схематизация гидрогеологических условий*

Первоначально при закачке рассолов распространение их в свободном ото льда трещинном пространстве ММП происходит при неполном насыщении под действием силы тяжести по хорошо проницаемым зонам. При этом происходит таяние ледового заполнителя трещин, пор, каверн, увеличение их раскрытия, соединение отдельных проводящих зон, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях [406; 409; 430; 437; 438]. Со временем за счет таяния льда формируется область полного насыщения свободного пространства в толще ММП рассолами, смешанными с водой растаявшего льда. С этого времени движение рассолов будет происходить под действием градиента давлений и определяться законами Дарси и сохранения массы [406; 409].

В рассматриваемых условиях закачки дренажных вод, характеризующихся существенной изменчивостью минерализации в разрезе года, в толще ММП формируется техногенный водоносный горизонт, содержащий рассолы с изменяющейся в пространстве и времени плотностью. Минерализация рассолов в толще ММП по данным наблюдений на участках закачки составляет от 50 до 250 г/л. Соответственно их плотность составляет 1,03-1,2 г/см<sup>3</sup> [406; 409]. Таким образом, зависимость плотности флюида от давления для рассматриваемых условий имеет подчиненное значение по сравнению с зависимостью ее от минерализации. Это относится и к изменению трещиноватости (пористости) пород. Здесь более значимым является изменение активного объема трещинно-порового пространства за счет перехода твердой фазы (ледового заполнителя трещин) в жидкую фазу вследствие агрессивности минерализованных вод.

Уравнение фильтрации принято за основу при построении модели фильтрации в районе участков закачки дренажных вод. Для однозначности решения оно дополняется начальными и граничными условиями, определяющими природные условия питания и разгрузки, а также технологические показатели системы закачки рассолов. В качестве метода гидрогеологических исследований используется численное моделирование пространственных задач геофильтрации методом конечных разностей [129; 406; 409]. В плане область фильтрации разбита на блоки ортогональной сетки. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, отражающей особенности строения водоносного горизонта. Для построения модели размеры области приняты такими, чтобы на весь прогнозный период моделирования внешние границы не оказывали существенного влияния на реакцию модели при возмущении на участках закачки рассолов. Область моделирования принята размером 3×3 км<sup>2</sup>. В соответствии с методикой моделирования область разбита в плане на квадратные блоки размером  $\Delta x = \Delta y = 10$  м. Число блоков в одном слое  $300 \times 300 = 90000$ . В соответствии с зональностью фильтрационных свойств ММП в разрезе и необходимостью учета НоБК толща пород на модели представлена тремя слоями: - первый слой (верхний) отражает на модели интервал ММП, приуроченный к породам трапповой формации; -

второй слой – интервал ММП в абс. отм. +400 – +200 м; - третий слой – комплекс пород в интервале +200 – +120 м абс., к которым приурочен нижнеордовикский водоносный комплекс.

До начала закачки рассолов ММП не содержали воду (жидкую фазу) в трещинно-поровом пространстве. С этой точки зрения процесс рассмотрения закачки рассолов подобен фильтрации в «сухой грунт» с присущим ему фронтом продвижения границы раздела между «сухим» и насыщенным грунтом. В связи с этим вместо начальных условий для напоров в первом и втором слоях модели задавался признак «сухих» блоков. В дальнейшем при моделировании такие блоки могут «замачиваться» при появлении напоров в соседних блоках выше отметок подошвы слоя [43; 88; 89; 406; 409]. Такая возможность «осушения - замачивания» реализована в программном обеспечении [406; 409].

На внешних границах 1, 2-го слоев граничные условия не задавались, так как закачиваемые рассолы не достигают внешних границ. Во втором слое на внешних границах задано граничное условие 1 рода с абсолютной отметкой соответствующей уровню подземных вод. Эксплуатационные скважины участков закачки моделировались как граничное условие 2-го рода (задан расход закачки) с фактическим дебитом на период с 2014 по 2022 гг. Значение фильтрационных параметров (коэффициентов фильтрации и емкостных свойств) принимались по имеющимся литературным и фондовым материалам [406; 409]. В процессе моделирования на этапе решения обратной задачи эти параметры уточнялись.

#### *Калибровка расчетной модели*

Решение обратной задачи выполнялось методом целенаправленного подбора параметров (методом итераций), при котором учитывались представления о геолого-гидрогеологических особенностях водоносных горизонтов, данные фильтрационных исследований водопроницаемости пород и их емкостных свойств [406; 409]. Учитывая высокую степень неопределенности значений водопроводящих и емкостных свойств пород, целью решения обратной задачи является подбор расчетных значений фильтрационных (коэффициентов фильтрации) и емкостных (недостаток насыщения и упругая водоотдача) параметров водоносных горизонтов так, чтобы заданным расходам закачки рассолов модельное пространственно-временное распределение уровней с приемлемой точностью согласовывалось с фактическим распределением. Идентификация фильтрационных параметров для таких условий представляет собой сложную задачу, как в теоретическом, так и с точки зрения современных технических возможностей (в настоящее время нет программного обеспечения для моделирования задач подобного класса). В связи с этим при решении обратной задачи использовался общий подход к решению задач с переменными параметрами – метод последовательной смены квазистационарных состояний совместно с современными мерзлотно-

гидрогеологическими представлениями о строении толщи ММП на участках закачки рассолов месторождений АК «АЛРОСА» [406; 409]. В соответствии с представлениями о замкнутости центральной (наиболее проницаемой) части участка закачки первоначально выделены зоны коэффициентов фильтрации, максимальные значения которых расположены в центральной части с постепенным уменьшением к периферии. Конфигурация зон для слоев, отражающих ММП, принимались одинаковой соответствующей тектоническим условиям. Для третьего слоя (НоВК) коэффициенты фильтрации приняты исходя из имеющихся данных о водопроницаемости пласта и принятой на модели мощности. Дебит закачки принят по данным об объемах закачки рассолов в 2014-2022 гг. Оценка точности решения задачи выполнялась сравнением модельных значений уровней  $H_m$  с фактическими значениями  $H_\phi$  на конец 2021 г. по наблюдательным скважинам, расположенным на участке закачки «Ноябрьский».

Относительное отклонение фактических и модельных значений уровней вычислялось по зависимости:

$$\delta = |\Delta H| / \Delta H_{\max} \cdot 100 \%, \quad (6.1)$$

где:  $\Delta H$  – величина абсолютного отклонения,  $\Delta H = H_\phi - H_m$ ;

$\Delta H_{\max}$  – максимальный перепад уровней техногенных вод в ММП;

При последовательном переборе параметров решение задачи закачки рассолов повторялось, анализировалось полученное решение и отклонение его от фактических данных. Для уменьшения отклонения решения задавались уточненные параметры и моделирование повторялось. Процесс итераций продолжался до тех пор, пока не достигалась приемлемая оценка средних отклонений (в пределах 5 %). В таблице 6.2 приведены значения отклонения модельных уровней от фактических на конец калибровки модели. На рисунке 6.1 приведена карта изолиний уровней техногенного водоносного горизонта на конец 2021 г., построенная на модели на конечном этапе решения обратной задачи.

По результатам решения обратной задачи расчетные значения коэффициентов фильтрации в центральной части участка закачки составляют 0,2-0,5 м/сут. Для периферии значение коэффициента фильтрации составляет 0,01-0,0001 м/сут. Значение гравитационной водоотдачи составляет 0,001-0,055; упругая водоотдача принята равной  $\mu = 2 \times 10^{-4}$ .

Таблица 6.2 – Сходимость распределения уровней в техногенном горизонте, полученных на модели с фактическими на конец 2021 года<sup>28</sup>

№ скважины	Абсолютная отметка уровня, м		Отклонение модельного уровня от фактического	
	Фактическая	Модельная	Абсолютное, м	Относительное
2	457,78	444	13,8	5,7
101	439,8	444,17	-4,37	1,8
102	446,9	445,3	1,6	0,7
103	440,9	446,2	-5,3	2,2
104	440,5	449,7	-9,2	3,8
105	440,8	445,86	-5,1	2,1
106	440,5	443,8	-3,3	1,4
1Н	454,73	445,84	8,9	3,7
2Н	440,63	442,98	-2,4	0,9
3Н	439,34	439,37	-0,03	0,01
4Н	439,97	434,37	5,6	2,3
5Н	461,44	444	17,4	7,4
среднее				2,4

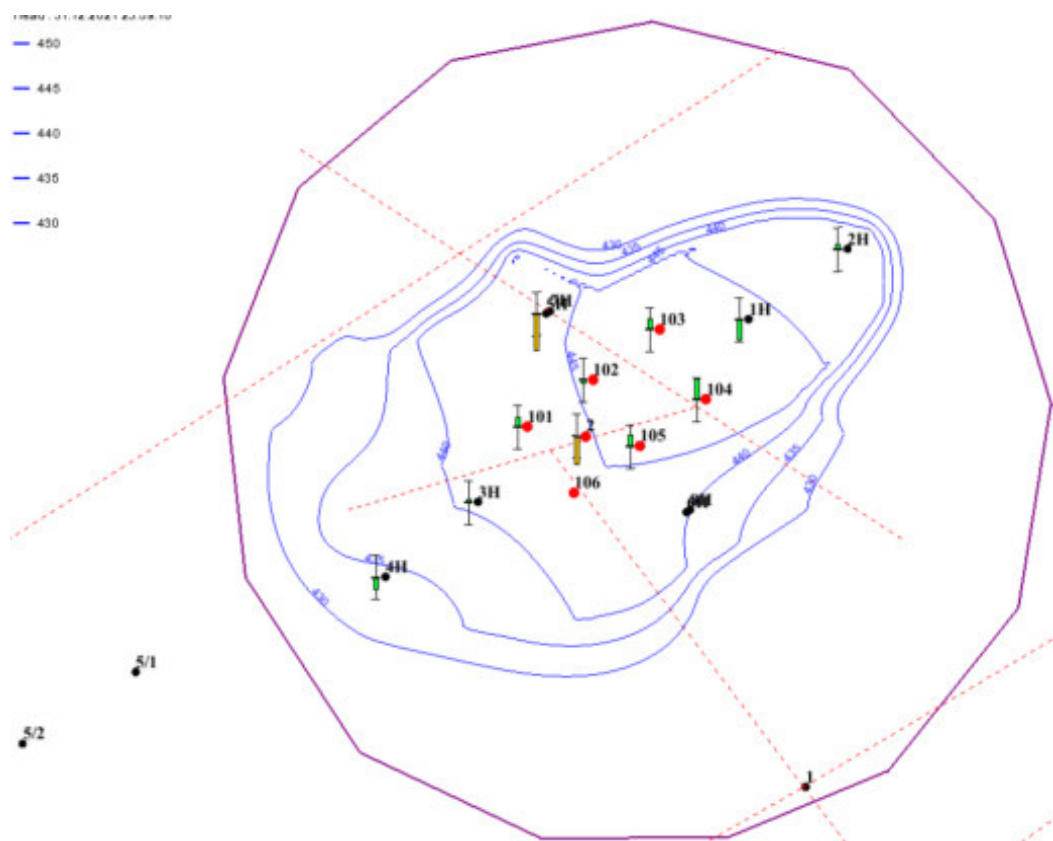


Рис. 6.1. Результаты решения обратной задачи [410]

Прогнозное моделирование изменения уровня режима техногенного водоносного горизонта в процессе эксплуатации участка «Ноябрьский» было выполнено при следующих условиях: - граничное условие 2 рода в закачных скважинах; - перекрывающая и подстилающая

<sup>28</sup> Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Ноябрьский»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

техногенный водоносный горизонт толща ММП, также задавалась границей 2 рода с  $Q = 0 \text{ м}^3/\text{час}$ ; - коллекторы толща ММП задавались как «сухой грунт»; - вертикальный массоперенос в зонах разрывных нарушений (переток закачиваемых рассолов в ниже залегающий НоВК) задавались полупроницаемой границей 3 рода.

Для проведения прогнозных расчетов с определением достаточности емкости участка на весь период отработка запасов месторождения «Айхал» на модели заданы следующие условия: - в качестве начального положения уровней принимались их значения на конец 2021 г.; - параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени; - расход закачки дренажных рассолов согласно календарного плана отработки месторождения. Суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Расходы закачки, заданные при моделировании<sup>29</sup>

Период времени, гг.	Расход закачки, м <sup>3</sup> /сут.
2022–2029	310
2029–2039	410
2039–2044	430

По результатам прогнозного моделирования построены схемы гидроизопъез в техногенном горизонте через 5, 10 лет и на конец отработки месторождения – приложение 10.

В результате выполненного моделирования можно сделать следующие выводы:

- уровень в эпицентре закачки за весь период эксплуатации не превысит экологически безопасных отметок (+581/+583 м абс.). На конец отработки месторождения (2044 г.), по результатам прогнозного моделирования абс. отм. уровня в закачных скважинах составит +511 м, что ниже отметки дневной поверхности на 120 м;

- площадь растекания дренажных вод в ММП не выходит за пределы границ лицензионного участка до конца отработки месторождения трубки «Айхал».

Для определения потенциальной полезной емкости на созданной модели были заданы следующие условия: - в качестве начального положения уровней принимались их значения на конец 2021 г.; - параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени; - заданный средний расход закачки дренажных рассолов составил  $760 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; - суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам.

<sup>29</sup> Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Ноябрьский»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

Критериями исчерпания емкости участка являлись следующие факторы: - повышение уровня в эпицентре закачки до отметки +583 (глубину 50 м от дневной поверхности); - площадное распространение техногенного горизонта за пределы горного отвода.

В результате остаточная прогнозная полезная емкость участка «Ноябрьский», на январь 2022 года была оценена в 6,1 млн. м<sup>3</sup>. Учитывая прогнозный объем закачки дренажных вод рудника «Айхал», который в период с 2022 по 2044 гг. составляет порядка 3,0 млн. м<sup>3</sup>, использование участка закачки «Ноябрьский», в объеме не более 157 тыс. м<sup>3</sup> в год, с расходом до 430 м<sup>3</sup>/сут., обеспечивается в полном объеме только емкостными параметрами коллекторов толщи ММП, без учета перетока закачиваемых рассолов из ММП в НоВК [386; 406; 409]. Формирование вертикального массопереноса из техногенного водоносного горизонта в ниже залегающий НоВК произойдет в процессе дальнейшей эксплуатации участков закачки, после формирования упругого режима фильтрации.

Второй кластер состоит из: – карьера Юбилейный, в настоящее время глубина карьера превысила 500 м, на конец отработки проектная глубина карьера составит – 720 м. Учитывая ресурсный потенциал месторождения, планируется переход на подземную добычу. Глубина проектируемого рудника составит 1300 м. В настоящее время карьером вскрыты водоносные горизонты несквозных таликов озер Проточное и Травянистое, а также частично коллекторы нижнеордовикского водоносного комплекса. Ниже залегающий верхнекембрийский водоносный комплекс будет вскрыт при дальнейшей отработке месторождения к 2030 г. Радиус созданных депрессионных воронок незначителен по площади и не превышает 1 км [398]; – участка закачки дренажных вод Заречный, расположенный в 4 км на юго-запад от месторождения. На рассматриваемом участке для закачки рассолов используются коллекторы, формирующиеся в толще ММП.

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима в пределах карьерного поля трубки Юбилейная и участка Заречный была осуществлена методами моделирования в ПО Feflow. Характеристика геокриологических, криогидрогеологических, газодинамических условий и структурно-тектоническое строение месторождения была приведена ранее (гл. 2-5).

Анализируя гидрогеологические условия месторождения, необходимо выделить три объекта для моделирования: – водоносные горизонты таликовых зон озер Проточное и Травянистое; – нижнеордовикский водоносный комплекс (НоВК); – верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК). Построение гидродинамической модели трубки «Юбилейная» ввиду отсутствия прямой связи между указанными водоносными комплексами и горизонтами, а также различными граничными условиями, было выполнено отдельно для каждого объекта. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Изменение гидрогеологических условий водоносных горизонтов несквозных таликов озер Проточное и Травянистое происходит под влиянием системы осушения (скважинного водопонижения) карьера «Юбилейный». Динамика изменения пьезометрических поверхностей в пределах подозерных таликов существенно отличается, имея различный темп и амплитуду, что обусловлено не только режимом откачки, но и локальными криогидрогеологическими условиями (рис. 6.2).

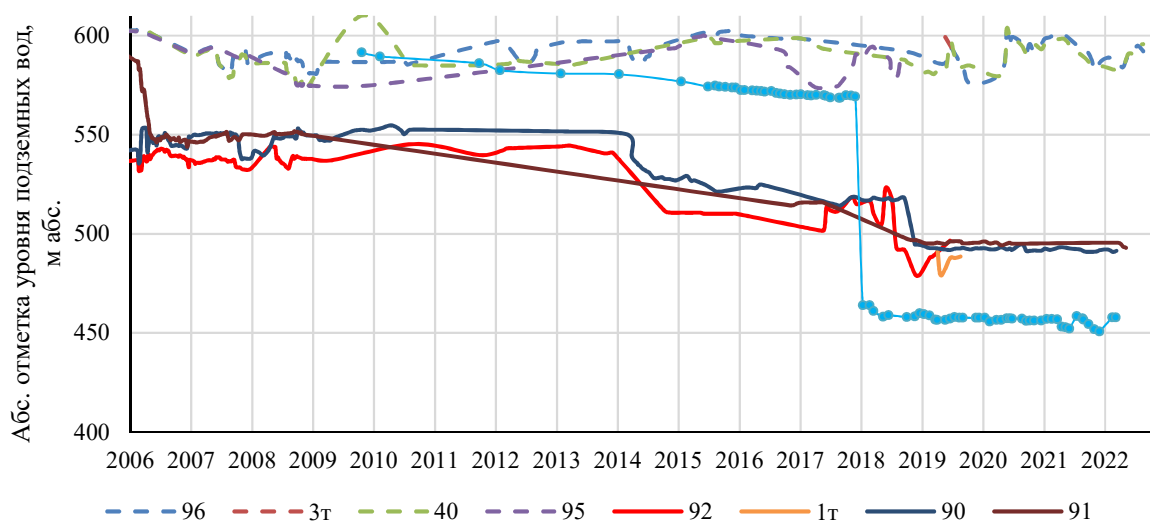


Рис. 6.2. Изменение уровня подземных вод таликовых зон<sup>30</sup>

При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик водоносных горизонтов таликовых зон озер Проточное и Травянистое. Исходные параметры расчетных водоносных горизонтов приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ, за весь период отработки месторождения в интервале водоносных горизонтов и корректировались на этапе калибровки модели [406; 409; 498]. В плане водоносные горизонты таликовых зон озер Проточное и Травянистое в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, приняты кусочно-однородным. В качестве начальных условий, при решении обратной задачи, принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени, задаваемых во всех точках исследуемой области фильтрации в виде известной функции координат. Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде ГУ I, II и III рода. Калибровка модели проводилась по принципам,

<sup>30</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водоприитоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

описанным ранее. Модельное распределение уровня подземных вод подошренных таликовых вод на конец 2022 г. изображено на рисунках в приложении 11.

Нижнеордовикский водоносный комплекс имеет спорадическое распространение с общей приуроченностью наиболее проницаемых зон к северо-восточной части месторождения и сопряженной приразломной зоне, а также околорудному пространству. Кровля в пределах карьерного поля зафиксирована в отн. +167,6 – +118,3 м абс., подошва в отн. +87,2 – +95,6 м.

Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий и решаемых задач.

Решение обратной задачи на модели осуществлялось в стационарном режиме. Расчетная схема модели выполнена с учетом имеющегося фактического материала по району исследований.

Исходные параметры расчетного водоносного комплекса приняты по материалам ранее выполненных опытных и научно-исследовательских работ и корректировались на этапе калибровки модели.

Для решения задач прогноза гидродинамического режима подземных вод в пределах НоВК и водопритоков к карьере «Юбилейный» был выполнен учет всех режимообразующих факторов водоносного горизонта:

- границы области фильтрации в плане;
- пространственно-временной характер фильтрационных течений;
- значения геофильтрационных параметров;
- вид граничных условий;
- строение области фильтрации в плане и разрезе.

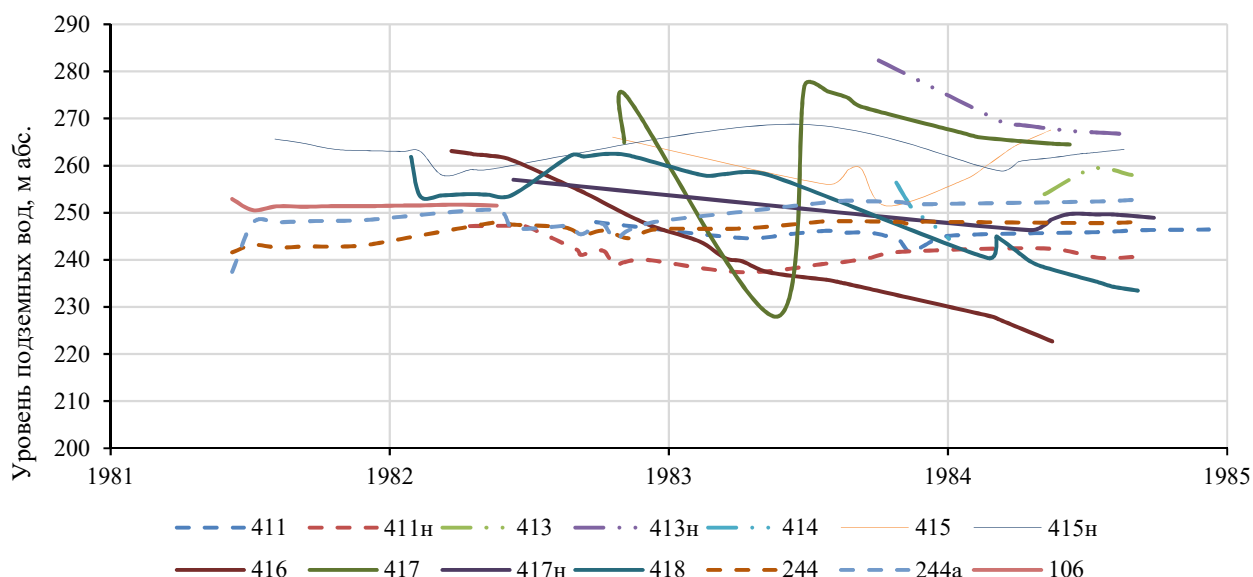
В плане водоносный комплекс в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, геолого-структурными факторами, а также спорадичностью существования, задан только в пределах северо-восточного рудоконтролирующего разлома и рудных тел. В разрезе водоносный комплекс схематизировался как единый водоносный пласт с осредненным коэффициентом фильтрации.

В данный момент забоем карьера вскрыта кровля водоносного комплекса, что подтверждается увеличением минерализации откачиваемых из карьера вод и наличием в них бромидов, на модели задано граничное условие 1 рода с заданием фактической отметки дна карьера. Приток подземных вод межмерзлотного водоносного комплекса зафиксирован в 2020 г. повышением минерализации и концентрации брома. Для определения фактических притоков подземных вод к карьере проведен пересчет притоков по соотношению минерализации НоВК к средней минерализации дренажных вод. На рисунке в приложении 12 приводится расчетное

(модельное) распределение уровня подземных вод нижнеордовикского водоносного комплекса на конец решения обратной задачи (декабрь 2022 г).

В настоящее время верхнекембрийский водоносный комплекс непосредственно горными работами (карьером) не вскрыт. В пределах месторождения кровля подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса расположена на отметке -20/-40 м, подошва на отметке -280/-300 м абс.

Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе разработок трубки «Юбилейная». Естественный уровень подземных вод в подмерзлотном верхнекембрийском водоносном комплексе находился на отметке +240/+260 м. Наименьшие значения абсолютной отметки уровня наблюдались в скважинах, расположенных в северо-восточной части месторождения (рисунок 6.3).



#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

1. пунктирная линия – северо-восточная приразломная зона; 2. штрихпунктирная – южная часть; 3. сплошная толстая – север; 4. сплошная тонкая – западная часть.

Рис. 6.3. Уровень верхнекембрийского водоносного комплекса<sup>30</sup>

По данным опытно-фильтрационных работ величина водопроницаемости водоносного комплекса в среднем составляет  $0,187 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в северо-восточной части месторождения до  $5,2 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в западной части и в рудном теле  $0,01-0,1 \text{ м}^2/\text{сут}$  (рисунок 6.4).

В настоящее время, режим подземных вод ПВВК в пределах карьерного поля, наблюдается только в северо-восточном блоке (рисунок 6.5).

Площадь района гидродинамического моделирования составила  $16 (4 \times 4) \text{ км}^2$ . Построение расчетной схемы модели выполнено с учетом имеющегося фактического материала по району

исследований. Фильтрационный поток разбит равномерной сеткой, состоящей из 16235 элементов, 8185 узлов. Размеры элементов от 10 до 100 м. Размеры и принятый шаг ввиду низких фильтрационных параметров позволят с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности на весь прогнозируемый период.

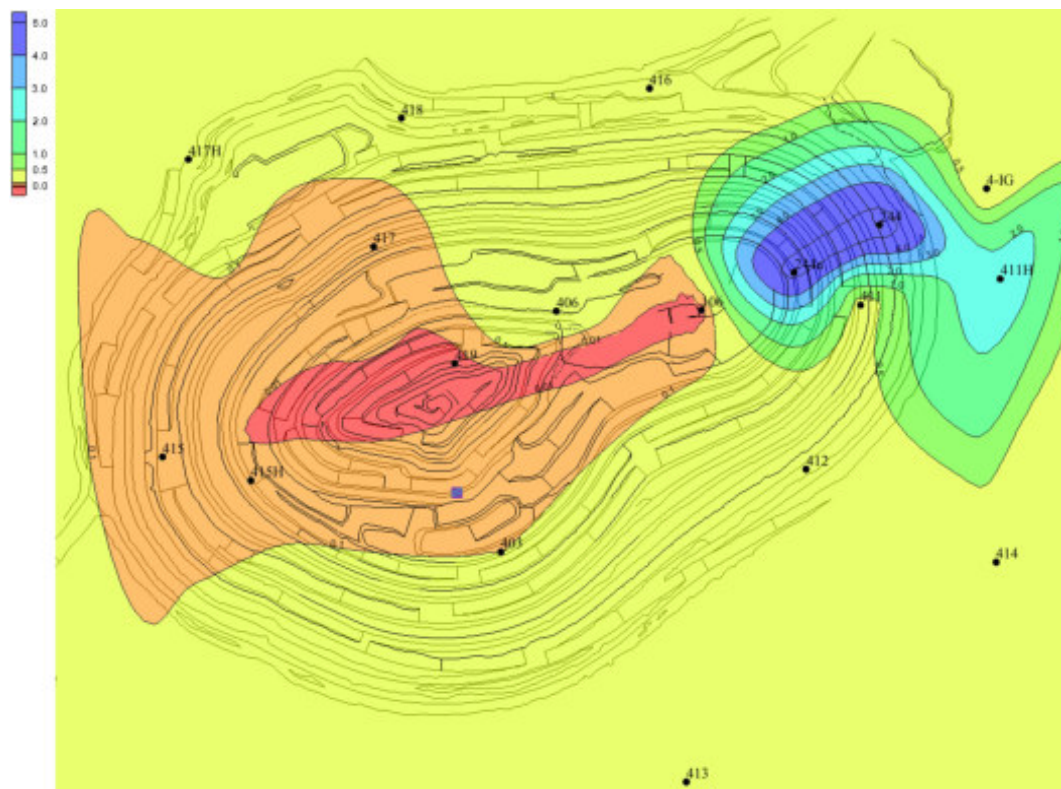


Рис. 6.4. Схема водопроводимости ВВК по данным опытно-фильтрационных работ<sup>30</sup>

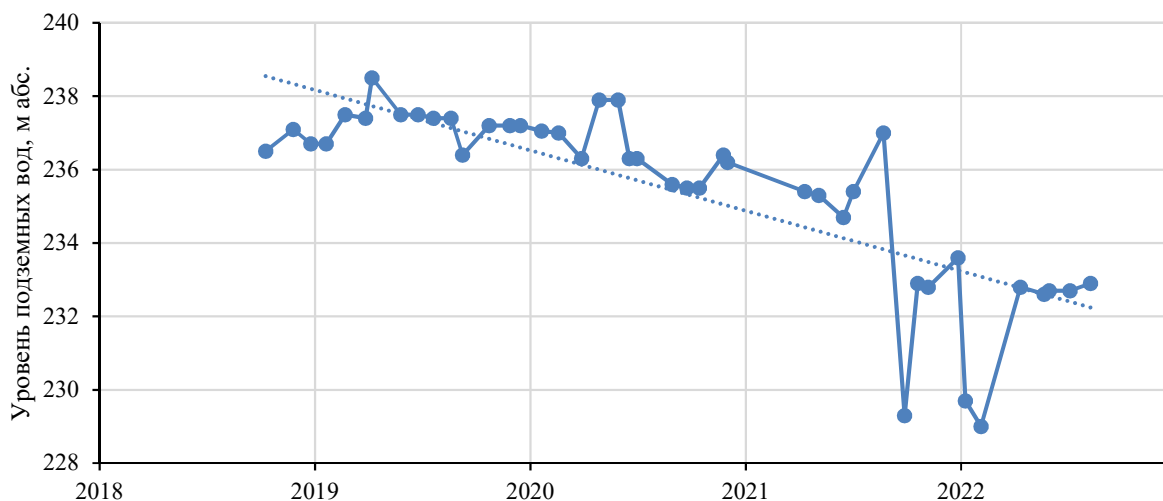


Рис. 6.5. Изменение уровня подземных вод в ВВК (северо-восточный блок)<sup>30</sup>

На рисунке в приложении 12 дано расчетное распределение уровня подземных вод ПВВК на конец 2022 г.

На основании анализа имеющихся данных по мерзлотно-гидрогеологическим условиям участка закачки дренажных вод «Заречный», результатов бурения и освоения скважин

разработана гидродинамическая модель, определены перспективы использования ёмкости участка и срок его эксплуатации.

Также уточнен режим эксплуатации, выявлены возможные негативные направления миграции закачиваемых рассолов в толще ММП, подтверждена представительность комплекса исследований (гидрогеологических, геофизических и др.) и наблюдений по контролю миграции рассолов, предложены меры по обеспечению эффективной и экологически безопасной эксплуатации узла закачки. Оработка разведанных запасов трубки «Юбилейная» рассматривается по вариантам, как открытой отработки, так и комбинированной. При реализации комбинированного способа отработки вскрываются спорадически распространенный межмерзлотный водоносный комплекс и 2 подмерзлотных водоносных комплекса: верхнекембрийский (ВВК) при открытой отработке и среднекембрийский (СВК) при подземной отработке.

Для указанных вариантов выполнен расчёт возможных водопритоков в проектируемые открытые и подземные горные выработки. На обводнение проектного карьера наибольшее влияние будет оказывать подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс. Вскрытие нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса (НОВК) произошло в 2020 г. на отметке 155 м абс. в пределах центрального рудного тела. Согласно календарному плану, дно проектного карьера вскроет коллекторы верхнекембрийского водоносного комплекса на отметке -40 м абс. в 2031 г. В таблице 6.4 приведены результаты расчётов прогнозных притоков (гидрогеологическая характеристика трубки Юбилейная была проведена ранее).

Таблица 6.4 – Притоки подземных вод к месторождению трубки «Юбилейная» [410]

Годы	Отметки, м абс.	Притоки подземных вод			Суммарный водоприток	
		НОВК	ВВК	СВК	м <sup>3</sup> /сут	тыс. м <sup>3</sup> в ГОД
		м <sup>3</sup> /сут	м <sup>3</sup> /сут	м <sup>3</sup> /сут		
2023	110	15,7	-	-	15,7	5,7
2024	95	19	-	-	19	6,9
2025	80	18,3	-	-	18,3	6,7
2026	65	17,7	-	-	17,7	6,5
2027	35	17,2	-	-	17,2	6,3
2028	20	16,8	-	-	16,8	6,1
2029	5	16,5	-	-	16,5	6,0
2030	-25	16,2	-	-	16,2	5,9
2031	-55	16	323,7	-	339,7	124,0
2032	-70	15,7	304,6	-	320,3	116,9
2033	-100	15,5	313,6	-	329,1	120,1

Воды нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса характеризуются малой водообильностью, спорадичностью распространения и минерализацией от 50 до 130 г/л.

Согласно проекту отработки месторождения трубки «Юбилейная» открытым способом, предусматривается разделение карьерного водоотлива [247]. Для этого было принято решение о размещении в 2021 г. временного зумпфа для улавливания поверхностного стока на полосе разноса на гор. +320. Откачка аккумулируемых пресных вод осуществлялась в южную нагорную канаву. Аккумуляция вскрываемых рассолов НОВК и метеорных вод, подаваемых в карьер вод ниже отметки +320 м абс. осуществлялась в забойном зумпфе на гор +125. Объем откачки в течение 2021 г. представлен в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Объемы откачки в 2021 году<sup>30</sup>

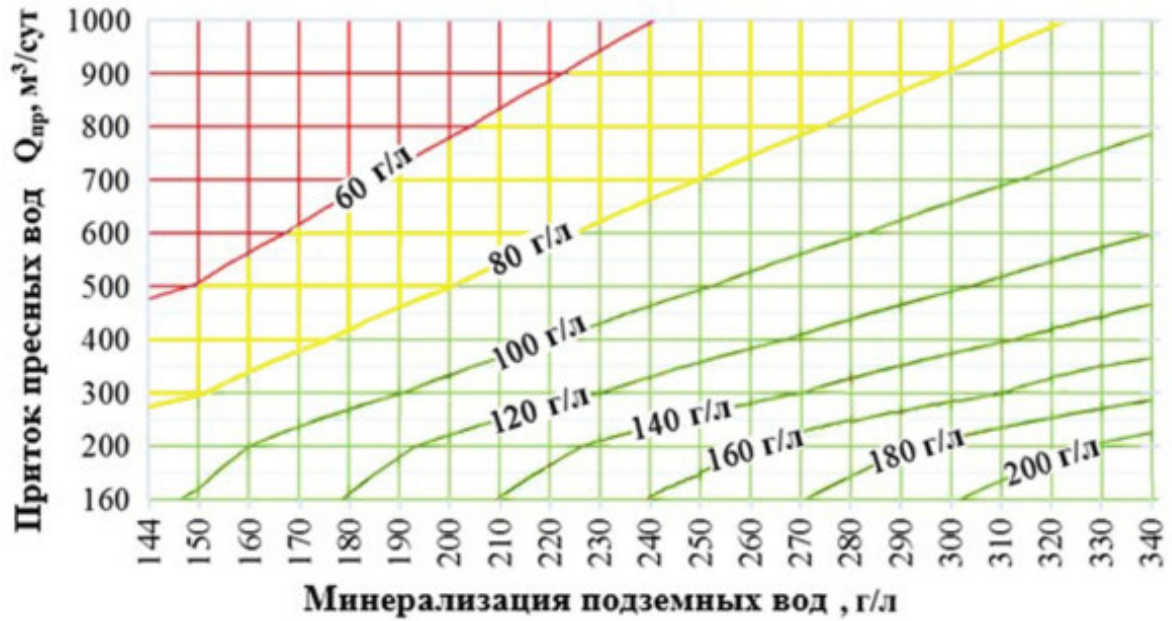
№ п/п	Месяц	Объем откачки, м <sup>3</sup>	Минерализация вод, мг/л	Бромиды, мг/л
1	Январь	0	-	-
2	Февраль	0	-	-
3	Март	0	-	-
4	Апрель	0	-	-
5	Май	0	-	-
6	Июнь	0	-	-
7	Июль	13800	4,0	20,46
8	Август	12300	4,4	9,96
9	Сентябрь	1800	-	-
12	Октябрь	3000	4,45	29,61
11	Ноябрь	0	-	-
12	Декабрь	0	-	-
ИТОГО		30900		

Средний приток смешанных вод в теплый период времени составил 171 м<sup>3</sup>/сут с минерализацией 4-4,45 г/л из них притоки подземных вод НОВК в количестве 15 м<sup>3</sup>/сут.

Проведем оценку минерализации смешанных вод ( $M_{см}$ ) при притоке атмосферных вод  $Q_{пр}$  в забой в количестве от 160 до 1000 м<sup>3</sup>/сут и притоке подземных вод ВВК и НОВК  $Q_p = 340$  м<sup>3</sup>/сут с минерализацией  $M_p$  от 144 до 340 г/л:

$$M_{см} = \frac{M_{пр} * Q_{пр} + M_p * Q_p}{Q_{пр} + Q_p} \quad (6.2)$$

Расчет минерализации смешанных вод показал, что при притоке пресных вод менее 500 м<sup>3</sup>/сут, минерализация смешанных вод более 60 г/л и подлежит закачке в толщу многолетнемерзлых пород (рис. 6.6). С учетом проведенной оценки минерализации смешанных вод к закачке на участке «Заречный» при среднегодовом притоке пресных вод в количестве 30 тыс. м<sup>3</sup> рассчитан общий объем дренажных вод вовремя открытой отработки месторождения трубки «Юбилейная». Суммарный объем дренажных вод составит 448,6 тыс. м<sup>3</sup> (таблица 6.6).



красный цвет - минерализация смешанных вод – 40-60 г/л; желтый – 60-80 г/л; зеленый – 80-200 г/л

Рис. 6.6. Минерализация смешанных вод в зависимости от величины притока пресных вод и минерализации подземных вод [406]

Таблица 6.6 – Суммарный приток подземных и поверхностных вод для закачки в многолетнемерзлые породы [410]

Годы	Отметки, м абс.	Притоки подземных вод		Поверхностные воды	Суммарный водоприток	
		НОВК	ВВК		м³/сут	тыс. м³ в год
		м³/сут	м³/сут	м³/сут		
2031	-55	16	323,7	80	419,7	153,2
2032	-70	15,7	304,6	80	400,3	146,1
2033	-100	15,5	313,6	80	409,1	149,3
ИТОГ						448,6

При обработке подземным способом притоки подземных рассолов составят 580–555 м³/сут на горизонтах отработки -280 и -480 м абс. и до 980 м³/сут при вскрытии среднекембрийского водоносного комплекса на горизонте отработки -680 м абс. (таблица 6.7).

Таблица 6.7– Притоки подземных вод к месторождению трубки «Юбилейная» при отработке подземным способом (сост. Янников А.М.)

Горизонт отработки	Притоки подземных вод			Суммарный водоприток	Объем годовых притоков с горизонта
	НОВК	ВВК	СВК		
м абс.	м³/сут				тыс. м³ в год
-280	15	565	-	580	211,7
-480	15	540		555	202,6
-680	14	500	466	980	357,7

Полученные прогнозные значения притоков природных рассолов (400-980 м<sup>3</sup>/сут) характеризуются, как низкие.

#### *Схематизация гидрогеологических условий*

Согласно гидрогеологической стратификации в пределах моделируемого участка выделяются: – формируемый техногенный горизонт на участке закачки; – межмерзлотный нижнеордовикский водоносный комплекс; – верхнекембрийский водоносный комплекс; – среднекембрийский водоносный комплекс; – нижнекембрийский водоносный комплекс; – верхнепротерозойский водоносный комплекс [166; 252; 332; 333;]. С точки зрения задач, решаемых в рамках данной работы, объектом изучения является техногенный водоносный горизонт, формирующийся в толще ММП в результате закачки рассолов. Условия фильтрации на участке закачки по опыту аналогичных участков Айхальского, Мирнинско-Нюрбинского и Удачинского ГОКов зависят от следующих факторов:

1. Природных (геоморфологических условий, геологического строения, структурно-тектонических условий, криогидрогеологических условий, и других условий присущих данному участку до закачки рассолов);

2. Технологических (глубины и расположения закачных скважин, объемов и расходов закачки рассолов, частоты и интенсивности закачки, минерализации и температуры закачиваемых рассолов, особенностей доставки рассолов).

Прогнозные расходы закачки и минерализация рассолов зависят от притоков к месторождению трубки «Юбилейная». Расчет прогнозных водопритокков показал, что закачка дренажных вод рекомендуется только после вскрытия подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса. При этом прогнозная потребность составит 340 м<sup>3</sup>/сут в зимнее время и 700 м<sup>3</sup>/сут в летнее время. К закачке рекомендуются дренажные рассолы с минерализацией выше 55–60 г/л, что определяется целевой тощей используемых коллекторов. Согласно геолого-гидрогеологического разрезу в толще многолетнемерзлых пород можно выделить 3 слоя [25; 43; 76; 168; 252]:

1 слой: от земной поверхности до отметки +530 м абс., характеризующие отложения каменноугольного возраста и покровные трапповые долериты, являющихся водоупорными отложениями;

2 слой: от +530 до +532 м абс. – характеризует трапповые интрузии, внедрившиеся в толщу осадочных пород в пределах участка закачки, являющимися слабопроницаемыми отложениями;

3 слой: от +480 до +530 м абс. – характеризует отложения силура, являющиеся целевой толщей для осуществления закачки.

Размеры области исследований в плане выбраны таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе участка закачки «Заречный». Площадь района исследований составила 25 (5×5) км<sup>2</sup>, включающая лицензионную границу участка, закачные и наблюдательные скважины, а также местные базисы эрозии. Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном гидродинамическом режиме, исходя из характера решаемых задач.

В основу калибровки модели положены данные режимных наблюдений за уруненным режимом с 2018 по 2021 гг. и расходами закачки при опытном освоении скважин на участке «Заречный». Решение обратной задачи выполнялось методом целенаправленного подбора параметров (методом итераций), при котором учитывались представления о геолого-гидрогеологических особенностях водоносных горизонтов, данные фильтрационных исследований водопроницаемости пород и их емкостных свойств. Принципы калибровки были описаны ранее.

Прогнозное моделирование изменения уруненного режима техногенного водоносного горизонта в процессе эксплуатации участка «Заречный», было выполнено при следующих условиях: - граничное условие 2 рода в закачных скважинах; - перекрывающая и подстилающая техногенный водоносный горизонт толща ММП, также задавалась границей 2 рода с  $Q = 0$  м<sup>3</sup>/час; - коллекторы толщи ММП задавались как «сухой грунт»; - вертикальный массоперенос в зонах разрывных нарушений (переток закачиваемых рассолов в ниже залегающий НоВК) задавались полупроницаемой границей 3 рода.

Для проведения прогнозных расчетов с определением достаточности емкости участка на модели заданы следующие условия: - в качестве начального положения уровней принимались их значения на начало 2022 г.; - параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени; - прогнозный расход закачки дренажных рассолов согласно календарному плану отработки месторождения приведён в таблице 6.8.

Таблица 6.8 – Прогнозные расходы закачки (сост. Янников А.М.)

№ п/п	Периоды, годы	Суммарный расход закачки, м <sup>3</sup> /сут
1	2023–2030	17
2	2031–2033	420
3	2034–2039	580
4	2040–2045	560
5	2046–2054	980

Суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам. Прогнозные объёмы формирующихся дренажных рассолов, а также суммарная прогнозная потребность на всем жизненном цикле отработки месторождения, приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Прогнозные объёмы дренажных рассолов, подлежащие закачке (сост. Янников А.М.)

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут	Продолжительность закачки, дней	Объём закачки, м <sup>3</sup>	Суммарный объём (прогнозная потребность), м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5
2023	15,7	185	2904,5	2904,5
2024	19	185	3515	6419,5
2025	18,3	185	3385,5	9805
2026	17,7	185	3274,5	13079,5
2027	17,2	185	3182	16261,5
2028	16,8	185	3108	19369,5
2029	16,5	185	3052,5	22422
2030	16,2	185	2997	25419
2031	420	365	153300	178719
2032	420	365	153300	332019
2033	420	365	153300	485319
2034	580	365	211700	697019
2035	580	365	211700	908719
2036	580	365	211700	1120419
2037	580	365	211700	1332119
2038	580	365	211700	1543819
2039	580	365	211700	1755519
2040	560	365	204400	1959919
2041	560	365	204400	2164319
2042	560	365	204400	2368719
2043	560	365	204400	2573119
2044	560	365	204400	2777519
2045	560	365	204400	2981919
2046	980	365	357700	3339619
2047	980	365	357700	3697319
2048	980	365	357700	4055019
2049	980	365	357700	4412719
2050	980	365	357700	4770419
2051	980	365	357700	5128119
2052	980	365	357700	5485819
2053	980	365	357700	5843519
2054	980	365	357700	6201219

Как видно из представленных данных прогнозный суммарный объём (потребность закачки) на всём жизненном цикле месторождения составит 6,2 млн. м<sup>3</sup>.

Исходя из представленных ранее фильтрационных параметров, и данных приведенных в таблицах 6.15 и 6.16, приведём результаты гидродинамического моделирования, *при использовании 12 закачных скважин № 2з, 3з, 4з, 5з, 6з, 7з, 8з, 9з, 10з, 16з, 18з и 20з*. По результатам прогнозного моделирования построены схемы гидроизопьез в техногенном горизонте на 2030, 2035, 2040 и 2045 гг. при прогнозируемых притоках (приложение 14).

В результате выполненного моделирования можно сделать следующие выводы:

- уровень в эпицентре закачки за весь период эксплуатации не превысит экологически безопасных отметок, так как будет находиться на 70-100 м ниже дневной поверхности;
- площадь растекания дренажных вод в ММП выйдет за пределы границ лицензионного участка в 2046 г;
- максимальная полезная ёмкость участка составит 3,15 млн. м<sup>3</sup> [477], с учётом закачных скважин северной и центральной частей. При этом необходимо отметить, что для наиболее эффективного использования полезной ёмкости участка, начиная с 2026 г. (после окончания строительства) необходимо не менее 40% рассолов закачивать в северных и центральных закачных скважинах (№ 2з, 3з, 4з, 5з и 6з).

### ***6.2 Мирнинское кимберлитовое поле***

В пределах Мирнинского кимберлитового поля влияние на гидродинамический режим водоносных комплексов и горизонтов будут оказывать рудники Интернациональный и Мир, а также сопряжённые с ними участки закачки [494; 495]. Из-за особенностей криогидрогеологических, структурно-тектонических условий, описанных ранее, площадь техногенного воздействия на водоносные горизонты и комплексы будут разительно отличаться, в зависимости от глубины их залегания. Т.к. особенности строения изучаемых объектов: метегеро-ичерский водоносный комплекс, олекминский водоносный горизонт, толбачанский водоносный комплекс, а также существующие и предлагаемые к строительству участки закачки были рассмотрены в главе 2, рассмотрим особенности прогнозирования изменения гидродинамической обстановки.

Анализируя гидрогеологические условия месторождений, необходимо выделить три объекта изучения: – метегеро-ичерский водоносный комплекс; – олекминский водоносный горизонт; – толбачанский водоносный комплекс.

Построение гидродинамической модели ввиду отсутствия прямой связи между указанными водоносными комплексами и горизонтами, а также различными граничными условиями, было выполнено отдельно для каждого объекта. Причём, в виду особенностей вскрываемых коллекторов, прогнозирование для олекминского водоносного горизонта и толбачанского водоносного комплекса было выполнено для каждого шахтного поля.

При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик метегеро-ичерского водоносного комплекса. Исходные параметры расчетного метегеро-ичерского водоносного комплекса приняты по материалам ранее выполненных опытно-промышленных и научно-исследовательских работ за весь период отработки месторождения в интервале водоносного комплекса и корректировались на этапе калибровки модели. В плане метегеро-ичерский водоносный комплекс в силу изменчивости

фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, принят кусочно-однородным. В районе трубки «Интернациональный», как отмечалось выше, по данным ГИС, корреляция метегерской свиты (с 1 по 7 коллектора) нарушена, были определены низкие фильтрационные параметры. Поэтому для решения прогнозной задачи при отработке запасов в разрезе принята двухслойная система, в которой 1 слой – малопроницаемый метегерский водоносный горизонт, 2 слой с более высокими фильтрационными параметрами – ичерский водоносный горизонт.

Помимо площадных кусочно-однородных зон на модели отражались элементы неоднородности, такие как зоны разломов. В качестве начальных условий принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени, задаваемых равными на обоих слоях. Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде ГУ I, II и III рода.

Калибровка модели проводилась по принципам, описанным ранее. Модельное распределение уровня подземных вод метегеро-ичерского водоносного комплекса по состоянию на 2022, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 и 2050 гг. изображено на рисунках в приложении 15.

Отдельно необходимо отметить, что в рамках прогнозируемого периода (до 2050 г.) пьезометрическая поверхность метегеро-ичерского комплекса претерпит существенные изменения, которые будут связаны с этапами отработки ключевых месторождений трубок Интернациональная и Мир [397; 398; 402].

**Этап 1** – с 2022 по 2026 гг., техногенное воздействие на МИВК будет заключаться в дренировании коллекторов №№ 1–7 метегерской свиты рудником Интернациональный, и закачкой дренажных вод за Западным разломом со средним объёмом ~ 300-400 тыс. м<sup>3</sup> в год; в районе шахтного поля трубки Мир будет продолжаться восстановление, уровень в карьере на конец 2026 г. прогнозируется на отм. +112/+115 м; закачка за Восточным разломом будет производиться только на участке Тымтайдахский в объёме ~ 1,5–2,0 млн. м<sup>3</sup> в год. Т.е. в этот период времени в пределах МИВК будет выделяться одна незначительная депрессионная воронка радиусом не более 3 км. Площадь репрессионных куполов за Западным и Восточным разломами также будет незначительна (в рамках объекта исследований). Суммарная площадь техногенного воздействия не превысит 200 км<sup>2</sup>.

**Этап 2** – с 2027 по 2036 гг., техногенное воздействие на МИВК будет заключаться в полном вскрытии всех десяти коллекторов рудником Интернациональный, и закачкой дренажных вод за Западным разломом со средним объёмом ~ 10,0–10,5 млн. м<sup>3</sup> в год; в районе шахтного поля трубки Мир будет продолжаться восстановление, уровень в карьере на конец 2036 г. прогнозируется на отм. +170/+175 м; закачка за Восточным разломом будет производиться только на участке Тымтайдахский в объёме ~ 1,5–2,0 млн. м<sup>3</sup> в год. Т.е. в этот период времени в

пределах МИВК будет выделяться одна депрессионная воронка изометричной формы, характеризующейся минимальным юго-западным радиусом  $\sim 3$  км (из-за обратной закачки); и максимальным северо-восточным (до 20 км). Площадь репрессионного купола за Западным разломом увеличится в 6–10 раз, репрессионный купол за Восточным разломом останется неизменным. Суммарная площадь техногенного воздействия увеличится в 2 раза до 400 км<sup>2</sup> [406].

**Этап 3** – с 2036 по 2044 гг., техногенное воздействие на МИВК достигнет своего максимума и будет заключаться: в полном вскрытии всех десяти коллекторов рудником Интернациональный, и закачкой дренажных вод за Западным разломом со средним объёмом  $\sim 10,0$ - $10,5$  млн. м<sup>3</sup> в год; в районе шахтного поля трубки Мир начнётся опережающее водопонижение для отработки затопленных запасов; закачка дренажных вод будет производиться не только за Восточным, но и за Аппаинским разломами в суммарном объёме  $\sim 17,5$ - $18,0$  млн. м<sup>3</sup> в год. Т.е. в этот период времени в пределах МИВК будет выделяться две депрессионных воронки изометричной формы. Воронка трубки Интернациональной не претерпит значимых изменений и будет характеризоваться минимальным юго-западным радиусом  $\sim 3$  км (из-за обратной закачки); и максимальным северо-восточным (до 20 км). Воронка трубки Мир будет характеризоваться минимальным восточным и юго-западным радиусами  $\sim 10$  км (из-за участков обратной закачки); и максимальным северным радиусом (до 30-35 км). Площадь репрессионного купола за Западным разломом стабилизируется в размере, репрессионный купол за Восточным и Аппаинским разломами сольётся в единую структуру. Суммарная площадь природно-техногенной системы, образованной от процесса откачка-закачка, увеличится в 2–3 раза до 1000–1200 км<sup>2</sup>.

**Этап 4** – с 2045 по 2050 гг. (до остановки рудника Мир), техногенное воздействие на МИВК существенно уменьшится из-за окончания отработки трубки Интернациональная, и будет состоять из: депрессионной воронки трубки Мир и сопряжённого репрессионного купола за Восточным и за Аппаинским разломами, формирующихся из-за откачки/закачки объёме  $\sim 14,5$ – $15,0$  млн. м<sup>3</sup> в год. Т.е. в этот период времени в пределах МИВК будет выделяться одна депрессионная воронка рудника Мир изометричной формы. Она будет характеризоваться минимальным восточным радиусом  $\sim 10$  км (из-за участков обратной закачки); и максимальным северным радиусом (до 30–35 км). Суммарная площадь техногенного воздействия уменьшится и составит до 800 км<sup>2</sup>.

Олекминский водоносный горизонт вскрыт подземными горными выработками в пределах шахтных полей трубок Интернациональная и Мир в период подземной отработки месторождений. Кровля водоносного горизонта в пределах территории фиксируется в отм. -515/-640 м, подошва  $\sim$  -635/-660 м. Статический уровень на отметке +130 м.

В настоящее время дренирование олекминского водоносного горизонта происходит только выработками рудника Интернациональный. Подземные выработки рудника Мир в настоящее время затоплены. После возобновления добычных и проходческих работ (в 2025–2027 гг.), в районе шахтного поля трубки Мир начнётся формирование схожей депрессионной воронки. Для подтверждения локальности данного воздействия построим гидродинамическую модель шахтного поля трубки Интернациональная, которая в данной ситуации будет являться объектом аналогом для последующих выводов и обобщений.

Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе разработок рудника «Интернациональный». Площадь района моделирования составила 16 (4×4) км<sup>2</sup>. Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном режиме. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался равномерной сеткой, состоящей из 160000 (400×400) ячеек. Площади ячеек равны 10×10 м<sup>2</sup>. Размеры и принятый шаг ввиду низких фильтрационных параметров позволяет с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности на весь период прогнозирования. Для решения задач прогноза гидродинамического режима подземных вод и водопритоков к руднику «Интернациональный» был выполнен учет всех режимообразующих факторов олекминского водоносного горизонта: – границы области фильтрации в плане; – пространственно-временной характер фильтрационных течений; – значения геофильтрационных параметров; – вид граничных условий; – строение области фильтрации в плане и разрезе.

В плане олекминский водоносный горизонт в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, геолого-структурными факторами, принят кусочно-однородным. В разрезе водоносный комплекс схематизировался как единый водоносный пласт с осредненным коэффициентом фильтрации. Помимо площадных кусочно-однородных зон на модели отражались элементы неоднородности в виде «тонких» структур. К таким структурам относятся зоны разломов: Центральный, Параллельный и Восточный. Разломы на модели задавались фильтрационными барьерами в виде:

$$c = k/b, \quad (6.3)$$

где:  $k$  – коэффициент фильтрации структуры, м/сут;  $b$  – ширина структуры, м.

На уровень подземных вод олекминского водоносного горизонта будут влиять подземные горные выработки, заданные граничным условием 1 рода с отметкой почвы вскрывающих выработок. Калибровка модели проводилась по принципам, описанным ранее. Модельное распределение уровня подземных вод олекминского водоносного горизонта по состоянию на конец 2022 г. приведено на рис. 6.7.

Толбачанский водоносный комплекс в Мало-Ботубинском районе на настоящий момент вскрыт только выработками рудника «Интернациональный». Кровля и подошва водоносного горизонта расположены на отметках -815 м абс. и -1035 м абс., уровень на отметке +60 м абс. Размеры области исследований в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе исследований. Площадь моделирования составила 16 (4×4) км<sup>2</sup>. Схематизация гидрогеологического разреза для построения расчетной схемы модели выполнена с учетом имеющегося фактического материала по району исследований. Фильтрационный поток исследуемой области разбит неравномерной сеткой, состоящей из 181251 (441×411) ячеек.

Площади ячеек равны от 1 до 400 м<sup>2</sup>. Наименьшие площади ячеек соответствуют местам расположения дегазационных скважин. Размеры и принятый шаг позволяет с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности месторождения. Принципы калибровки модели, описаны ранее, прогнозное распределение уровня подземных вод на конец 2022 г приведено на рис. 6.8.

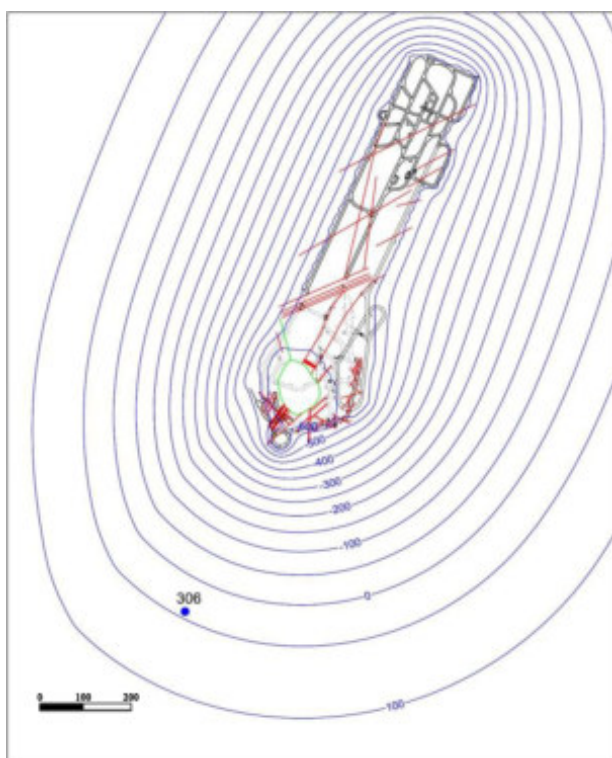


Рис. 6.7. Прогнозное распределение уровня подземных вод олекминского водоносного горизонта на конец 2022 г.<sup>31</sup>

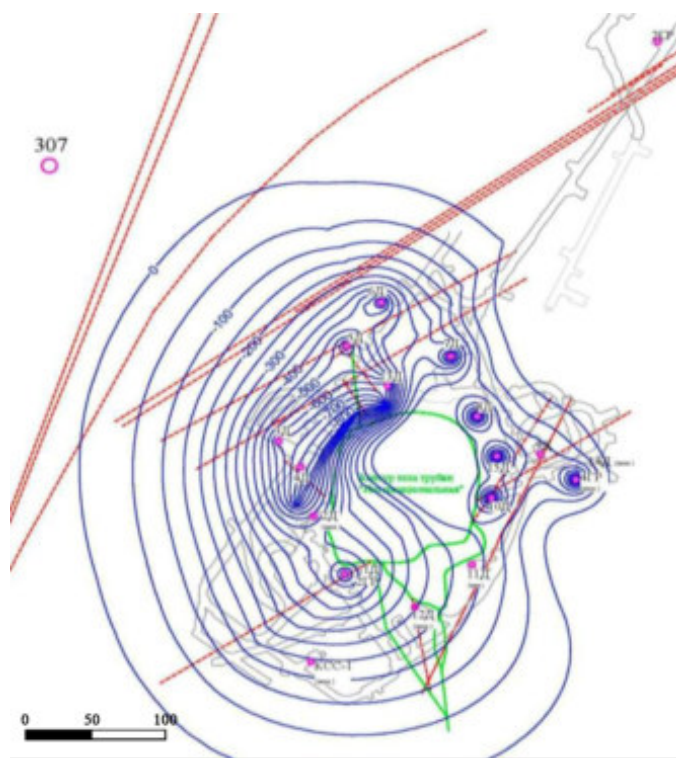


Рис. 6.8. Прогнозное распределение уровня подземных вод толбачанского водоносного комплекса на конец 2022 г.<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Интернациональная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

### 6.3 Накынское кимберлитовое поле

Техногенное воздействие на гидродинамический режим и геологическую среду в пределах рассматриваемой территории обусловлено обработкой расположенных на удалении ~ 3 км друг от друга трубок Ботуобинская и Нюрбинская, и участка закачки дренажных вод Ботуобинский, использующего коллекторы толщи ММП (рис. 6.9). Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима в пределах карьерных полей рассматриваемых трубок и участка Ботуобинский была осуществлена методами моделирования.

В настоящее время непосредственное воздействие на гидродинамический режим изучаемой территории оказывает только трубка Нюрбинская, т.к. карьер трубки Ботуобинской вскрыет подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (далее ПВВК) не ранее 2027 г.



Рис. 6.9. Плановое расположение объектов исследования (сост. Янников А.М.)

По причине небольшой удаленности месторождений друг от друга, горно-геологические условия их отработки очень схожи, за исключением отсутствия в пределах карьерного поля трубки Ботубобинская межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (МВБК). Характеристика геокриологических, криогидрогеологических, горно-геологических условий месторождения была приведена ранее (главы 2-5).

Моделирование гидрогеологических условий месторождения трубки «Нюрбинская» проведено с использованием лицензионной программы FEFLOW. Исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, были определены размеры области фильтрации, реализуемые на модели, позволяющие учитывать в процессе исследований все основные режимобразующие факторы. Площадь района исследований составила порядка 400 км<sup>2</sup> [496]. При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик МВБК. В плане МВБК в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, принят кусочно-однородным. Разломы на модели заданы с фильтрационными характеристиками, от тарированными по фактическим наблюдениям за режимом подземных вод на разных этапах моделирования водопритоков к месторождению. В качестве начальных условий принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени, задаваемых во всех точках исследуемой области фильтрации в виде известной функции координат. Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде ГУ I, II III рода. Начальное распределение напоров для прогнозирования изменения уровня рассолов МВБК в карьере задавалось по состоянию на сентябрь 2022 года. Калибровка модели проводилась по принципам, описанным ранее. Относительное отклонение не превышает 5%. Модельное распределение уровней подземных вод МВБК на сентябрь 2022 г. представлено в приложении 16.

ПВБК был вскрыт карьером трубки «Нюрбинская» в 2020 г. Кровля вскрыта на отм. - 150 м. Так как ПВБК напорный, статический уровень фиксировался на отметке +60/+70 м. Размеры области моделирования в плане выбраны, исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, таким образом, чтобы ее внешние границы оказывали минимальное влияние на гидродинамические процессы, протекающие в районе разработок трубки. Решение фильтрационных задач на модели осуществлялось в нестационарном режиме. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неравномерной сеткой, состоящей из 7912 элементов. Размеры и принятый шаг ввиду низких фильтрационных параметров позволяет с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности на весь период прогнозирования. Для решения задач прогноза гидродинамического режима подземных вод и водопритоков к руднику «Нюрбинская» был выполнен учет всех режимобразующих факторов ПВБК.

Модельное распределение уровней ПВВК на сентябрь 2022 г. представлено в приложении 16.

#### *6.4 Далдынское кимберлитовое поле*

В пределах Далдынского кимберлитового поля влияние на гидродинамический режим водоносных комплексов оказывает рудник Удачный и сопряжённые с ним участки закачки [329; 497]. Необходимо напомнить, что участки закачки дренажных вод рудника Удачный делятся на 2 типа:

1. Использующие коллекторы толщи ММП – Октябрьский, Киенгский, Левобережный, Левобережный-2.

2. Использующие коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса – Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

Особенности криогидрогеологических, газодинамических, литолого-фациальных и структурно-тектонических условий, а также общая характеристика участков закачки были приведены ранее (главы 2-4). В рамках данной главы выполнен прогноз гидродинамического режима верхнекембрийского, среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов. Отработка трубки Удачная привела к разнонаправленным изменениям пьезометрических поверхностей водоносных комплексов Далдынского кимберлитового поля:

1. В пределах верхнекембрийского водоносного комплекса (далее ВВК) была сформирована депрессионная воронка радиусом до 20 км, компенсируемая на участках Киенгский и Левобережный зонами вертикального перетока из техногенных водоносных горизонтов;

2. Среднекембрийский водоносный комплекс (далее СВК) подвергается интенсивному осушению в пределах шахтного поля трубки Удачная, т.к. коллекторы данного комплекса не используются для обратной закачки, формирование депрессионной воронки никак не компенсируется. По данным режимных наблюдений радиус воронки в северном и северо-восточном направлениях достиг 35 км.

3. Техногенное влияние на нижнекембрийский водоносный комплекс (далее НВК) будет разделено на 2 этапа:

- Этап 1 в период 2022–2035 гг., сопряжён с использованием коллекторов данного водоносного комплекса для закачки дренажных вод. В результате будет сформирован репрессионный купол растекания площадью ~ 350–400 км<sup>2</sup>.

- Этап 2 в период с 2036-до конца отработки месторождения (2068 г). В указанный временной интервал пьезометрическая поверхность нижнекембрийского водоносного комплекса будет представлять собой дипольную природно-техногенную систему, состоящую из

депрессивной воронки рудника Удачный, и репрессивных куполов растекания от эксплуатации участков обратной закачки. Из-за существенного роста притока природных рассолов, потребуется строительство дополнительных 2-3 участков. В результате суммарная площадь природно-техногенной системы составит  $\sim 750\text{--}800 \text{ км}^2$ .

Рассмотрим условия и причины формирования зон вертикального перетока в ВВК в пределах участков Киенгский и Левобережный.

#### *Участок «Киенгский»*

При построении гидродинамической модели на Киенгском участке рассматривается техногенный водоносный горизонт в толще ММП совместно с ВВК. В естественных условиях в нижней части разреза сформировался интервал непроницаемых ММП, который служит верхним водоупором для ниже залегающего ВВК, приуроченного к отложениям мархинской свиты. В верхней части разреза ВВК минерализация рассолов изначально составляет 30–50 г/л. В силу гравитационной дифференциации и залегания ММП в кровле ВВК на границе «лед-вода» образовалась пленка пресной, неагрессивной ко льду, воды. При закачке рассолов в ММП рассолы достигают водоупорного слоя, и вследствие их агрессивности ко льду нарушается сплошность водоупорного интервала в кровле ВВК и происходит гидродинамическая связь ВВК и техногенного водоносного горизонта. Это подтверждено опытом эксплуатации участка. В связи с этим при решении задач о прогнозе распространения закачиваемых рассолов и заполнения емкости рассматриваемых участков необходимо учитывать переток рассолов из ММП в ВВК, т.е. рассматривать толщу ММП совместно с верхнекембрийским водоносным комплексом.

Кровля верхнекембрийского водоносного комплекса в рассматриваемом районе залегает на отметках +125 – +150 м абс. Подошвой комплекса являются карбонатно-глинистые породы нижней пачки мархинской свиты, залегающие на абсолютных отметках -80 – -100 м. Общая мощность комплекса составляет в среднем 250 м, суммарная мощность водопроницаемых слоев в разрезе комплекса – 3–30 м, т.е. порядка 5–10 % от общей мощности. Водообильность комплекса низкая, открытая пористость не превышает 5 %. Водопроницаемость пород незначительна, коэффициенты водопроницаемости составляют 0,03–0,7 м<sup>2</sup>/сут. Выделяются зоны повышенной проницаемости вдоль Октябрьского разлома в центральной и юго-западной части участка «Киенгский». В естественных условиях пьезометрический уровень находился на абсолютных отметках +169 – +207 м. Таким образом, ВВК при моделировании будем рассматривать как отдельный слой, отражающий толщу пород в интервале отметок -100 – +150 м абс. Толща ММП по своим фильтрационным свойствам характеризуется существенной неоднородностью, как в плане, так и в разрезе. На участке установлено наличие хорошо проницаемых зон, приуроченных к водораздельным участкам рельефа. Придолинные территории рек Далдын и Сытыкан характеризуются низкой проницаемостью и практически полным отсутствием свободной емкости

в ММП. В разрезе для ММП характерно затухание трещиноватости сверху вниз. По приемистости, емкостным свойствам, а также льдистости в ММП выделяются: - верхняя часть разреза от дневной поверхности до абс. отм. +330 м; - интервал разреза +330 – +280 м; - интервал разреза +280 – +200 м; - нижняя часть разреза ниже отметок +200 м.

Наибольшей проницаемостью характеризуются два верхних интервала, т.е. толща ММП от поверхности до отметки +280 м абс. На участке по данным разведки и промышленной закачки рассолов также выделяется центральная часть, для которой характерны повышенные значения приемистости (42–90 м<sup>3</sup>/ч). В этой части основная поглощающая толща приурочена к интервалу от +210 до +290 м абс., водопроницаемость, определённая при эксплуатации составляла 84–393 м<sup>2</sup>/сут [409].

В основу калибровки модели положены данные режимных наблюдений за уровнем режимом водоносных горизонтов и расходами закачки дренажных рассолов на Киенгском участке. Решение обратной задачи выполнялось методом целенаправленного подбора параметров (методом итераций), при котором учитывались представления о геолого-гидрогеологических особенностях водоносных горизонтов, данные фильтрационных исследований водопроницаемости пород и их емкостных свойств. По результатам проведения эксплуатации участка и гидродинамического моделирования была выполнена прогнозная оценка полезной емкости структур под закачку рассолов на участке «Киенгский». При расчете был произведен учет факторов: - отсутствие закачки в течение последних 7 лет привело к падению уровня подземных вод техногенного горизонта: - в эпицентре закачки на 80-100 м, с абс. отм. +400 до +420-300 м; - в периферийных частях до 30–40 м, до абс. отм. +200/+220 м; - за всю историю эксплуатации участка закачано 12,9 млн. м<sup>3</sup>; - выявленных в юго-восточной и восточной частях участка высокопроницаемых зон перетока рассолов в ВВК; - рассчитанного в процессе гидродинамического моделирования перетока из техногенного водоносного горизонта в ВВК, который составил 490 м<sup>3</sup>/сут.

Для оценки потенциальной емкости участка модельный расчет проведен для режима закачки производительностью 300 м<sup>3</sup>/ч, но не более 200 тыс. м<sup>3</sup> в год. Закачка задавалась в существующий закачной ряд скважин.

На рисунках в приложении 17 приведены прогнозные карты изолиний уровней подземных вод техногенного водоносного горизонта и напоров верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2033 г. По результатам моделирования прогнозные отметки в центре участка закачки и в периферийных областях не достигают экологически безопасных значений, что указывает на то, что за 12 лет в ММП можно закачать **более 2,4 млн. м<sup>3</sup>** рассолов.

Отдельно необходимо отметить, что полученный остаточный объём участка не учитывает параметр перетекания рассолов в ВВК. С учётом расчётного значения  $Q = 490 \text{ м}^3/\text{сут}$ , т.е. 170 тыс.  $\text{м}^3$  в год, что составляет 85% от объёма закачиваемых вод.

Объём остаточной емкости принимался равным объёму рассолов, поступивших в ММП на участке закачки до момента выхода кривой репрессии к экологически безопасным отметкам. Таким образом, остаточная емкость Киенгского участка закачки рассолов на конец 2021 г., с учётом параметра перетекания, составляет **не менее 4,7 млн.  $\text{м}^3$** .

Таким образом, из анализа результатов гидродинамического моделирования следует, что зона вертикального перетока коррелирует с плановым расположением техногенного водоносного горизонта, сформированного в пределах участка Киенгский. Суммарная площадь техногенного воздействия на ВВК  $\sim 35 \text{ км}^2$ .

#### *Участок «Левобережный»*

Проведенными исследованиями и гидродинамическим моделированием установлено, что ореол растекания дренажных вод относительно невелик, растекание происходит в рамках отведенного горного отвода, с формированием свода репресссионного купола растекания в районе расположения закачных скважин. Созданная гидродинамическая модель участка закачки «Левобережный» ориентирована в настоящее время на обеспечение контроля процесса закачки и прогнозирование условий и требований его экологически безопасного функционирования до 2023 г. Максимальная расчётная свободная емкость массива ММП в пределах участка «Левобережный», с учетом перетекания в ВВК, полученная в результате гидродинамического моделирования, на декабрь 2018 г. составляет 21 млн.  $\text{м}^3$ , что вполне обеспечивает закачку дренажных вод рудника «Удачный» до 2023 г. Принципы построения модели для участков, использующих коллекторы ММП, были описаны ранее. В процессе моделирования был подтверждён переток из техногенного водоносного горизонта в ВВК, который составляет 4570  $\text{м}^3/\text{сут}$ .

На рисунках приложения 17 приведены прогнозные карты изолиний уровней подземных вод техногенного водоносного горизонта и напоров верхнекембрийского водоносного комплекса на конец 2023 г.

Проведенными исследованиями и гидродинамическим моделированием установлено, что ореол растекания дренажных вод относительно невелик, растекание происходит в рамках отведенного горного отвода, с формированием свода репресссионного купола растекания в районе расположения закачных скважин. Таким образом, из анализа результатов гидродинамического моделирования следует, что зона вертикального перетока коррелирует с плановым расположением техногенного водоносного горизонта, сформированного в пределах участка Левобережный. Суммарная площадь техногенного воздействия на ВВК  $\sim 50 \text{ км}^2$ .

Моделирование гидрогеологических условий месторождения трубки «Удачная» проведено с использованием лицензионной программы FEFLOW. Исходя из гидрогеологических условий района и решаемых задач, были определены размеры области фильтрации, реализуемой на модели, позволяющие учитывать в процессе исследований все основные режимобразующие факторы. Площадь района исследований составила порядка 220 км<sup>2</sup> и определена радиусом влияния системы дренажа рудника «Удачный».

Анализируя гидрогеологические условия месторождения, представленные в главе 3, необходимо выделить три объекта изучения:

- верхнекембрийский водоносный комплекс (далее ВВК);
- среднекембрийский водоносный комплекс (далее СВК);
- нижнекембрийский водоносный комплекс (далее НВК).

Исходя из гидрогеологических, геокриологических, горно-геологических и структурно-тектонических условий, гидрогеологическая модель месторождения трубки «Удачная» представлена в разрезе 15 слоями: первый слой – многолетнемерзлые породы; второй слой – ВВК; 3–13 слои - СВК; 14–15 слои НВК.

На гидродинамический режим ВВК в региональной схеме месторождения трубки «Удачная» за весь период отработки повлияли горные работы в карьере и закачка в многолетнемерзлые породы на участках закачки «Октябрьский», «Киенгский» и «Левобережный». В настоящее время притоки в карьер практически отсутствуют (прогнозный расчётный приток не превышает 1–2 м<sup>3</sup>/час). При построении гидродинамической модели была проведена детализация гидрогеологических характеристик водоносного комплекса. В плане ВВК в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, литолого-фациальными и структурно-тектоническими факторами, принят кусочно-однородным. В качестве начальных условий принималось распределение уровней подземных вод в начальный момент времени, задаваемых во всех точках исследуемой области фильтрации в виде известной функции координат. Граничные условия задавались для всех граничных точек (внешних и внутренних) области исследований в виде ГУ I, II и III рода. Начальное распределение напоров для прогнозирования изменения уровня подземных вод задавалось по состоянию на декабрь 2021 г.

Результаты калибровки модели фильтрации подземных вод при решении обратной задачи указывают на вполне допустимую сходимость фактического положения уровней подземных вод ВВК с их распределением на модели. Относительная погрешность не превышает 5%. Модельное распределение уровня подземных вод ВВК на конец 2022 г. изображено на рис. 6.10.

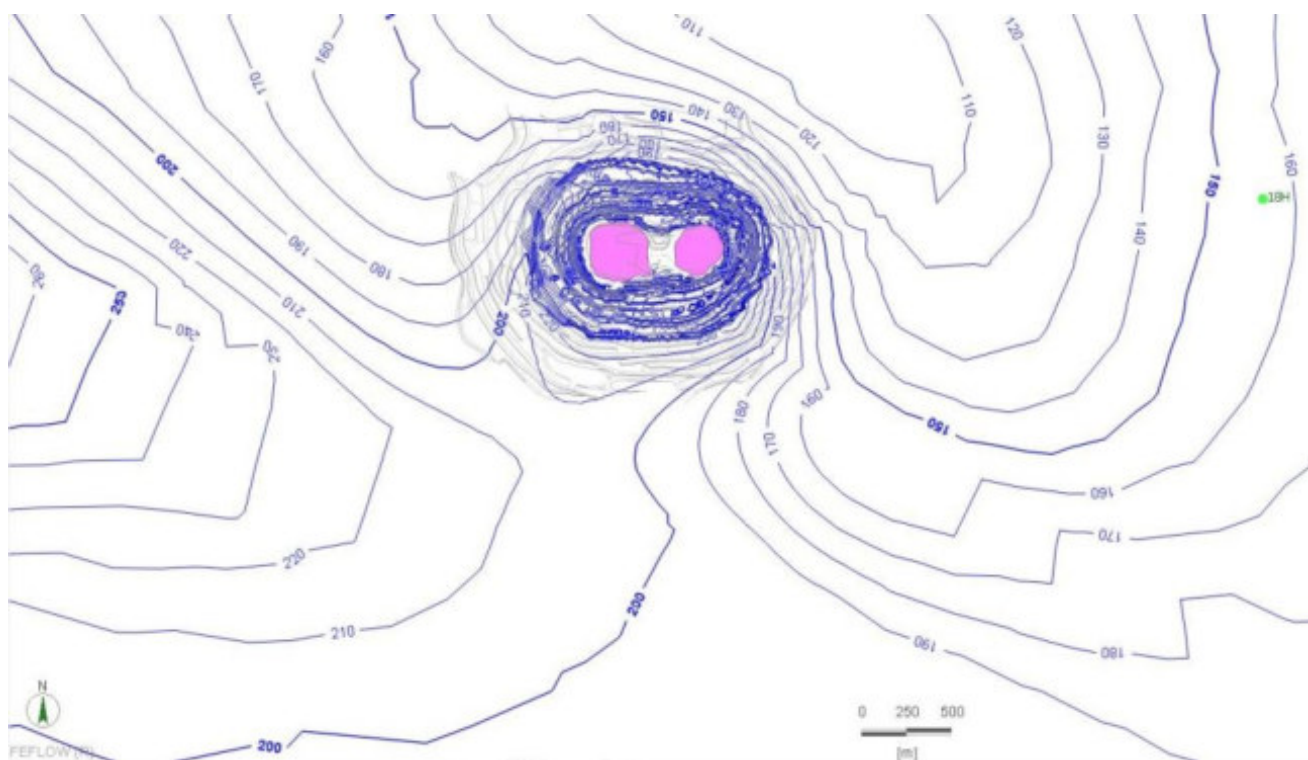


Рис. 6.10. Модельное распределение уровня подземных вод ВVK на конец 2022 года (сост. Янников А.М.)

Схематизация гидрогеологического разреза для построения расчетной схемы модели выполнена с учетом имеющегося фактического материала по району исследований, а также проведенных геолого-гидрогеологических и геофизических работ. В плане область фильтрации представляет собой полуограниченный пласт, ограниченный с юго-западной стороны Октябрьским разломом. Согласно данным опытно-фильтрационных работ, проведенных в пределах СВК, тектонического и геологического строения, в районе месторождения выделяется две полосы с разными фильтрационно-емкостными характеристиками. С юго-западной стороны, примыкающей к Октябрьскому разлому, располагается полоса с низкими коэффициентами фильтрации, с северо-восточной стороны по оси Далдынской флексуры располагается полоса более проницаемых пород. Граница между этими полосами проходит между Западным и Восточным рудными телами. Исходные параметры расчетного СВК приняты по материалам ранее выполненных опытных и научно-исследовательских работ и корректировались на этапе калибровки модели [393; 406; 409]. Фильтрационный поток исследуемой области моделировался неравномерной сеткой, состоящей из  $25008 \times 11$  элементов. Размеры и принятый шаг ввиду низких фильтрационных параметров позволяет с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности на весь период прогнозирования. Размеры элементов сетки в пределах карьерного поля составляют 0,1–20 м. В разрезе проведено разделение сетки на 11 слоев с отметками -320, -365, -380, -398, -425, -445, -465, -480, -580, -630, -750 для детального построения рудника, являющегося также дренирующим объектом. Для решения задач прогноза

гидродинамического режима подземных вод и водопритоков к руднику «Удачный» был выполнен учет всех режимообразующих факторов СВК: - границы области фильтрации в плане; - пространственно-временной характер фильтрационных течений; - значения геофильтрационных параметров; - вид граничных условий; - строение области фильтрации в плане и разрезе.

Граничные условия на внешних границах модели («удаленные границы») задавались в виде ГУ I рода с поддержанием уровня подземных вод на абсолютной отметке 200 м.

В плане СВК в силу изменчивости фильтрационных свойств водовмещающих пород, вызванных, прежде всего, геолого-структурными факторами, принят кусочно-однородным. В данный момент на уровень подземных вод СВК главным образом влияет дренажная система рудника на горизонтах -365 и -465 м абс., на модели задано граничное условие I рода с заданием отметок горизонтов рудника.

Соответствие получаемого на модели распределения уровня подземных вод натурному положению контролировалось по опорным точкам, в качестве которых принимались скважины режимной сети, имеющие данные о положении уровней подземных вод СВК. На рисунке 6.11 приводится расчетное (модельное) распределение уровня подземных вод СВК на конец решения обратной задачи (декабрь 2022 г).

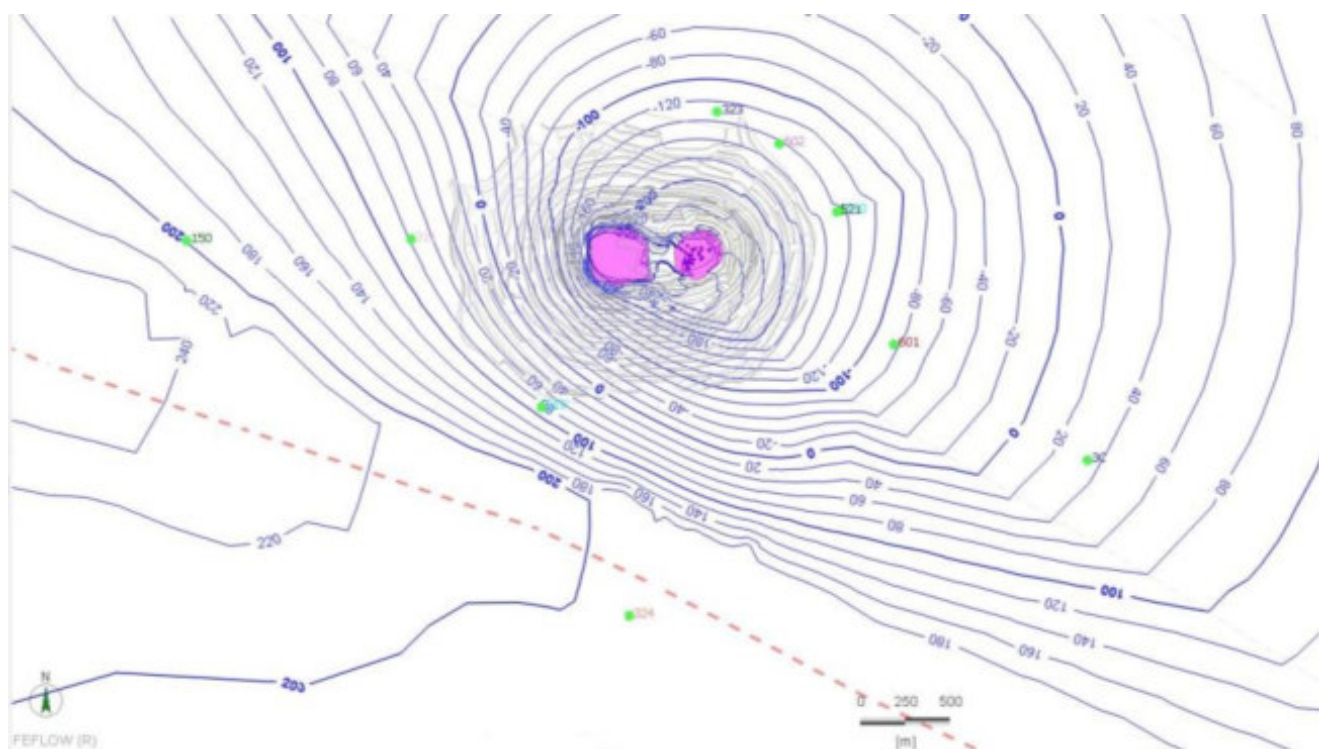


Рис. 6.11. Модельное распределение уровня подземных вод СВК на конец 2022 года

(сост. Янников А.М.)

НВК на настоящий момент не вскрыт выработками рудника. С 2019 г. выполняется закачка дренажных вод рудника Удачный в пределах участков Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный. Схематизация гидрогеологического разреза для построения расчетной схемы модели выполнена с учетом имеющегося фактического материала по району исследований. Фильтрационный поток исследуемой области аналогично верхним водоносным комплексам разбит неравномерной сеткой, состоящей из 25008 элементов. Размеры и принятый шаг позволяют с наибольшей детальностью отразить гидрогеологические особенности в пределах карьерного поля и участка закачки на весь прогнозируемый период. На рисунке 6.12 приводится расчетное распределение уровня подземных вод НВК на конец 2022 г.

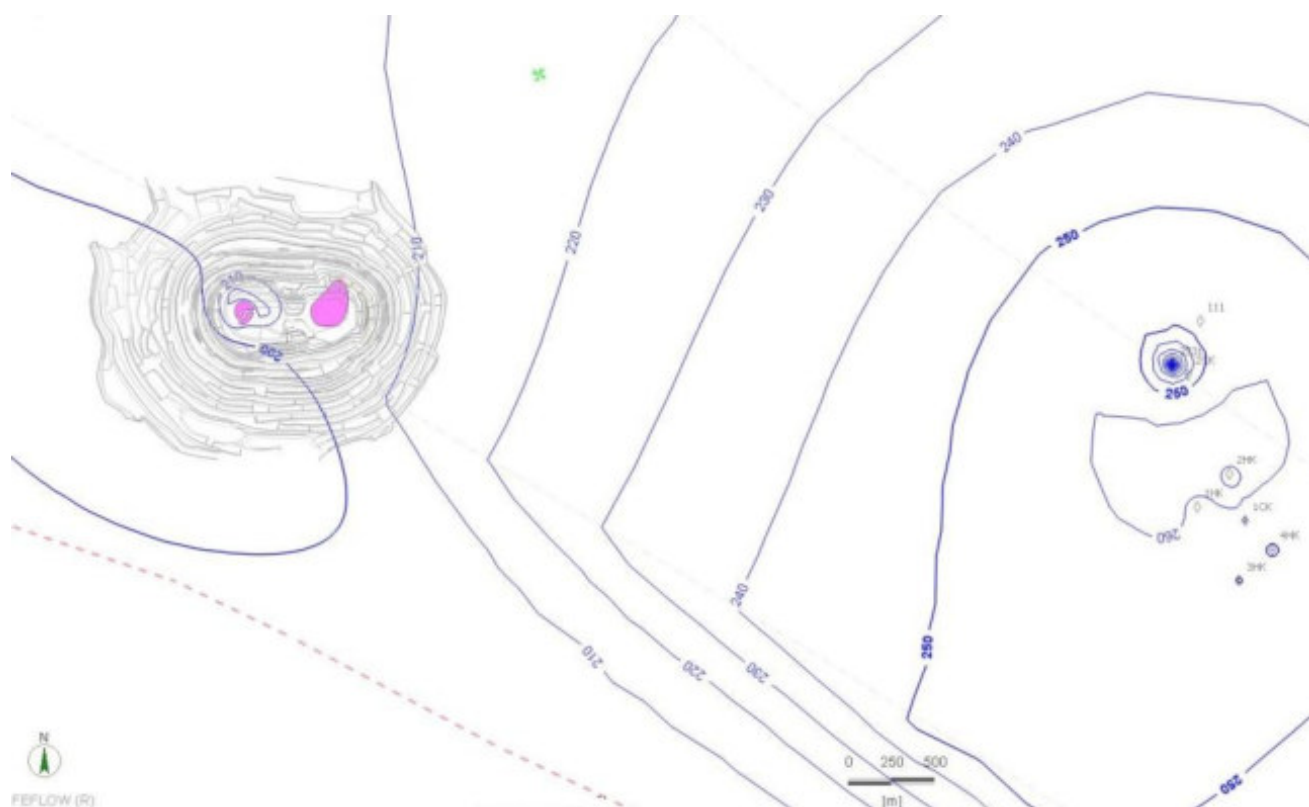


Рис. 6.12. Расчетное распределение уровня подземных вод НВК на конец 2022 года (сост. Янников А.М.)

НВК в настоящее время не оказывает влияния на притоки дренажных вод в рудник, так как не вскрыт и связь со СВК через рудные тела не установлена, что, учитывая высокие фильтрационно-емкостные характеристики, было бы определено значительным увеличением притоков. Выполним прогноз изменения гидродинамического режима НВК из-за закачки дренажных вод трубки Удачная в пределах участков Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный. Характеристика данных участков приведена в главе 2.

Для прогнозных расчетов водопонижения и сопутствующей закачки дренажных рассолов рудника «Удачный» была использована разработанная в процессе калибровки

гидродинамическая модель. Расчетный период моделирования охватывает отработку месторождения подземным способом до отметки -615 м абс. в пределах СВК с закачкой дренажных рассолов в НВК. Согласно Техническому проекту отработка запасов месторождения трубки «Удачная» происходит в следующем порядке: – ЭБ №1 (-260/-365 м) – 2022–2023 гг.; – ЭБ №2 (-365/-465 м) – 2022-2030 гг.; – ЭБ №3 (-465/-615 м) – 2023–2039 гг.

Моделирование выполнялось в 2 этапа при следующих условиях:

1 этап – определение максимальных расходов закачки по участкам и суммарно. Закачка дренажных рассолов рудника «Удачный» задавалась на модели ГУ 1 рода с поддержанием уровня на устьях скважин для определения максимальных расходов в 3х возможных вариантах закачки:

- 1) при свободном наливе во все скважины;
- 2) при свободном наливе в скважины участка «Среднекембрийский»;
- 3) при свободном наливе в скважины участка «Нижнекембрийский Юго-Восточный».

2 этап – определение избыточных давлений, необходимых для закачки 300 м<sup>3</sup>/ч. Закачка дренажных рассолов рудника «Удачный» задавалась на модели ГУ 2 рода:

- 1) на участке «Среднекембрийский»;
- 2) на участке «Нижнекембрийский юго-восточный».

3 этап - определение избыточных давлений, необходимых для закачки 600 м<sup>3</sup>/ч. на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».

**1 этап.** По результатам моделирования определены максимальные расходы закачки как в оба участка (1 вариант), так и при условии раздельной эксплуатации участков «Среднекембрийский» (2 вариант) и «Нижнекембрийский юго-восточный» (3 вариант). Максимальные прогнозные объемы закачки приведены в таблице 6.10.

Таблица 6.10 – Максимальные прогнозные расходы закачки по скважинам при поддержании уровня на устье скважины [404]

Вариант	Расходы закачки по скважинам, м <sup>3</sup> /ч										Суммарный расход закачки, м <sup>3</sup> /ч
	2531	1НК	2НК	3НК	4НК	5НК	6НК	7НК	8НК	9НК	
1	71,0	19,3	46,3	29,5	47,6	10,8	50,0	9,4	42,0	20,0	345,9
2	74,3	21,0	49,6	33,1	52,4						230,5
3						12,0	55,0	10,0	48,0	22,0	147,0

Как видно из таблицы, закачка 300 м<sup>3</sup>/ч, по данным моделирования, возможна только при работе обоих участков. Стационарный режим при закачке достигается в течение 1–2 лет. Динамика изменения пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации обоих участков (закачка ведется во все 10 скважин) через 1 год, 5 лет и 10 лет после начала закачки

приведена в приложении 18.

**2 этап.** Для определения избыточного давления на устье скважин при условии раздельной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» выполнено моделирование гидрогеологических условий с заданием граничного условия 2 рода с суммарным расходом 300 м<sup>3</sup>/ч (на каждом участке) и распределением его в скважины пропорционально возможным максимальным расходам закачки при свободном наливе (таблица 6.11).

Таблица 6.11 – Заданные расходы закачки и полученные напоры [404]

Среднекембрийский участок						
№ скважины	2531	1НК	2НК	3НК	4НК	Среднее
Q, м <sup>3</sup> /ч	100	27	65	41	67	
$\Delta S$ , м	91,0	62,5	72,7	53,5	62,2	68,4
$\Delta P$ , МПа	0,73	0,50	0,58	0,43	0,50	0,73
Участок Нижнекембрийский Юго-Восточный						
№ скважины	5НК	6НК	7НК	8НК	9НК	
Q, м <sup>3</sup> /ч	24	112	21	98	45	
$\Delta S$ , м	115,8	141,9	151,5	108,5	100,5	124
$\Delta P$ , МПа	0,93	1,14	1,21	0,87	0,80	0,93

Исходя из проведенных расчетов, избыточное давление на устье скважины составит 68,4 м для участка «Среднекембрийский» и 124 м – для «Нижнекембрийский юго-восточный». Динамика изменения уровня НВК приведены на рисунках 6.13-6.14. Стационарный режим фильтрации достигается через ~ 3 года с начала эксплуатации.

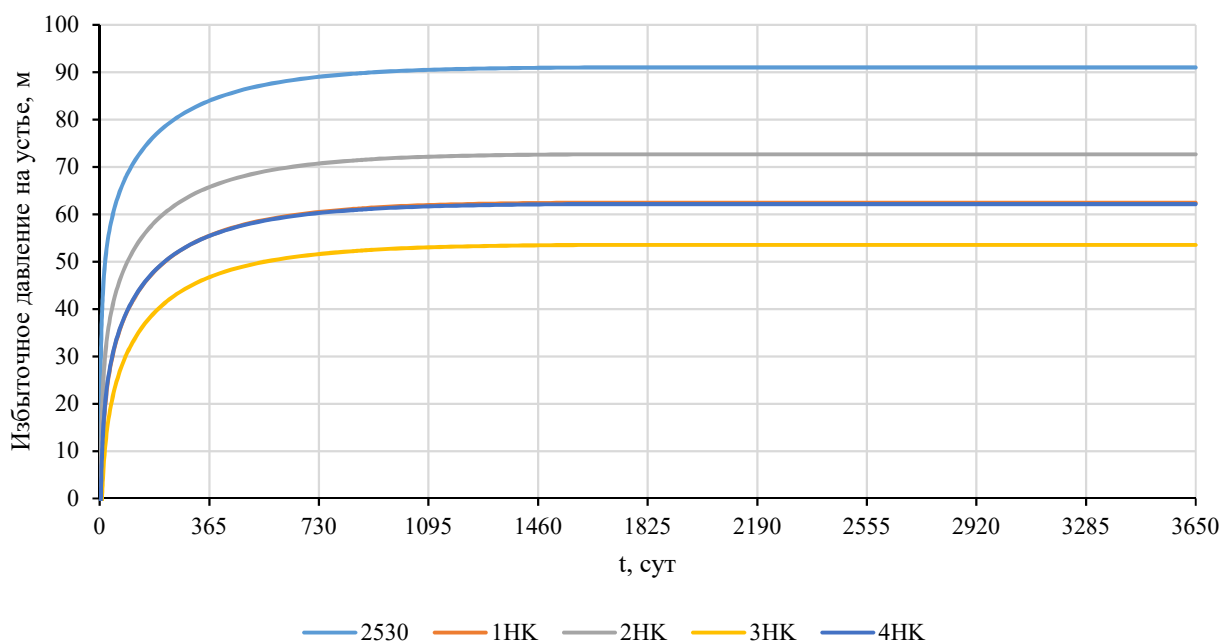


Рис. 6.13. Динамика уровня НВК в закачных скважинах на участке «Среднекембрийский» (сост. Янников А.М.)

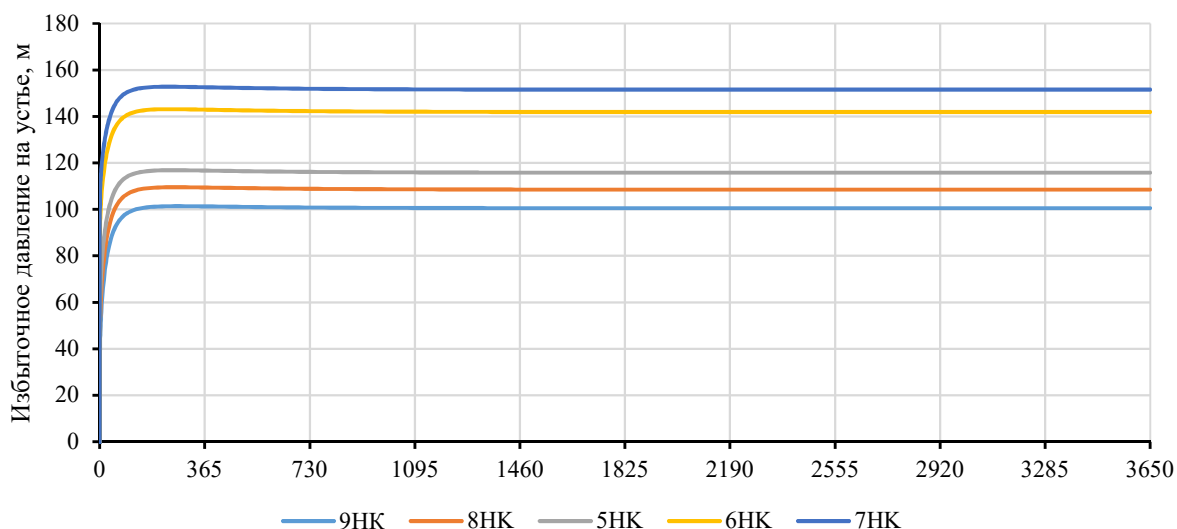


Рис. 6.14. Динамика уровня НВК на участке «Нижнекембрийский юго-восточный» (сост. Янников А.М.)

Динамика изменения пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации при эксплуатации участка «Среднекембрийский» через 1 год, 5 лет и 10 лет после начала закачки приведена в приложении 19.

Динамика изменения пьезометрической поверхности НВК при условии эксплуатации при эксплуатации участка Нижнекембрийский юго-восточный» через 1 год, 5 лет и 10 лет после начала закачки приведена в приложении 19.

**3 этап.** Для определения избыточного давления на устье скважин при условии совместной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» выполнено моделирование гидрогеологических условий с заданием граничного условия 2 рода с суммарным расходом  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$  и распределением его в скважины с максимальными расходами закачки при условии свободного налива (табл. 6.12).

Таблица 6.12 – Результаты расчетов прогнозного моделирования при закачке  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ . [404]

Участок	Среднекембрийский					Нижнекембрийский Юго-Восточный					сумма
	№ скв	1НК	2НК	3НК	4НК	5НК	6НК	7НК	8НК	9НК	
Q, $\text{м}^3/\text{ч}$	100	27	65	41	67	24	112	21	98	45	600
S, м	117,5	92,5	102,5	86,4	95,0	145,2	171,5	181,1	139,0	129,0	среднее 126,0
P, Мпа	0,94	0,74	0,82	0,69	0,76	1,16	1,37	1,45	1,11	1,03	среднее 1,01

Результаты расчетов показали, что увеличение давления происходит в первые полгода, с выходом в квазистационарный режим через 3 года, далее избыточный напор на устьях скважин

по данным моделирования практически не меняется. Изменение уровня подземных вод НВК через 1 год, 5 лет и 10 лет после начала закачки приведено в приложении 19.

***Проведенный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы:***

1. В пределах Алаakit-Мархинского поля размеры природно-техногенных систем будут иметь ограниченное распространение, и их влияние можно охарактеризовать как локализованное в пределах отдельных шахтных полей и участков закачки. Радиусы депрессионных воронок от отработки месторождений составят для трубки Айхал ~ 1,5–2,0 км, для трубки Юбилейная ~ 4,0–4,5 км. Площадь суммарного техногенного воздействия на гидродинамический режим составит ~ 26 км<sup>2</sup>. Эксплуатация участков закачки Ноябрьский и Заречный приведёт к формированию ограниченных по площади техногенных водоносных горизонтов, с суммарной площадью техногенного воздействия (с учётом сопряжённых зон вертикального переноса в нижележающий НоВК) составит ~ 13,0–13,5 км<sup>2</sup>. Суммарная площадь техногенного воздействия составит не более 40 км<sup>2</sup>.

2. В пределах Мирнинского поля отработка кимберлитовых трубок Интернациональная и Мир приведёт к формированию разноплощадных природно-техногенных систем, вплоть до регионального уровня воздействия. Радиусы депрессионных воронок от отработки месторождений Мирнинского кимберлитового поля будут существенно отличаться в каждом водоносном комплексе и горизонте. Наименьшие по площади депрессионные воронки будут в пределах олекминского водоносного горизонта и толбачанского водоносного комплекса и составят для трубки Интернациональная ~ 1,5–2,0 км, для трубки Мир ~ 2,0–2,5 км. Площадь суммарного техногенного воздействия составит ~ 20–25 км<sup>2</sup>, что говорит о незначительном воздействии на геологическую среду в отм. -500/-1300 м. Однако в отметках МИВК радиус формируемых депрессионных воронок оценивается для трубки Интернациональная до 15–20 км; для трубки Мир до 30–35 км. Эксплуатация участков закачки, расположенных в зонах динамического воздействия Аппаинского, Восточного и Западного разломов, приведёт к формированию площадных репрессионных куполов растекания, оцениваемых в зависимости от рассматриваемого этапа ~ 180–800 км<sup>2</sup>. Приведенные площадные параметры позволяют говорить о достаточно высоком техногенном воздействии и формировании природно-техногенных систем в пределах МИВК, обусловленных процессом откачки/закачки. Прогнозная площадь данных систем в период 2022–2050 гг. будет существенно изменяться составлять от 200 до 1200 км<sup>2</sup>.

3. Природно-техногенные системы Накынского поля также будут иметь ограниченное воздействие. Радиусы депрессионных воронок от отработки месторождений Накынского кимберлитового поля составят для трубки Ботуобинская ~ 2,5–3,0 км, для трубки Нюрбинская ~ 3,5–4,0 км. Площадь суммарного техногенного воздействия на гидродинамический режим МВВК и ПВВК составит ~ 40 км<sup>2</sup>. Эксплуатация участка закачки Ботуобинский приведёт к

формированию техногенного водоносного горизонта, ограниченного по площади. Суммарная площадь техногенного водоносного горизонта и сопряжённых зон вертикального переноса в ниже залегающий межмерзлотный верхнекембрийский водоносный горизонт составит  $\sim 2,5 \text{ км}^2$ . Приведенные площадные параметры позволяют говорить о достаточно локализованном техногенном воздействии в пределах Накынского поля. Суммарная площадь техногенного воздействия составит не более  $42 \text{ км}^2$ .

4. Далдынское кимберлитовое поле будет характеризоваться наиболее значительными по площади и степени влияния природно-техногенными системами. Радиусы депрессионных воронок от отработки трубки Удачная будут существенно отличаться в каждом водоносном комплексе. Наименьшая по площади депрессионная воронка будет сформирована в пределах ВВК (радиусом до 20 км). В отметках СВК радиус депрессионной воронки оценивается до 35–40 км. Депрессионная воронка в НВК будет компенсирована системой обратной закачки, и поэтому будет характеризоваться радиусом  $\sim 10\text{--}25 \text{ км}$ . Эксплуатация участков закачки, использующих коллекторы толщи ММП, привела к формированию зон вертикального перетока в верхнекембрийский водоносный комплекс. Подтверждённый расход перетекания из техногенного водоносного горизонта в ВВК на участке Киенгский в зоне динамического влияния Октябрьского разлома составляет  $490 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; а на участке Левобережный –  $4570 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Техногенная нагрузка, связанная с описанными процессами, прослеживается на площади  $\sim 85\text{--}90 \text{ км}^2$ . Эксплуатация участков Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный привела к формированию репрессионного купола растекания. Дальнейшая закачка дренажных вод будет только увеличивать его площадь. После вскрытия подземными горными выработками коллекторов НВК его пьезометрическая поверхность претерпит очередные изменения и будет представлять собой дипольную природно-техногенную систему, состоящую из депрессионной воронки рудника Удачный, и репрессионных куполов растекания от эксплуатации участков обратной закачки. Из-за существенного роста притока природных рассолов, потребуется строительство дополнительных 2–3 участков. В результате суммарная площадь природно-техногенной системы составит  $\sim 750\text{--}800 \text{ км}^2$ . Приведенные площадные параметры позволяют говорить о достаточно высоком техногенном воздействии и формировании природно-техногенных систем в пределах Далдынского кимберлитового поля, обусловленных процессом откачки/закачки. Прогнозная суммарная площадь данных систем в период 2022–2050 гг. будет существенно изменяться и составлять от 200 до  $800 \text{ км}^2$ .

Необходимо отметить, что структурно-гидрогеологические особенности месторождений, по сути, предопределили площадные параметры и характер формирования природно-техногенных систем в пределах изучаемой территории, а также повлияли на прогнозные изменения площади техногенного воздействия.

## **ГЛАВА 7. ИЗМЕНЕНИЯ ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СИСТЕМ**

Описанные ранее (гл. 5 и 6) решения по обращению с высокоминерализованными дренажными водами обрабатываемых месторождений привели не только к изменению гидродинамического режима в пределах территории исследований, но и оказали существенное техногенное воздействие на породы криогенной толщи. Формируемые в процессе закачки природно-техногенные системы являются локальными участками, характеризующимися техногенной нагрузкой высокой интенсивности. Изучение и контроль геотермического режима в пределах объектов исследования, прежде всего участков закачки, является приоритетной задачей, т.к. необходимо для безопасной отработки месторождений, повышению экологической безопасности, а также имеет четкий социальный аспект, с учётом природных и климатических особенностей Западной Якутии. Как отмечалось ранее (гл. 2), все рассматриваемые в рамках диссертационного исследования объекты расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Причины и условия формирования мощной криолитозоны в пределах территории исследований неоднократно рассматривались в процессе фундаментальных исследований Романовского, Толстихина, Цытовича, Швецова, Шепелёва, Железняк и др. Суммарная мощность криолитозоны по всем изучаемым кимберлитовым полям: Алакит-Мархинскому, Далдынскому, Мирнинскому и Накынскому превышает 600 м, поэтому сохранение криогенной толщи в преимущественно неизменённом геотермическом состоянии, в результате процесса обратной закачки, является приоритетной задачей, позволяющей сохранять и поддерживать экологически безопасные условия эксплуатации участков закачки.

Изучение геотермического режима пород в пределах участков закачки проводились сотрудниками ИМЗ СО РАН и ИЗК СО РАН на первых этапах эксплуатации участка Октябрьский и Киенгский (Далдынское кимберлитовое поле) и Тымтайдахский (Мирнинское кимберлитовое поле). В результате проведенных исследований [109-111; 139; 157; 159] были сделаны выводы о том, что закачка оказывает разнонаправленные действия на породы криогенной толщи [292; 460; 461; 462], формируя аномальное распределение температур по стволу закачных скважин, выделялись участки как с положительными, так и с отрицательными градиентами. Главной рекомендацией являлось продолжение режимных геотермических наблюдений, с учётом перспективности выбранного метода обращения с высокоминерализованными дренажными водами, с точки зрения развития горнодобывающей промышленности в районах распространения ММП. К сожалению, регулярные режимные работы с охватом всех участков закачки с привлечением специалистов ИМЗ СО РАН были

прекращены более чем на 10 лет (2008–2022 гг.), и возобновлены только 2023 г. В указанный период (2008–2022 гг.) работы по изучению геотермического режима проводились преимущественно структурными подразделениями АК АЛРОСА, и автор принял непосредственное участие в их проведении на всех этапах.

Необходимо отметить, что должного внимания влиянию закачки на геотермический режим горных пород до настоящего времени не уделялось. Отсутствие системного анализа и разрозненность исследований требовали большой аналитической работы, проведенной автором. Учитывались произошедшие в 2013–2022 гг. изменения в схемах транспортировки дренажных вод, а также изменения методов вскрытия и глубин отработки, и, как следствие, роста притоков природных рассолов на главных месторождениях.

В рамках данной главы был выполнен сопоставительный анализ изменения геотермического режима в пределах участков закачки четырёх кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции: Алаakit-Мархинского, Далдынского, Мирнинского и Накынского, определяемых совокупностью природных и техногенных факторов и сопутствующее выявление закономерностей трансформации для прогнозирования изменений при возрастающей техногенной нагрузки. В рамках проведенных исследований автором на основе всей имеющейся информации (1986–2022 гг.) была выполнена оценка динамики изменения температур горных пород на участках локализованного интенсивного техногенного воздействия, связанного с функционированием систем закачки дренажных высокоминерализованных рассолов в недра.

По причине существенных отличий режима эксплуатации участков закачки и типа используемых коллекторов, в зависимости от криогидрогеологических условий конкретного кимберлитового поля, была выполнена отдельная характеристика происходящих изменений. Главными параметрами, определяющими динамику изменений, являются интенсивность закачки (дебит и объём), наличие природных рассолов в интервалах закачки и температура пород в интервалах поглощения. Перечисленные факторы позволили создать классификацию участков закачки (табл. 7.1), разделив их на соответствующие группы:

Таблица 7.1 – Классификация участков закачки (сост. Янников А.М.)

№ группы	Кимберлитовое поле	Название участка
1	Алаakit-Мархинское, Накыское	Ботуобинский, Заречный, Ноябрьский
2	Мирнинское	УОЗ, УЗВ
3	Далдынское	Октябрьский, Киенгский, Левобережный, Левобережный-2
4	Мирнинское	Тымтайдахский, Южный
5	Далдынское	Среднекембрийский, Нижнекембрийский юго-восточный

1 группа – участки, характеризующиеся малой интенсивностью эксплуатации: средний дебит закачки не должен превышать в разрезе года  $Q_{\text{ср}} = 45 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем 395 тыс.  $\text{м}^3$  в год и использующие в качестве рассолопоглощающих морозные недонасыщенные породы второго яруса криолитозоны. Под данные параметры подходят участки Ботубинский (Накынское кимберлитовое поле); Заречный и Ноябрьский (Алакит-Мархинское кимберлитовое поле).

2 группа – участки, характеризующиеся малой интенсивностью эксплуатации: средний дебит закачки не должен превышать в разрезе года  $Q_{\text{ср}} = 45 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем 395 тыс.  $\text{м}^3$  в год и использующие в качестве рассолопоглощающих охлажденные породы третьего яруса криолитозоны, приуроченные к подмерзлотным коллекторам водоносных горизонтов и комплексов. Под данные параметры в настоящее время подходят участки обратной закачки (УОЗ и УЗВ), расположенные в зоне динамического воздействия Западного разлома (Мирнинское кимберлитовое поле).

3 группа – участки, характеризующиеся средней и высокой интенсивностью эксплуатации: среднегодовой дебит закачки, составляет  $Q_{\text{ср}} = 150\text{--}350 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем от 1,3 до 3,1 млн.  $\text{м}^3$  в год и использующие в качестве рассолопоглощающих морозные недонасыщенные породы второго яруса криолитозоны. Под данные параметры подходят участки Далдынского кимберлитового поля: Киенгский, Левобережный, Левобережный-2 и Октябрьский.

4 группа – участки, характеризующиеся средней и высокой интенсивностью эксплуатации: среднегодовой дебит закачки, составляет  $Q_{\text{ср}} = 150\text{--}1500 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем от 1,3 до 13,1 млн.  $\text{м}^3$  в год и использующие в качестве рассолопоглощающих охлажденные породы третьего яруса криолитозоны, приуроченные к подмерзлотным коллекторам водоносных горизонтов и комплексов. Под данные параметры в настоящее время подходят участки обратной закачки Тымтайдахский и Южный, расположенные в зоне динамического воздействия Восточного разлома (Мирнинское кимберлитовое поле).

5 группа – участки, характеризующиеся средней и высокой интенсивностью эксплуатации: среднегодовой дебит закачки, составляет  $Q_{\text{ср}} = 150\text{--}500 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем от 1,3 до 4,4 млн.  $\text{м}^3$  в год и использующие в качестве рассолопоглощающих коллекторы глубокозалегающих (ниже нулевой изотермы, т.е. в области положительных температур) подмерзлотных водоносных горизонтов и комплексов. Под данные параметры подходят участки Далдынского кимберлитового поля: Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

### 7.1 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков первой группы

Участки первой группы приурочены к Алакит-Мархинскому и Накынскому кимберлитовым полям (табл. 7.1). Режимная сеть в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля состоит из 28 скважин, а Накынского кимберлитового поля из 24 скважин. Режимные замеры температуры в стволах скважин проводились ежеквартально.

Криогидрогеологические условия Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей, (гл. 2), определили тип используемых коллекторов и способ обращения с дренажными водами. В настоящее время все участки: Ботубинский, Заречный и Ноябрьский, из-за особенностей строения криогенной толщи (гл. 2) используют морозные недонасыщенные породы второго яруса криолитозоны, и в процессе их эксплуатации формируется техногенный водоносный горизонт. Все три участка: Ботубинский, Заречный и Ноябрьский характеризуются невысокими расходами и объёмами закачки (максимальный объём закачиваемых вод на участке Ботубинский будет составлять 88,7 тыс. м<sup>3</sup> (243 м<sup>3</sup>/сут); а на участке Ноябрьский – 156,9 тыс. м<sup>3</sup> (430 м<sup>3</sup>/сут)), а также незначительным процентом использования полезной емкости (таблица 7.2). Прогнозный объём участков (полезная ёмкость в пределах участка) определён ранее [393; 406; 409] и приведён в гл. 5-6.

Таблица 7.2 – Параметры эксплуатации участков закачки (сост. Янников А.М.)

Название участка	Объём закачанных рассолов, м <sup>3</sup>	Прогнозный полезный объём, м <sup>3</sup>	% заполнения	Период закачки, гг.	Интервал формирования техногенного водоносного горизонта, м
Накынское кимберлитовое поле					
Ботубинский	200 000	1 900 000	10,5	2010–2022	110–210
Алакит-Мархинское кимберлитовое поле					
Ноябрьский	300 000	6 200 000	4,8	2013–2022	145–230
Заречный	5 000	3 150 000	0,1	2014–2022	140–250

Планы расположения закачных скважин (схемы участков) приведены на рис. 5.1, 5.2 и 5.24. Учитывая факт того, что дренажные рассолы месторождений Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитового полей имеют среднегодовую минерализацию 120–170 г/л, объёмы провзаимодействовавших вод криолитозоны не превышают двукратного объёма закачанных дренажных рассолов [393; 406; 409]. С учётом выполненного гидродинамического моделирования можно говорить о том, что эксплуатация участков Ботубинский, Заречный и Ноябрьский приведёт к формированию в пределах второго яруса криолитозоны техногенных водоносных горизонтов ограниченной площади, приведённых на криогидрогеологических характеристических разрезах (прил. 20).

Прогнозные параметры, а также распределение пьезометрических уровней, при соблюдении утверждённого режима эксплуатации на всем «жизненном цикле» (до 2050 г.) рассмотрены в главе 6.

Необходимо отметить, что перед началом эксплуатации температура пород в пределах участков первой группы составляла от -3 до -4 °С. Термометрия проводилась по всем скважинам участка (методика проведения приведена в гл. 1). По наблюдательным скважинам существенных изменений температуры зафиксировано не было (табл. 7.3), по закачным скважинам напротив были зафиксированы незначительные изменения температур (табл. 7.3).

Таблица 7.3 – Сравнительный анализ изменения температуры по стволу закачных и наблюдательных скважин (сост. Янников А.М.)

№ скважины	Глубина скважины, м	Глубина залегания уровня, м	Диапазон Т°С по стволу	Т°С на забое	Глубина залегания уровня, м	Диапазон Т°С по стволу	Т°С на забое	Степень охлаждения, °С
		до начала эксплуатации			по состоянию на конец 2022			
<b>Закачные скважины</b>								
102	210	сухо	-2,6/-2,9	-2,9	150,0	-6,7/-3,97	-3,97	-1,07
101	210	сухо	-5,1/-3,2	-3,2	154,8	-3,4/-4,2	-4,2	-1,0
2кр	205	сухо	-2,3/-2,9	-2,9	153,0	-3,87/-4,06	-4,06	-1,16
104	210	сухо	-2,8/-2,8	-2,8	162,3	-4,27/-3,92	-3,92	-1,12
106	210	сухо	-6,0/-2,9	-2,9	156,4	-3,7/-4,0	-4,0	-1,1
103	210	сухо	-2,5/-2,9	-2,9	156,8	-3,98/-4,08	-3,98	-1,08
<b>Наблюдательные скважины</b>								
105	210	сухо	-3,5/-3,8	-3,8	сухо	-3,7/-3,88	-3,88	-0,08
1кр	205	сухо	-5,0/-2,9	-2,9	158,0	-3,9/-4,21	-3,0	-0,1
5С	210	186,4	-2,9	-5,0	151,8	-2,69/-3,03	-4,73	+0,27
	350		-3,86/-5,6			-3,73/-5,3		
6С	216	175,4	-4,0/-3,9	-2,9	162,8	-4,05/-3,89	-2,89	+0,01
7С	210	204	-2,5/-3,85	-3,5	215	-3,47/-3,78	-3,76	-0,26
	300		-3,0/-3,5			-3,92/-3,76		
4С	210	206,8	-2,7/-2,5	-3,5	205,8	-2,4/-2,5	-4,0	-0,5
	350		-2,7/-3,9			-3,8/-4,4		
3н	250	150,9	-2,9/-3,0	-3,0	148,7	-3,16/-3,9	-3,1	-0,1
8С	270	211,2	-2,2/-2,8	-2,8	217	-2,7	-2,7	+0,1

Полученные данные (табл. 7.3) позволяют говорить о локальном влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны с точки зрения изменения геотермического режима. Объёмы закачки не позволяют сформировать каких-либо выдержанных аномалий значительной площади, т.к. продолжительность и интенсивность воздействия в целом компенсируются инертностью процессов криогенной толщи.

Незначительность объёмов закачки, инертность пород криогенной толщи, не привели к существенному площадному изменению температурного режима, по наблюдательным скважинам участка сезонные изменения температуры в интервале глубин 110-230 м не

превышало 0,5 °С и не имело четкой сезонной привязки. Однако при анализе изменения температур непосредственно в закачных скважинах отмечаются более существенные температурные изменения в разрезе года (таблица 7.4), обусловленные температурой закачиваемых дренажных вод [406; 409]. Предельные зафиксированные значения температуры (экстремумы) закачиваемых вод, составляют от +3 до -12 °С; среднегодовая температура составляет от -4 до -5 °С.

Таблица 7.4 – Осреднённые результаты термометрических измерений по закачным скважинам участков первой группы (2013–2022 гг.) (сост. Янников А.М.)

Глубина, м	Температура по стволу закачных скважин, °С							
	участок Ботуобинский				участок Ноябрьский			
	I квартал	II квартал	III квартал	IV квартал	I квартал	II квартал	III квартал	IV квартал
110	-5,0	-4,2	-1,2	-2,4				
120	-6,1	-4,3	-1,4	-2,5				
130	-7,5	-4,3	-1,4	-2,5				
140	-7,5	-4,3	-1,6	-2,8				
150	-8,0	-4,2	-1,6	-2,8	-4,8	-3,6	-0,5	-2,8
160	-8,1	-4,2	-1,9	-3,1	-5,3	-3,8	-1,2	-2,8
170	-8,1	-4,2	-2,1	-3,2	-6,6	-3,7	-1,2	-2,8
180	-8,0	-4,2	-2,1	-3,2	-6,7	-3,8	-1,2	-2,9
190	-8,1	-4,2	-2,1	-3,3	-6,5	-3,7	-1,5	-3,2
200	-8,0	-4,2	-2,2	-3,4	-6,8	-3,8	-1,5	-3,2
210	-7,5	-4,2	-2,2	-3,3	-7,0	-3,8	-1,7	-3,2
220					-6,8	-3,8	-1,7	-3,6
230					-6,5	-3,8	-1,7	-3,6

Анализ построенных кривых изменения температур (рис. 7.1) указывает на существенное влияние процесса закачки на геотермический режим, непосредственно в закачных скважинах. Дополнительно обращает на себя внимание существенная нарушенность температурных градиентов.

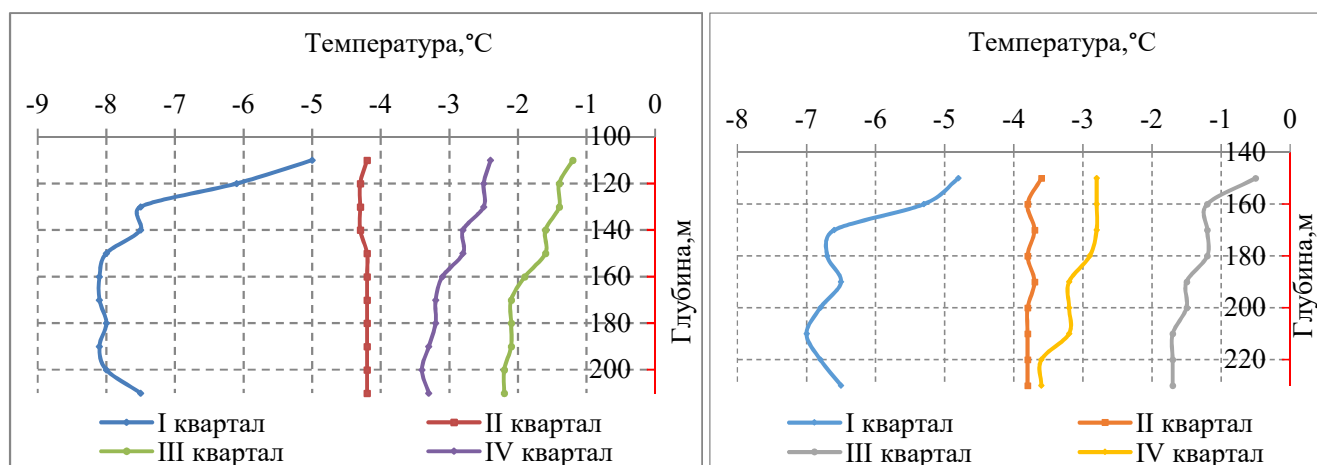


Рис. 7.1. Осреднённые кривые изменения температуры по стволу закачных скважин слева - участок Ботуобинский; справа – участок Ноябрьский (сост. Янников А.М.)

Помимо проводимых наблюдений непосредственно по стволам закачных и наблюдательных скважин, инструментом контроля за развитием техногенного водоносного горизонта в интервале второго яруса криолитозоны является наземная геофизика методами электроразведки, электротомографии, методом переходных процессов и др. (гл. 2). В процессе проведения исследований (Великин С.А. и др.) было подтверждено, что техногенный горизонт представляет собой аномалию, характеризующуюся отличной от окружающих пород электропроводимостью. Все выделенные низкоомные интервалы разреза интерпретируются как интервалы возможного в дальнейшем распространения техногенного горизонта, образующегося в проницаемых интервалах карбонатных пород (тектонически ослабленные зоны, зоны трещиноватости и дробления). Эти интервалы оцениваются как возможные пути транзита закачиваемых рассолов. Таким образом, была определена мощность и границы обводненных интервалов в изученном разрезе многолетнемерзлых пород (ММП). Полученные результаты в целом согласуются с наблюдаемыми по сети скважин изменениями пьезометрической поверхности формируемого природно-техногенного межмерзлотного горизонта [406; 409].

Необходимо отметить, что формируемый техногенный водоносный горизонт состоит из значительного количества вод криогенной толщи, находящихся на начальной стадии в твёрдой фазе. Вовлечение данного типа вод приводит не только к увеличению его объёма, но и площадному изменению минерализации даже на участках первой группы (рис. 5.6) [406; 409]. Оценку площадного воздействия процесса закачки низкой интенсивности целесообразно производить исходя из механизма воздействия рассола на криолитозону, который можно представить следующим образом: Под действием диффузии контактирующие с породой рассолы воздействуют на лед, находящийся в порах и трещинах. Рассолы, имеющие более низкую температуру замерзания, химически и физически взаимодействуют с кристаллами льда, смешиваясь с ними. Процесс смешения приводит к снижению точки замерзания ниже температуры ММП. В процессе оттаивания потребляется значительная энергия (скрытая теплота оттаивания  $q = 80$  ккал/кг), существенно замедляющая процесс движения фронта рассолов в глубь ММП. Прогнозные расчёты радиуса воздействия можно решить в рамках задачи Стефана и метода Л.С. Лейбензона:

Задача Стефана описывает процесс замерзания (оттаивания) грунта за счет изменения температуры на его поверхности. При этом конвекция не учитывается. Таким образом, не учитывается скорость фильтрации, то есть принимается  $v = 0$ . Такой подход можно считать приемлемым при малых коэффициентах фильтрации ММП. Решается система уравнений теплопереноса в одномерной постановке с условием на границе фазового перехода. Зависимость для оценки размера зоны проникновения фронта распространения рассола ( $x_{\phi}$ ) в криолитозоне:

$$x_{\phi} = \sqrt{\frac{2\lambda_m t}{q\rho n_l}} (T_p - T_{\phi}), \quad (7.1)$$

где  $\lambda_m$  - коэффициент теплопроводности зоны ММП, ккал/(м\*сут<sup>0</sup>С);

$t$  - время прогноза, сут;

$q$  - удельная теплота таяния льда, ккал/ кг;

$\rho$  - плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;

$n_l$  - льдистость грунта ( масса льда в единицы массы сухого грунта);

$T_{\phi}$  – температура замерзания (оттайки) смеси рассола и оттаявшего льда, <sup>0</sup>С;

$T_p$  – средняя за год температура рассола, поступающего в ММП, <sup>0</sup>С

При постановке задачи методом Л.С. Лейбензона используются переменные функции распределения температуры в талой и мерзлой зонах. В частности, в талой зоне распределение температуры принимается в соответствие с функцией Гаусса, а в замерзшем грунте – по линейному закону. Подобранные таким образом функции подставляют в условие сопряжения на границе раздела фаз и решают полученное дифференциальное уравнение относительно  $x_{\phi}$ . Полученное решение имеет вид:

$$x_{\phi} = \beta\sqrt{t}. \quad (7.2)$$

Постоянная  $\beta$  определяется из характеристического уравнения:

$$\frac{\lambda_T (T_p - T_{\phi})}{\beta} - \frac{\lambda_m (T_{\phi} - T_m)}{\sqrt{\pi\alpha}} = \frac{1}{2} q \rho n_l \beta, \quad (7.3)$$

где  $\lambda_{m, T}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности для мерзлой и талой зон, ккал/м×час <sup>0</sup>С;

$q$  – скрытая теплота оттаивания, ккал/кг;

$n_l$  – льдистость (принимается равной трещиноватости);

$\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности м<sup>2</sup>/час;

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_{оп}},$$

$C_{оп}$  – коэффициент объемной теплоёмкости воды и грунта, ккал/м<sup>3</sup> <sup>0</sup>С;

$T_p$  – средняя за год температура рассола, поступающего из карьера в ММП, <sup>0</sup>С;

$T_{\phi}$  – температура оттайки (замерзания) смеси рассола оттаявшего льда (фазового перехода), <sup>0</sup>С;

Выполненные расчёты позволяют утверждать, что закачка с низкой степенью интенсивности (до 400 (максимум 500) тыс. м<sup>3</sup> в год) характеризуется наименьшей техногенной нагрузкой, и способна оказывать влияние на геотермический режим пород локально, непосредственно в призабойной и пристволовой частях, максимальный прогнозный радиус влияния, рассчитанный в рамках задачи Стефана и метода Л.С. Лейбензона, составляет от 15 до 25 м, в зависимости от локальных особенностей проницаемости пород [393; 406; 409]. При определении емкости рабочего пласта используется такой параметр как недостаток насыщения, которые определяется разницей между пористостью и влажностью пород в этом интервале. По данным проведенных исследований средняя величина недостатка насыщения во втором ярусе

криогенной толщи, используемой для закачки, составляет от 8 до 13 (реже 15) %, без учета трещиноватости.

При моделировании процесса формирования природно-техногенных систем (из-за закачки дренажных вод), трещиновато-пористые породы второго яруса справедливо представить в виде среды, состоящей из чередования трещин и пористых блоков. Трещины и поры в блоках пород несмотря на указанное недонасыщение, содержат подземные воды, в виде льда. При деградации льда водопроницаемость трещиновато-пористой среды определяется проницаемостью трещин, а емкость – пористостью блоков. Учитывая, что трещины заполнены льдом не полностью, при закачке рассола будут продвигаться по открытой части трещин, быстро освобождая их ото льда за счет теплообмена и высокой минерализации ( $K_o^1 \rightarrow K_o$ ), где  $K_o$  – полный коэффициент фильтрации породы, свободной ото льда. Учитывая, что объем льда в трещинах мал по сравнению с объемом льда в пористых блоках ( $n_T \ll n_\delta$ ), потерями тепла на проработку трещин, для оценки объема вовлекаемых вод криолитозоны, можно пренебречь. Механизм воздействия рассола на ММП можно представить следующим образом. Под действием диффузии рассола проникают из трещин в блоки. Продвигаясь по занятому льдом поровому пространству блоков, рассолы химически и физически взаимодействуют с кристаллами льда, смешиваясь с ними в определенной пропорции. Процесс смешения приводит к снижению точки замерзания ниже температуры ММП и деградации твердой фазы (льда).

Результаты, под средством используемых методов геофизического контроля, позволяют утверждать, позволяют утверждать, что режим формирования при низкоинтенсивной закачке не будет существенно влиять на формирование температурного режима горных пород и не приведет к изменению границ мерзлой толщи в пределах участков первой группы.

Прогнозный объем вод криогенной толщи, вовлеченный в процесс формирования природно-техногенной геосистемы: техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природными межмерзлотными водоносными комплексами (для участка Ботуобинский это верхнекембрийский межмерзлотный водоносный комплекс, для участков Заречный и Ноябрьский – нижнеордовикский водоносный комплекс), составит:

- для участка Ботуобинский от 3,0 до 4,0 млн. м<sup>3</sup>;
- для участка Заречный от 5,0 до 6,0 млн. м<sup>3</sup>;
- для участка Ноябрьский от 10,0 до 12,0 млн. м<sup>3</sup>.

Площади формирующихся в пределах Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей природно-техногенных систем (гл. 5 и 6), составят порядка 40 км<sup>2</sup> для каждого из них, и могут быть охарактеризованы как локальные.

## *7.2 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков второй группы*

Участки второй группы – это УОЗ и УЗВ рудника Интернациональный (рис. 5.20), расположенные в зоне динамического воздействия регионального Западного разлома, Мирнинского кимберлитового поля. Режимная сеть данных участков состоит из 20 скважин. Режимные замеры температуры в стволах скважин проводились ежеквартально.

Криогидрогеологические условия и краткая геокриологическая характеристика Мирнинского кимберлитового поля (гл. 2), определили тип используемых коллекторов и способ обращения с дренажными водами рудника Интернациональный (гл. 5). Участки используют коллектора подмерзлотного метегеро-ичерского водоносного комплекса, относящегося к третьему ярусу. Отличительной особенностью использования коллекторов подмерзлотных водоносных комплексов является отсутствие полезной емкости криогенных структур, т.к. для закачки используется неограниченный в плане (относительно объектов исследования) региональный водоносный комплекс. Режим работы закачных скважин определяется параметрами проницаемости и водопроницаемости отдельных блоковых структур, и регулируется как опытным путем (кустовыми наливками различной продолжительности), так и с помощью цифровых гидродинамических моделей, которые позволяют определить оптимальный режим закачки как в каждую отдельную скважину, так и во весь узел в целом. Также основываясь на принципе «суперпозиции» определяется взаимодействие куполов растекания и депрессионных воронок между собой (прил. 18). Незначительный объём закачиваемых вод 300-400 тыс. м<sup>3</sup> в год, также определяет достаточно локальное техногенное воздействие на криолитозону. За всё время эксплуатации 2001-2023 гг. (УОЗ с 2001 г; УЗВ с 2008 г) в зону динамического воздействия Западного разлома было закачено порядка 9,5 млн. м<sup>3</sup> дренажных вод, представленных рассолами из коллекторов метегерской, олекминской и толбачанской свит. Изменение уровня режима в пределах шахтного поля имеет чёткую корреляцию с режимом закачки (рис. 7.2).

Температура горных пород, до начала закачки в пределах изучаемой территории составляла порядка -2/-3°C. Изучение влияния процесса закачки на изменение геотермического режима (табл. 7.5; прил. 21) было выполнено относительно начальных замеров, выполненных в начале 2001 года. Обращают на себя внимание фиксируемые уже перед началом эксплуатации геотермические градиенты, указывающие на техногенную нарушенность, обусловленную опытным освоением скважин, перед началом эксплуатации. Однако, дальнейшие замеры, указывают на наличие более выраженного и значимого влияния, формирующего наблюдаемые изменения.

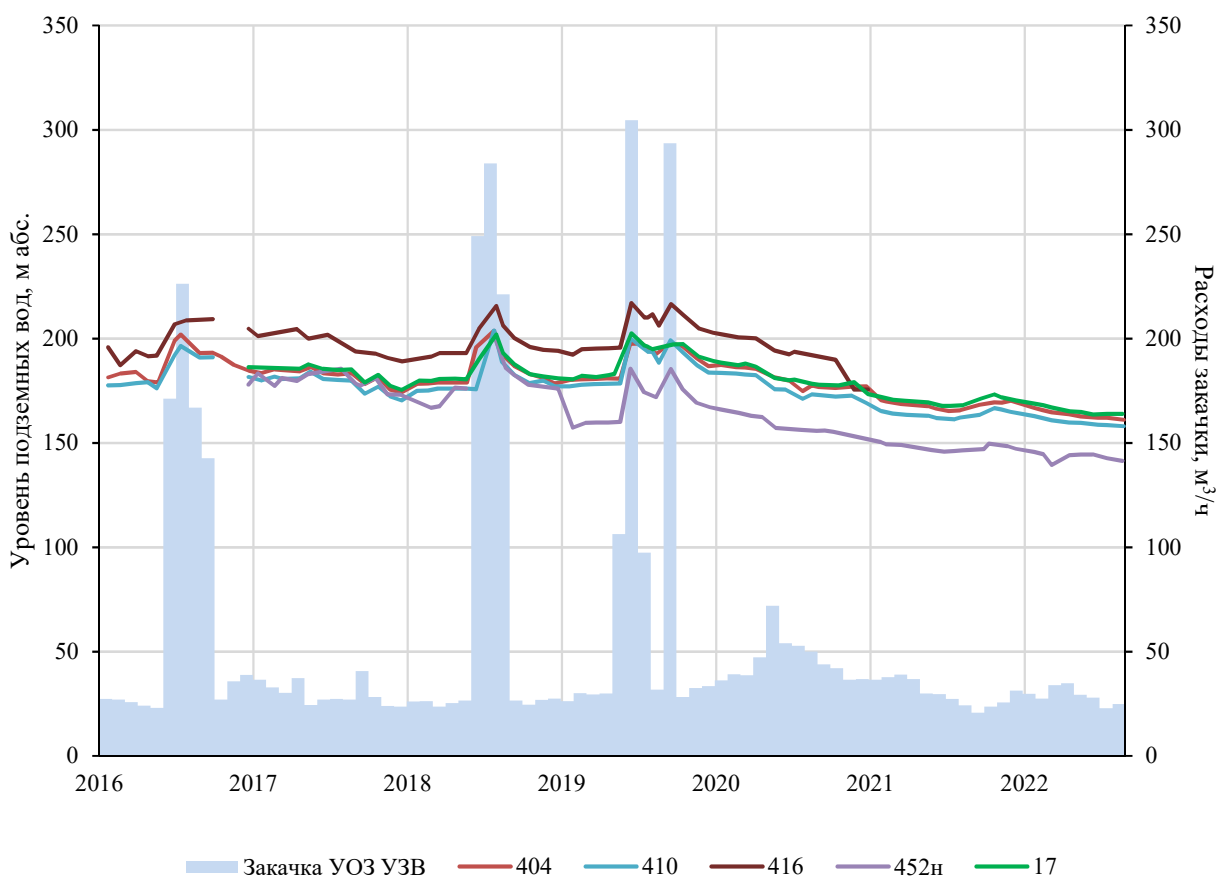


Рис. 7.2. Динамика изменения уровней МИБК в зависимости от объемов закачиваемых вод  
(сост. Янников А.М.)

Таблица 7.5 – Изменения температуры по стволу закачных скважин (сост. Янников А.М.)

№ скважины	Глубина скважины, м	Глубина залегания уровня, м	Диапазон Т°С по стволу	Т°С на забое	Глубина залегания уровня, м	Диапазон Т°С по стволу	Т°С на забое	Степень охлаждения, °С
403	530	229,32	-1,4/-2,26	-1,4	180,0	-0,55/-1,0	-0,55	+0,85
407	605,5	235,0	-1,55/-2,45	-1,55	180,1	-0,8/-1,1	-0,8	+0,75
409	600,0	240,70	-1,2/-2,5	-1,2	179,8	-1,0/-2,4	-1,0	+0,2
410	600,0	240,75	-1,1/-2,45	-1,1	181,0	-0,57/-1,4	-0,57	+0,53
414	600,0	236,92	-1,0/-2,23	-1,0	180,4	-0,55/-1,0	-0,55	+0,45

Исходя из представленной информации можно сделать вывод, что закачка дренажных вод, осуществляемая в зоне динамического влияния Западного разлома в период 2001-2023 гг, преимущественно осуществляемая в обход поверхностных накопителей большой емкости, привела к увеличению температуры по стволам скважин на +0,2/+0,85 °С. Данный процесс обусловлен температурой закачиваемых вод, т.к. объемы закачиваемых вод незначительны и они успевают нагреться в процессе их аккумуляции и сбора в подземных горных выработках до +3/+4°С.

Однако, несмотря на выявленный отепляющий эффект, изменений граничных условий криолитозоны до настоящего времени не произошло даже непосредственно в пределах участка закачки УОЗ. Дальнейшая эксплуатация в текущем режиме продолжится до 2026 года. Учитывая выявленную тенденцию растепления  $+0,04$  °С в год, к концу 2026 года в пределах УОЗ прогнозируется температура на забоях скважин в диапазоне  $-0,4/-0,5$  °С, что позволяет относить породы МИВК к третьему ярусу криолитозоны (рис. 2.13).

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что эксплуатация участков закачки второй группы (при условии формирования дренажных вод в подземных горных выработках рудника и прямой перекачке по системе водоводов минуя накопитель) способна привести к изменению геотермического режима горных пород, и локальному изменению (деградации) криогенной толщи. Дополнительным негативным фактором при эксплуатации участков второй группы выступает отмечаемая многими отечественными и зарубежными учеными геокриологами (Алексеев, Великин, Егоров, Железняк, Семенов, Шепелев и др.) последние 50 лет тенденция общего потепления климата и связанный с ним рост глубины сезонного оттаивания грунтов.

Т.к. техногенная нагрузка на криолитозону при выборе рассматриваемого метода обращения с дренажными водами приводит к трансформации геотермического режима горных пород, участки второй группы требуют более тщательного термометрического контроля для минимизации негативного техногенного воздействия на криогенную толщу, в случае безальтернативности использования.

Положительным моментом является локализация негативного воздействия на расстоянии 3–4 км от закачных скважин изменений геотермического режима по наблюдательным скважинам не выявлено, т.к. для более значимого площадного влияния требуется интенсификация процесса закачки (это характерно для участков 4 группы).

По причине отсутствия льдистой фазы в интервале метегеро-ичерского водоносного комплекса дополнительного вовлечения вод криолитозоны в процесс закачки не происходит. В закачку вовлекаются только технологические воды рудника, не превышающие 20% от суммарного объема закачиваемых вод.

### 7.3 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков третьей группы

Участками третьей группы, являются Киенгский (рис. 5.10), Левобережный (рис. 5.12), Левобережный-2 (рис. 5.13) и Октябрьский. Данные участки расположены в пределах Далдынского кимберлитового поля. Для закачки дренажных вод трубки Удачная на данных участках используются породы второго яруса криогенной толщи. Режимная сеть рассматриваемых участков состоит из более 150 скважин.

В пределах осадочного чехла выделяется несколько водоносных комплексов, подробно описанных ранее в гл. 2. Залегание подмерзлотных коллекторов региональных водоносных комплексов, потенциально пригодных для организации закачки дренажных вод трубки Удачная на глубине свыше 1200 м от дневной поверхности, определили тип используемых коллекторов [406; 409].

После проведенного комплекса исследований, выполненных коллективом авторов ИМЗ СО РАН и ИЗК СО РАН, была обоснована принципиальная возможность использование второго яруса криогенной толщи для организации закачки. Первый участок, отработанный по этому принципу и находящийся сейчас на стадии рекультивации, это участок Октябрьский [260]. На настоящее время во втором ярусе криолитозоны было размещено свыше 45 млн. м<sup>3</sup> дренажных вод: 10,6 млн. м<sup>3</sup> в участок «Октябрьский»; 13,0 млн. м<sup>3</sup> в участок «Киенгский»; 21,0 млн. м<sup>3</sup> в участок «Левобережный» и 0,4 млн. м<sup>3</sup> в участок «Левобережный-2». Параметры эксплуатации участков, а также процент использования полезной ёмкости приведён в таблице 7.6. Прогнозный объём участков (полезная ёмкость в пределах участка) определён ранее [406; 409] и приведён в гл. 5-6.

Таблица 7.6 – Параметры эксплуатации участков закачки [423]

Название участка	Объём закачанных рассолов, м <sup>3</sup>	Прогнозный полезный объём, м <sup>3</sup>	% заполнения	Период закачки, гг.	Интервал формирования техногенного водоносного горизонта, м
Далдынское кимберлитовое поле					
Октябрьский	10 600 000	10 600 000	100	1985–2001	150–270
Киенгский	13 000 000	15 500 000	84	2001–2013	214–273
Левобережный	21 000 000	25 000 000	84	2012–2023	180–295
Левобережный-2	400 000	17 000 000	2	2021–2023	148–267

Характеристика динамики изменений геотермического режима при эксплуатации участков третьей группы была выполнена по двум уникальным объектам – участкам Киенгский и Левобережный. Уникальность данных участков обусловлена рядом фактов:

– оба участка интенсивно эксплуатировались на протяжении длительного периода времени, в результате полезная емкость была использована более чем на 80%;

– закачка большого объема дренажных рассолов, в пределах ограниченной площади привела к формированию в зонах динамического воздействия региональных разрывных нарушений зон вертикальной фильтрации, со значительными расходами перетекания в ниже залегающий подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс: для участка Киенгский порядка  $490 \text{ м}^3/\text{сут}$ ; для участка Левобережный –  $4570 \text{ м}^3/\text{сут}$ , сформировав новые природно-техногенные геосистемы, позволяющие рассматривать закачку во второй ярус криолитозоны именно как способ обращения с дренажными водами, а не изоляции (как считалось ранее);

– по причине интенсивности эксплуатации оба участка прошли все стадии формирования техногенных водоносных горизонтов в «форсированном режиме» с максимальной техногенной нагрузкой на криолитозону, что позволяет оценить степень воздействия процесса закачки на геологическую среду.

Необходимо отметить, что перед началом эксплуатации температура пород в пределах участков Киенгский и Левобережный была типична для территории исследований и составляла от  $-1$  до  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Перед началом работ по закачке дренажных вод в экологически безопасные интервалы ММП сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН были проведены исследования для фиксации естественного геотермического фона на участке Киенгский, который показал, что температура горных пород изменяется от  $-0,93$  до  $-3,9 \text{ }^\circ\text{C}$  [139; 207]. Режимные наблюдения, проведенные в период с 2002 по 2012 гг., показали, что температура горных пород в интервалах поглощений за время эксплуатации участка изменилась от  $-2,28$  до  $-5,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Таким образом проведенным циклом наблюдений установлено, что на уровне рассолопоглощающих интервалов толщи ММП произошло общее снижение температур горных пород на  $1,5\text{--}2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 7.7). Это связано, главным образом, с направлением миграции закачиваемых рассолов в криогенных толщах пород, а также с характером теплопереноса на участке закачке. Дополнительным фактором понижения температуры интервалов поглощения, по всей видимости, также выступил существующий отрицательный температурный баланс атмосферного воздуха в районе, т.к. за счёт закачных и наблюдательных скважин происходил конвективный тепло- и массоперенос атмосферного воздуха [205; 207; 409]. При анализе результатов, полученных в 2012-2020 гг., можно отметить тенденцию к выравниваю температур по большинству скважин и постепенной стабилизации в районе от  $-2$  до  $-4^\circ\text{C}$  [409].

Для выявления тенденций по изменению геотермического режима участка Левобережный был выполнен сопоставительный анализ изменения температур по скважинам на начало эксплуатации и по состоянию на конец 2022 года. Режимные геотермические наблюдения в пределах участка позволили выявить характер трансформации температурного режима, связанной с закачкой дренажных рассолов. По сводным графикам скважин закачного ряда

отчетливо можно отметить незначительное изменение температуры. В период начала закачки температура была от -2,5 до -5 °С, к 2022 году температура уменьшилась до -1,5 °С. По наблюдательным скважинам, расположенным на удалении от закачного ряда, замеренные изменения составляют от -1 до -2,1 °С. По результатам замеров фиксируется устойчивое температурное поле со значением от -2,5 до -5,4 °С (табл. 7.7) [409].

Таблица 7.7 - Сравнительный анализ изменения температуры по стволу закачных скважин и наблюдательных скважин участков Киенгский и Левобережный [423]

Глубина, м	участок Киенгский						участок Левобережный			
	закачные скважины (температура по стволу скважины), °С			наблюдательные скважины (температура по стволу скважины), °С			закачные скважины (температура по стволу скважины), °С		наблюдательны е скважины (температура по стволу скважины), °С	
	2003 г	2012 г	2022 г	2003 г	2012 г	2022 г	2012 г	2022 г	2012 г	2022 г
100	-1,6	-2,8	-1,95	-1,5	-2,9	-2,2	-2,5	-3	-1,9	-2,5
110	-1,8	-2,7	-2,2	-2,17	-3,4	-2,8	-2,5	-3	-2,2	-3,2
120	-2	-2,66	-2,4	-2,6	-3,55	-3	-2,5	-3	-2,8	-3,6
130	-2,05	-2,66	-2,4	-3,1	-3,62	-3,4	-2,6	-3,1	-3,1	-4,1
140	-2,12	-2,66	-2,5	-3,3	-3,64	-3,44	-2,65	-3,4	-3,3	-5,1
150	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,1	-3,4	-5,5
160	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-2,7	-3,5	-3,8	-5,6
170	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-3,3	-3,9	-4,8
180	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,2	-4,6	-4	-4,8
190	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-3,8	-4,7	-4,4	-4,9
200	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,1	-4,75	-4,9	-5,3
210	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-4,9	-4,9	-5,3
220	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,9	-5,4
230	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,6	-6	-4,3	-5,4
240	-2,2	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,7	-5,6	-4,3	-5,4
250	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,8	-5,6	-4,3	-5,3
260	-2,3	-2,66	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5,4	-4	-5,2
270	-2,38	-2,65	-2,52	-3,3	-3,64	-3,44	-4,5	-5	-4	-5,2

Полученные результаты позволяют говорить о влиянии процесса закачки на геотермический режим второго яруса криогенной толщи. Объёмы закачки позволяют сформировать выдержанные аномалии значительной площади, сопоставимые с площадью участков (35 км<sup>2</sup> – участок Киенгский; 50 км<sup>2</sup> – участок Левобережный), т.к. продолжительность и интенсивность воздействия уже не компенсируются инертностью процессов криолитозоны (таблица 7.7).

Наблюдаемый процесс уменьшения температуры, связан с режимом эксплуатации участков. Дренажные воды, собираемые в руднике, транспортируются по магистральным трубопроводам, на расстояния до 20 км. Как отмечалось ранее (гл. 2) в пределах Далдынского кимберлитового поля доминируют отрицательные температуры окружающего воздуха:

среднегодовая температура воздуха за многолетний период составляет  $-9,5^{\circ}\text{C}$ ; среднемесячная температура воздуха самого холодного месяца - января, составляет  $-30,6^{\circ}\text{C}$ , что, в свою очередь, приводит к понижению температуры закачиваемых вод до  $-8/-10^{\circ}\text{C}$  (в отдельные месяцы температура может опускаться до  $-15^{\circ}\text{C}$ ), высокая минерализация до 300-350 г/литр препятствует их замерзанию и позволяет производить закачку.

По той причине, что дренажные рассолы месторождений Далдынского кимберлитового поля имеют среднегодовую минерализацию порядка 300-350 г/л, объёмы провзаимодействовавших вод криолитозоны составляют не менее пяти объёмов закачанных дренажных рассолов [406; 409]. С учётом выполненного гидродинамического моделирования можно говорить о том, что эксплуатация участков Далдынского кимберлитового поля (Октябрьский, Киенгский, Левобережный и Левобережный-2) уже привела или приведёт в будущем к формированию в пределах второго яруса криогенной толщи техногенных водоносных горизонтов площадью в несколько десятков квадратных километров (прил. 22). Прогнозные параметры, а также распределение пьезометрических уровней, при соблюдении утверждённого режима эксплуатации на всем «жизненном цикле» (до 2050-2070 гг.) рассмотрены в главе 6.

Наземные геофизические работы, выполненные методами ЗМПП и электротомографии (гл. 2), подтверждают наличие в пределах участков как сформированных техногенных водоносных горизонтов, так и вертикальных зон массопереноса, фиксирующихся в виде контрастных аномалий [102, 406; 409]. Как правило по результатам съёмки подтверждается, что верхняя часть разреза представлена сильно трещиноватыми (трещины заполнены льдом) отложениями онхойюряхской свиты мощностью до 60 м, с удельным электрическим сопротивлением 100-1000 Ом·м. Ниже по разрезу залегают трещиноватые карбонатные породы средне-, ниже-моркокинской свиты с удельным электрическим сопротивлением 1000-5000 Ом·м. Третий геоэлектрический слой характеризуется низким электрическим сопротивлением и соответствует мархинской свите верхнего кембрия [409]. Выполняемые исследования за миграцией рассолов производятся с использованием метода ЗМПП, что позволили отслеживать в пространстве интервалы повышенной электропроводимости пород. Глубина изучения контролируется интервалами распространения первого подмерзлотного верхнекембрийского комплекса. По данным наземных геофизических исследований распространение дренажных рассолов в толще ММП по участкам третьей группы происходит в СВ, ЮВ и ЮЗ направлениях, что согласуется с разломно-блоковым строением участков.

Отдельно необходимо отметить, что проведенный автором комплекс работ, не только подтвердил высказанные ранее [35; 36; 37] перспективы использования второго яруса криогенной толщи, но и позволил выявить наиболее перспективные площади для строительства участков закачки [406; 409], несмотря на уже достаточно большой объём закачанных рассолов>

45 млн. м<sup>3</sup>. В результате анализа геокриологических, криогидрогеологических, литолого-фациальных и структурно-геологических условий изучаемой территории, с учетом выделенных поисковых признаков автором была составлена прогнозная карта участков, перспективных для изучения и дальнейшей опытной эксплуатации [406; 408; 409], с оценкой полезных объемов как существующих, так и предлагаемых участков (рис. 7.3).

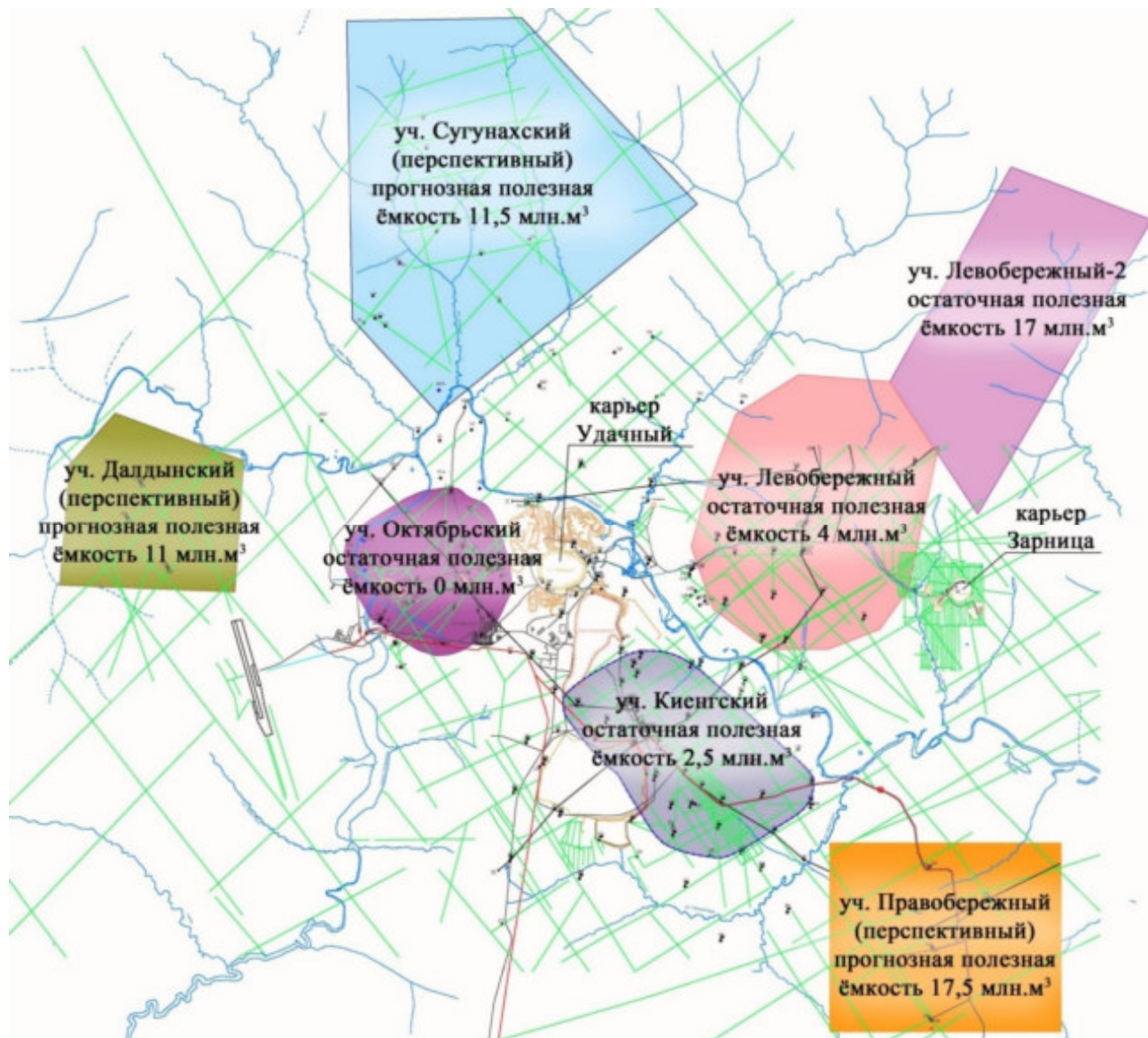


Рис. 7.3. Ситуационный план расположения существующих участков закачки и перспективных площадей Далдынского кимберлитового поля (сост. Янников А.М.)

Как видно из рис. 7.3, на территории исследования выделены участки: *Далдынский* (прогнозная полезная емкость 11 млн м<sup>3</sup>), *Правобережный* (прогнозная полезная емкость 17,5 млн м<sup>3</sup>) и *Сугунахский* (прогнозная полезная емкость 11,5 млн м<sup>3</sup>).

Участок Далдынский расположен западнее участка Октябрьский на расстоянии, исключающем взаимное гидравлическое влияние, приурочен к зоне Октябрьского разлома, который подтвержден как рассолопоглощающая структура на участках Октябрьский и

Киенгский. По геофизическим, структурным, газодинамическим, гидрогеологическим и температурным критериям выбранный участок является аналогом участка Октябрьский. По геоморфологическому критерию территория располагается на водоразделе, без врезанных водотоков в центральной части. Участок Правобережный по всем выделенным критериям является аналогом участка Киенгский. Он так же приурочен к зоне Октябрьского разлома, который проходит через его осевую часть. Участок Сугунахский приурочен к зоне более мелких региональных и кимберлитконтролирующих разломов. Отличительной особенностью является его приуроченность в осевой части к Сугунахской кольцевой тектонической структуре сбросового типа, характеризующейся увеличенной мощностью первого и второго яруса криогенной толщи [409].

Учитывая описанный ранее принцип продвижения закачиваемых рассолов в породах второго яруса криолитозоны, а также результаты режимных наблюдений, ставших основой для прогнозного гидродинамического моделирования (гл. 6), можно с уверенностью констатировать, что эксплуатация участков Октябрьский, Киенгский и Левобережный привела к вовлечению в процесс формирования техногенных водоносных горизонтов существенных объёмов вод криогенной толщи. Подтверждением данного факта служит существенное уменьшение минерализации вод (с 300–350 г/литр до 40–60 г/литр), фиксируемое при опробовании наблюдательных скважин. Химический состав вод, отобранных из скважин периферийных частей участка Киенгский, характеризуется как хлоридный магниево-кальциевый. Формула солевого состава вод:

- западная часть участка:

$$M_{42} \frac{Cl\ 99\ SO_4\ 1}{Ca\ 50\ Mg\ 29\ (Na + K)\ 21} \text{ рН } 4,8$$

- северная часть участка:

$$M_{88} \frac{Cl\ 99\ SO_4\ 1}{Ca\ 52\ Mg\ 29\ (Na + K)\ 19} \text{ рН } 5,0$$

- восточная часть участка:

$$M_{44} \frac{Cl\ 98\ SO_4\ 2}{Ca\ 54\ Mg\ 32\ (Na + K)\ 14} \text{ рН } 5,3$$

- южная часть участка:

$$M_{53} \frac{Cl\ 99\ SO_4\ 1}{Ca\ 52\ Mg\ 28\ (Na + K)\ 20} \text{ рН } 5,0$$

Опробование скважин участка Левобережный указывает на меньшее разбавление закачанных вод (в 3 раза):

- скважины, удаленные от закачных на расстояние до 1000 метров:

$$M_{141} \frac{Cl\ 99\ SO_4\ 1}{Ca\ 50\ Mg\ 28\ (Na + K)\ 22} \text{ рН } 5,3$$

- скважины в периферийных частях участка:

$$M_{106} \frac{Cl\ 99\ SO_4\ 1}{Ca\ 45\ Mg\ 34\ (Na + K)\ 21} \text{ рН } 4,9$$

Прогнозный объём вод криолитозоны вовлечённый в процесс формирования природно-техногенных геосистем: техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природным подмерзлотным верхнекембрийским водоносным комплексом, составит: – для участка Октябрьский от 40,0 до 45,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Киенгский от 65,0 до 70,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Левобережный от 85,0 до 100,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Левобережный-2 от 75,0 до 85,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Правобережный (в случае строительства и эксплуатации) от 70,0 до 80,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Далдынский (в случае строительства и эксплуатации) от 45,0 до 55,0 млн. м<sup>3</sup>; – для участка Сугунахский (в случае строительства и эксплуатации) от 55,0 до 65,0 млн. м<sup>3</sup>.

Площади формирующихся во втором ярусе криолитозоны в пределах Далдынского кимберлитового поля природно-техногенных систем участков Киенгский и Левобережный, как было отмечено ранее (гл. 5 и 6), составят порядка 85–90 км<sup>2</sup> и могут быть охарактеризованы как локальные. Однако дальнейшее развитие системы закачки рудника Удачный с использованием дополнительных участков: Левобережный-2, Далдынский, Правобережный и Сугунахский увеличит их суммарную площадь до 250 км<sup>2</sup>, что позволит отнести данное воздействие к региональному, т.е. ВВК получит область обеспеченного питания, связанного с формированием техногенных водоносных горизонтов в пределах участков закачки с суммарным объёмом, с учётом вовлечённых вод криолитозоны до 500 млн м<sup>3</sup> (0,5 км<sup>3</sup>). Этот процесс компенсирует сформировавшуюся в интервале верхнекембрийского комплекса депрессионную воронку, уменьшив её радиус и приведёт к росту притоков (до 30–40%) к карьерам трубок Зарница и Удачная, однако учитывая невысокие параметры водопродимости коллекторов данного водоносного комплекса в абсолютных цифрах суммарные притоки будут составлять до 80 м<sup>3</sup>/сут (0,2% от суммарного прогнозного притока к месторождениям Далдынского кимберлитового поля, формирующегося в результате дренажа верхнекембрийского, среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов).

#### **7.4 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков четвертой группы**

Участки четвертой группы территориально приурочены к Мирнинскому кимберлитовому полю и сопряжены с отработкой месторождения трубки Мир. Участки Тымтайдахский (рис. 5.19) и Южный (рис. 5.20) расположены в зоне динамического воздействия регионального Восточного

разлома, и для закачки дренажных вод трубки Мир используют охлаждённые породы третьего яруса криолитозоны. С учётом того, что процесс интенсивной закачки дренажных вод трубки Мир привёл к региональному воздействию на криолитозону, будет произведена комплексная характеристика, с учётом данных, полученных при проведении термометрии по режимной сети скважин. Режимная сеть рассматриваемых участков состоит из более 70 скважин.

Для прослеживания динамики изменения температуры во времени под влиянием закачки 340 млн. м<sup>3</sup> дренажных вод в метегеро-ичерский водоносный комплекс, температурные замеры проводились по скважинам режимной сети как района, так и участков закачки. Сравнение выполнялось за весь период наблюдений 1986–2017 гг. Для анализа были применены данные фондовых отчётов как структурных подразделений АК АЛРОСА (Ботуобинской ГРЭ, Мирнинской ГРЭ, Института Якутнипроалмаз [Иост, Лобанов, Дроздов, Скворцова, Янников и др.]), так и подрядных организаций (ИМЗ СО РАН, ИЗК СО РАН (Алексеев, Готовцев, Шепелев и др.)).

Рассматриваемый период был выбран по причине наиболее интенсивной эксплуатации системы обратной закачки рудника Мир. Причём в период 2014–2017 гг. была изменена схема закачки, были установлены углубленные водоприемные части насосов, осуществляющие забор воды из накопителя минерализованных вод с глубин, на которых рассолы, по результатам изысканий, проведённых лично автором, имеют круглогодичную отрицательную температуру, что в свою очередь привело к круглогодичной закачке рассолов со среднегодовой температурой -5°C. Геотермический режим накопителя будет рассмотрен в рамках представленной главы.

Характеристические осреднённые кривые изменения температуры по стволам наблюдательных скважин приведены в приложении 23. В результате проведенного анализа фиксируются изменения геотермического режима:

– в скважинах региональной режимной сети, удаленных от эпицентра закачки на 15 и более км отмечается снижение температур, составляющее от -0,5 до -2 °С (прил. 23).

– по скважинам, расположенным непосредственно в эпицентре закачки также фиксируется уменьшение температуры, составляющее до -3 °С (прил. 23).

- по скважинам, расположенных в зоне динамического воздействия Восточного разлома на 3-5 км севернее участков закачки, и скважинам, расположенным в межразломном блоке также отмечено понижение температуры от - 1,5 до -2,3 °С (прил. 23).

Фиксируемые изменения геотермического режима (период 2014–2017 гг.) связаны, прежде всего, с применяемым способом обращения и закачки дренажных вод. Отличительной особенностью является использование накопителя минерализованных вод, который по результатам выполненных автором исследований, характеризуется сложным термодинамическим режимом [393; 471]. Эксплуатация накопителя дренажных вод рудника

«Мир» производится с 1983 года. Накопитель был построен в верховьях ручья Тымтайдах с объёмом до 16 млн м<sup>3</sup>. Изначально целью данного гидротехнического сооружения являлось обеспечение регулируемого сезонного сброса рассолов из карьера трубки «Мир». И до 1988 года производился сброс рассолов из накопителя в период весеннего паводка, (сброс осуществлялся по ручью Тымтайдах, с попаданием рассолов в реку Малая Ботуобия, и далее в реку Вилюй). В настоящее время накопитель используется как регулирующая ёмкость в системе обратной закачки рудника «Мир». Накопитель расположен в долине ручья Тымтайдах, с абсолютными отметками +290... +320 м. Площадь водного зеркала более 1,5 км<sup>2</sup> (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Накопитель минерализованных вод на руч. Тымтайдах<sup>32</sup>

Основной водоприток в накопитель поступает из рудника Мир и формируется за счёт дренажных, шахтных вод и частично атмосферных осадков. Например, в 2014 году средний суммарный дебит карьерного и шахтного водоотлива составил 1207 м<sup>3</sup>/ч, (в основном это рассолы подмерзлотного метегеро-ичерского водоносного комплекса). Помимо рудничных вод в накопитель поступают сезонно-паводковые воды и атмосферные осадки [56].

Для изучения термодинамического режима накопителя, было проведено площадное исследование. Отбор проб и термометрия в пяти точках (рис. 7.5). Определение температуры вод производилось при помощи термоманометров АМТ-10С и АМТ-10Л. Во время летнего этапа исследований было принято решение о небольшом смещении точек наблюдений (рис. 7.5). Такое

<sup>32</sup> Иост Н.А. Отчет по комплексному анализу работы системы обратной закачки дренажных вод карьера Мир за период 1990-2014 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

решение было обусловлено тем, что во время апрельских исследований 2013 года не была достигнута максимальная глубина накопителя (максимальная глубина в точках наблюдения составляла 13 метров). Поэтому для детального изучения придонных слоёв точки наблюдения были перенесены с учётом асимметричности долины ручья, количество точек было решено оставить таким же, и присвоить им нумерацию 1', 2', 3', 4', 5'. В дальнейшем опробование проводилось этой точкой в марте и августе 2014 года, а также в 2015 году.

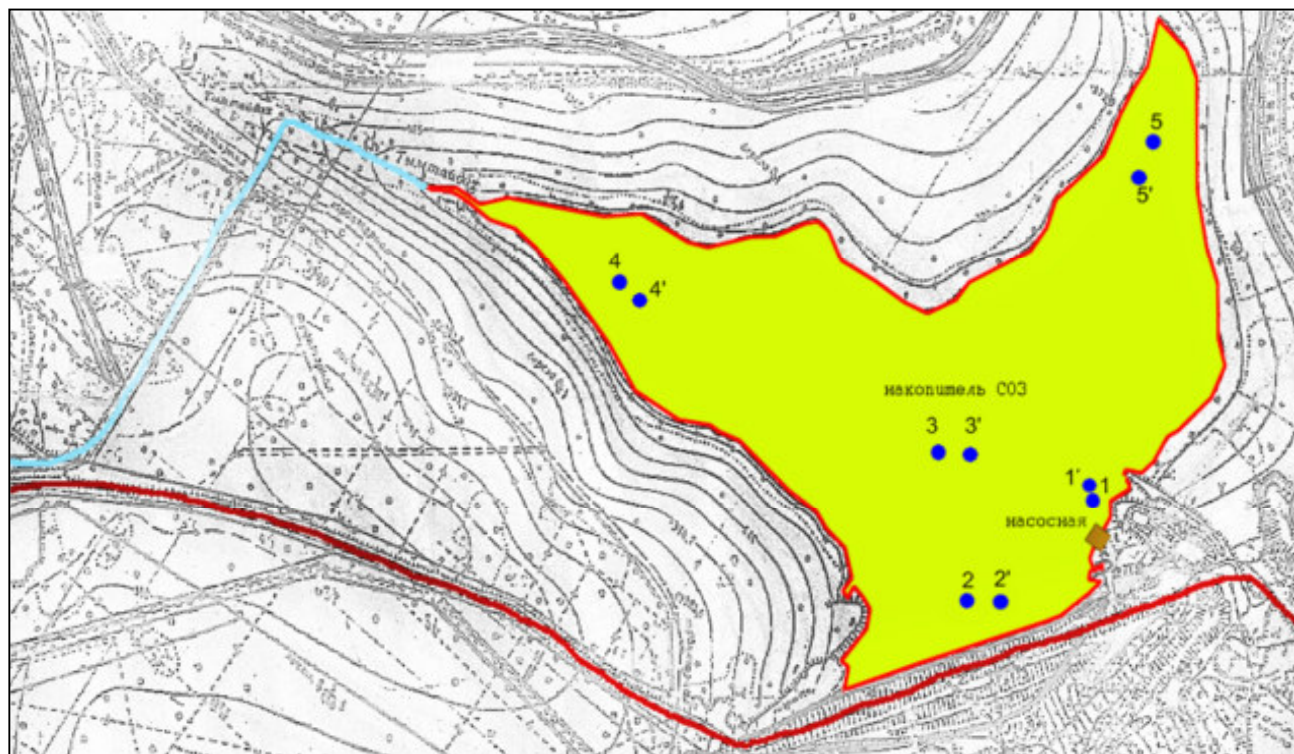


Рис. 7.5. Схема опробования накопителя в 2013-2015 гг (сост. Янников А.М.)

Анализ полученных данных термометрии и опробования показал, что ситуация в каждом сезонном периоде отличается, что повлекло за собой отдельное рассмотрение этапов исследования. По результатам апрельских опробований были составлены профили накопителя по точкам наблюдения. После построения изомин и изотерм, на фоне кажущейся однородности состава рассолов были выявлены площадные и глубинные зоны, отличающиеся друг от друга термо-физико-химическими показателями. Главным отличием зимнего этапа исследований, являлось почти полное отсутствие воздействия атмосферных осадков на химический состав вод, т.к. поверхность накопителя была покрыта достаточно мощным слоем льда. Поэтому в накопителе сформировался следующий термодинамический режим: термодинамически активная зона невелика и её влияние прослеживается до глубины 5 метров, движение рассолов в этой зоне преимущественно линейное (от сточной канавы к насосной станции), но из-за низких скоростей движения даже в этой зоне формируются застойные участки (т.н.3). Центрами возмущений в этой зоне являются зона поступления рудничных вод (т.н. 4) и зона отбора вод насосной станцией (т.н.

1), но объём поступающих рассолов и дебит насосов не позволяет создать проточный режим в накопителе. Это обуславливает формирование в центральной части накопителя (т. н. участок 3) застойной зоны радиусом около 200 м. Характеристической особенностью этой зоны является формирование линзы рассолов с повышенной минерализацией —  $124,3 \text{ г/дм}^3$  (апрель 2013 г.), тогда как фоновые значения данной зоны колеблются в пределах  $118,2\text{--}118,3 \text{ г/дм}^3$ . Это связано с тем, что при кристаллизации вышележащих рассолов происходило выпадение солей с их последующим растворением нижележащими слоями. Влияние этой подлёдной зоны прослеживается до глубины 1,5–2 м. Ниже 5 метров располагается спокойная зона, относительно застойных вод, т.к. в этом интервале (ниже 5 метров) располагаются рассолы, которые из-за характеристических значений температуры ( $-7,7^\circ\text{C}$  –  $-8,3^\circ\text{C}$ ) и минерализации ( $118 - 122 \text{ г/дм}^3$ ) обладают максимальными значениями плотности. Основным типом движения вод в данной зоне является конвективное перемешивание, связанное, прежде всего с удельным весом поступающих рассолов (охлаждаясь, рассолы перемещаются в придонные слои). Данная зона практически однородна по всей площади накопителя, только в т.н. 2 в интервале 12,3–13,7 м и в т.н. 1 в интервале 4,5–5,6 м есть маломощные зоны, характеризующиеся минерализацией, отличной от остального массива. Это изменение связано с фильтрацией рассолов через тело плотины и их возвратом от дренажной насосной станции, расположенной в нижнем бьефе плотины накопителя. Так как площадное распространение этой зоны приурочено непосредственно к плотине накопителя, при удалении от неё на расстояние более 100 м влияние постепенно нивелируется. Отобранные пробы льда, подтвердили предположение, что он не успевает опресниться в течение зимы. Минерализация проб варьировала в пределах  $22\text{--}57 \text{ г/дм}^3$ , (максимальные значения были достигнуты в точках наблюдения 1 и 5). Причинами такой высокой минерализации являются высокая солёность вод накопителя и низкие зимние температуры.

Главным отличием летнего этапа изучения явилось отсутствие ледяного покрова и как следствие, существенно возросшее влияние внешних погодных факторов, (выпадение атмосферных осадков, испарение с поверхности накопителя и т.д.). Это воздействие сдвинуло границу термодинамически активной зоны, теперь её активное влияние прослеживалось до глубины 6–7 м. Стоит отметить что и по профилям, лежащим ниже отметки 7 м наблюдается повышение температуры на  $1,0\text{--}2,0^\circ\text{C}$  в сравнении со средними данными зимнего этапа опробования. Основным фактором, изменившим границу между зонами, было воздействие положительных температур. Произошёл значительный прогрев вод в накопителе, верхние слои прогреваются от  $-7^\circ\text{C}$  ( $-7,9^\circ\text{C}$ ) до  $+17^\circ\text{C}$  ( $+20^\circ\text{C}$ ). Мощность вод, прогретых до положительной температуры, на момент проведения исследований достигла 6 метров.

Поступление пресной воды в виде атмосферных осадков и опреснённых вод во время таяния льда повлекло за собой незначительное уменьшение минерализации вод в накопителе, из-за наличия конвективного термо-массопереноса изменение минерализации затронуло даже придонные слои вод. Движение вод в термодинамически активной зоне осталось линейным (от сточной канавы к насосной станции). Дебит отбора вод, также, как и в зимний период опробований, не позволяет создать полностью проточный режим. В результате, в центре накопителя, в т.н. 3' сохранилась застойная зона, радиусом 200 – 250 м, которая оконтуривается повышенными, по сравнению с фоновыми, значениями температуры и минерализации, (влияние этой приповерхностной зоны прослеживается до глубины 3 – 3,5 м). Ниже 7 метров располагается термодинамически спокойная зона, относительно застойных вод. Данная зона, в отличие от приповерхностной, не подверглась столь существенным изменениям. Основное движение вод здесь, по-прежнему, осуществлялось в вертикальной плоскости, но из-за усилившегося внешнего воздействия конвективное перемешивание ускорилось. Это привело к незначительному повышению температуры (с  $-7,9$  °С до  $-6,3$  °С) и незначительному понижению минерализации (с  $121-122$  г/дм<sup>3</sup> до  $117-118$  г/дм<sup>3</sup>). Состав вод в данной зоне в целом характеризуется как однородный. Разрезы по профилям приведены в приложении 24. Изотермы и изомины отражены также в приложении 24.

Исходя из представленной информации можно сделать вывод, что закачка дренажных вод, осуществляемая в зоне динамического влияния Восточного разлома в период 1989-2023 гг, осуществляемая через поверхностный накопитель большой емкости, привела к уменьшению температуры по стволам скважин на достаточно большие величины от  $-0,5$  до  $-3$  °С. Данный процесс обусловлен тем, что рассолы, забираемые насосами из накопителя минерализованных вод (с всамами, погружёнными на глубину 3–6 м), закачиваются круглогодично при температуре от  $-1$  до  $-7$  °С. Объёмы закачанных вод уже превысили 340 млн. м<sup>3</sup>. Зафиксированные изменения температуры в настоящее время, из-за относительной кратковременности воздействия, а также отсутствия высокопроницаемых пород в чарской свите, относятся только к интервалу метегерской и ичерской свит, и не повлияли на глубину залегания нулевой изотермы. Наблюдаемые температуры позволяют отнести породы в пределах изучаемой территории к третьему ярусу криолитозоны [406; 409].

Отдельно необходимо отметить, что с 2036 г. будет изменен режим закачки, он возрастёт в объёмных значениях в 2 раза, что потребует вовлечения в процесс закачки зоны динамического воздействия Аппаинского разлома, увеличив прогнозную площадь техногенного воздействия до 1200 км<sup>2</sup> (гл. 6).

По причине отсутствия льдистой фазы в интервале метегеро-ичерского водоносного комплекса дополнительного вовлечения вод криолитозоны в процесс закачки не происходит. В

закачку вовлекаются технологические воды рудника и дебалансные воды, выпадающие на поверхность накопителя, не превышающие 10% от объёма закачиваемых вод. Техногенная нагрузка на криолитозону при выборе рассматриваемого метода обращения с дренажными водами сводится к трансформации геотермического режима, и требует более тщательного контроля для его минимизации.

### 7.5 Динамика изменений геотермического режима в пределах участков пятой группы

Участки пятой группы являются Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный (рис. 5.15-5.16). Данные участки расположены в пределах Далдынского кимберлитового поля и для закачки дренажных вод трубки Удачная используют коллектора подмерзлотного нижнекембрийского водоносного комплекса, залегающие ниже нулевой изотермы, и не входящие в состав криолитозоны. Температура пород кумахской и эмяксинской свит составляет от +2 до +4 °С (рис. 7.6).

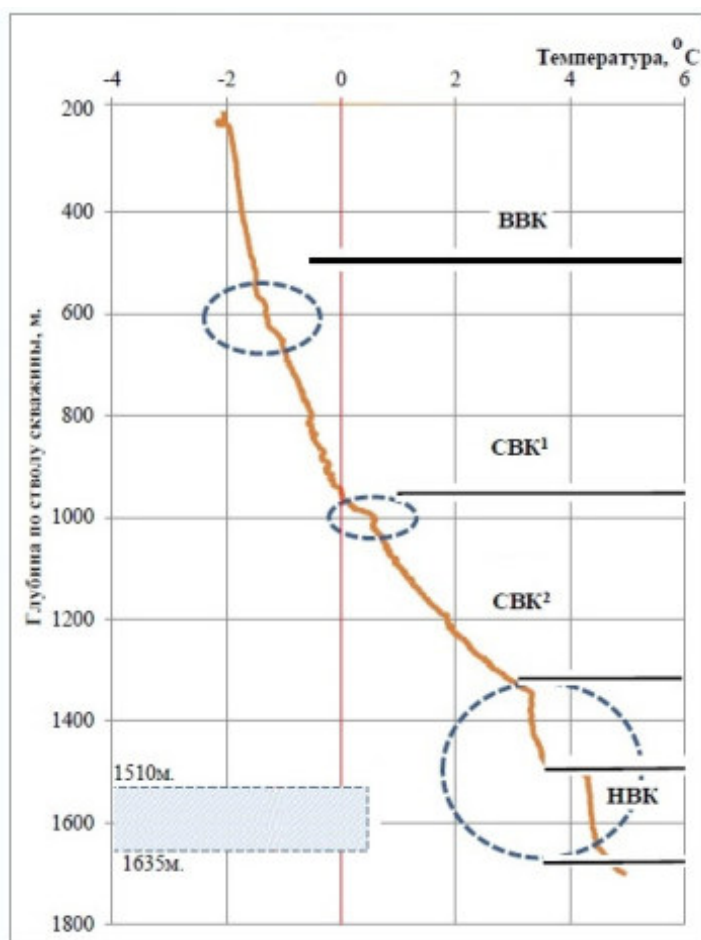


Рис. 7.6. Температура в скважинах участков Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный (по состоянию на 2022 г.) (сост. Янников А.М.)

Закачанные в настоящее время объёмы дренажных вод не столь значительны (менее 4 млн. м<sup>3</sup>), чтобы привести к существенной трансформации геотермического режима целевого интервала. Однако накопленный опыт эксплуатации участков закачки, а также степень уже

зафиксированного воздействия, представленный в работе ранее, позволяют выполнить прогноз изменения температур по стволам скважин, с учётом прогнозного изменения притоков к подземным горным выработкам рудника Удачный, т.к. эксплуатация участка данного типа планируется на всём «жизненном цикле» отработки месторождения (т.е. практически до конца текущего столетия). Влияние процесса закачки на изменение нижней границы криогенной толщи будет связано с режимом эксплуатации. В настоящее время предполагается два альтернативных способа:

– Способ №1 строительство накопителя минерализованных вод, объёмом порядка 10 млн. м<sup>3</sup>, с применением полимерной гидроизоляции ложа. Строительство накопителя рассматривается как вынужденная мера, т.к. в дренажных рассолах рудника Удачный присутствует тонкодисперсная менее 0,001 мм полиминеральная (преимущественно карбонатная) взвесь, в количестве до 8 г/литр. Данный факт приводит к попутному размещению в коллекторах нижнекембрийского водоносного комплекса материала пелитовой размерности в значительных объёмах: в настоящее время вместе с 3,5 млн. м<sup>3</sup> дренажных вод попутно закачано 11 тыс. м<sup>3</sup> тонкодисперсных взвесей. Этот процесс приводит к постепенной кольматации закачных скважин и уменьшению их производительности. Строительство накопителя позволит осаждать данные взвеси и производить закачку чистых рассолов (как на месторождениях Мирнинского кимберлитового поля).

– Способ №2 закачка всего объёма дренажных вод будет осуществляться с применением имеющейся инфраструктуры, без применения буферных накопителей, с отстаиванием и обесшламливанием вод в водосборниках рудника и в распределительных ёмкостях.

Выполним прогноз, в зависимости от реализованного способа обращения с дренажными водами.

#### *Способ №1 – осаждение взвесей в накопителе минерализованных вод*

При условии строительства накопителя минерализованных вод, в течение четырёх лет произойдёт его заполнение и формированием термодинамического режима схожего с описанным ранее для накопителя Тымтайдах.

Для физического моделирования охлаждения пород от фильтрующихся вод был смоделирован перенос тепла и охлаждение пород за счёт поступления в массив рассолов и их движения по субвертикальной трещине со скоростью 100 м/сут (рис. 7.7).

Указанная скорость (100 м/сут) была выбрана исходя из проведенного моделирования процесса распределения закачиваемых вод в коллекторах нижнекембрийского водоносного комплекса и может быть принята в радиусе до 1 км от закачного ряда скважин, а также анализа горно-геологического строения участка и предполагаемых гидрогеологических характеристик.

Из-за отсутствия полного перечня информации по породам непосредственно на участке исследований, расчёты были проведены с необходимыми допущениями и использованием объекта-аналога.

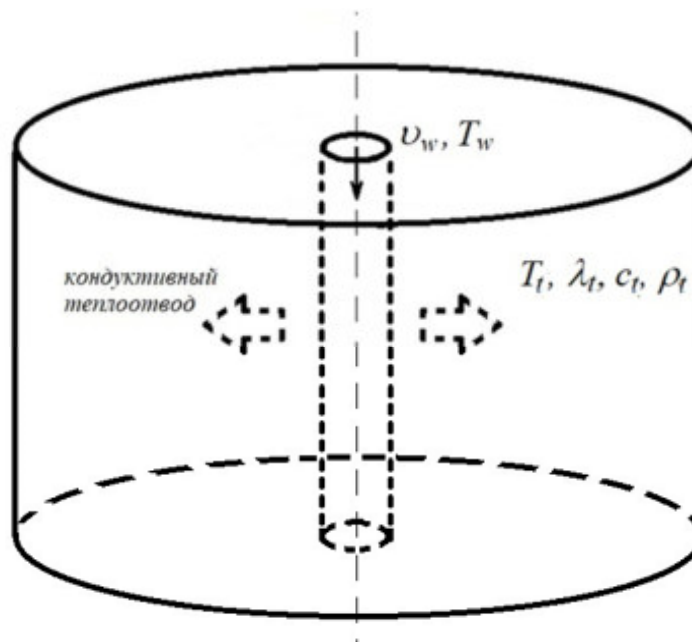


Рис. 7.7. Физическая модель охлаждения от трещины, по которой осуществляется фильтрация воды через массив породы (сост. Янников А.М.)

Несмотря на это, полученные параметры позволяют выполнить качественную и количественную оценку происходящих процессов. Физико-математическое моделирование было выполнено в нескольких постановках на различные временные периоды.

В качестве начальных характеристик применяем допущения, что массив водонасыщенных терригенно-карбонатных пород характеризуется постоянной и неизменяющейся температурой во всем объеме в течение всего года и равной  $T_t = +4$  °С. Усреднённые теплофизические характеристики массива приведены в таблице 7.8.

Таблица 7.8 – Усреднённые теплофизические характеристики талого массива (сост. Янников А.М.)

Параметры						
$\lambda$ , ккал/м/ч/град	$\lambda_t$ Вт/м/К	$C$ , ккал/(м <sup>3</sup> *град)	$c_t = C / \rho_t$ , Дж/кг/К	$\rho_t$ , г/см <sup>3</sup>	$\mu$ , м <sup>2</sup>	$T$ среды, °С
1,81	2,10	569	972	2,45	1e-12	+4

Субвертикальная трещина моделируется, как вертикальный канал с гладкими стенками (средняя эффективная мощность коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса). По трещине происходит фильтрация воды со скоростью  $v_w = 100$  м/сутки. В течение года скорость фильтрации также остаётся неизменной. Температура воды в зоне фильтрации  $T_w(t)$  изменяется в течение года (рис. 7.8).

Для прогнозирования динамики изменения температуры совместно решаются уравнение потока жидкости (независимые переменные - скорость и давление) и уравнение теплопроводности (независимая переменная - температура) в осесимметричной постановке.

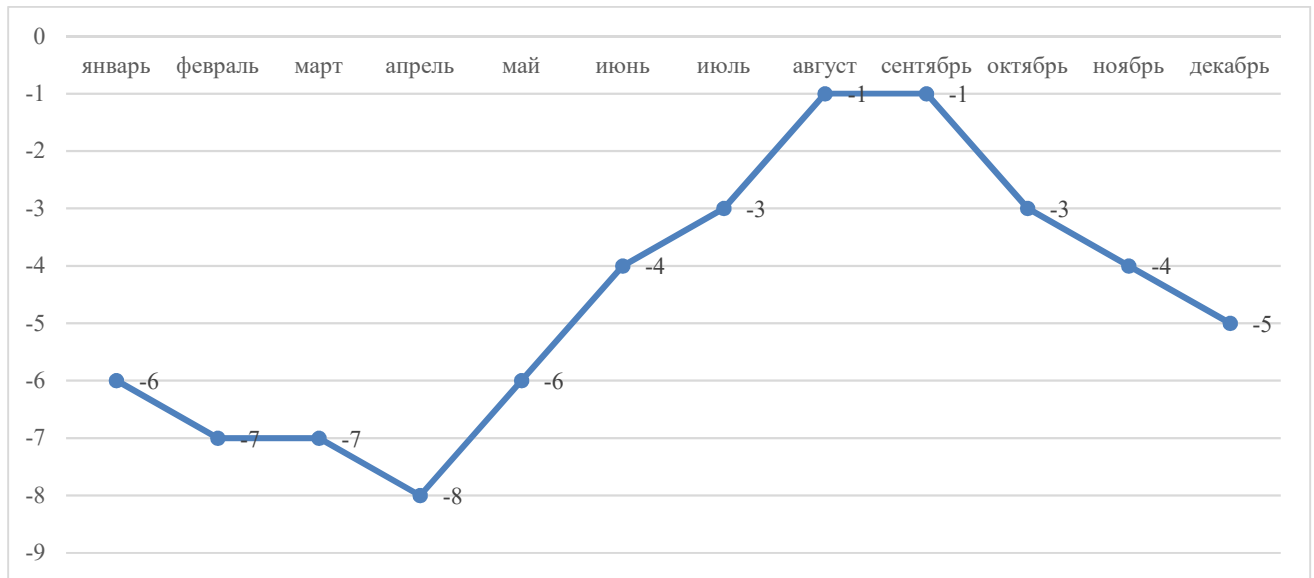


Рис. 7.8. Изменение температуры воды, в зоне фильтрации (сост. Янников А.М.)

Поток воды в фильтрующей трещине был описан уравнением Навье-Стокса для несжимаемой жидкости:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)]; \quad (7.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0;$$

где:  $\mu$  – динамическая вязкость [Па·с];  $\mathbf{u}$  – скорость воды в канале [м/с];  $\rho$  – плотность воды [кг/м<sup>3</sup>];  $p$  – давление [Па].

В пористой среде вокруг рассолопроводящей трещины поток воды был описан уравнением Бринкмана (Brinkman equation) с корректирующим членом Форххаймера (Forchheimer correction):

$$\frac{\rho}{\varepsilon_p} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\rho}{\varepsilon_p^2} (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\varepsilon_p} (\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T) \right] - \frac{\mu}{k} \mathbf{u} - \frac{\rho \varepsilon_p C_f}{\sqrt{k}} \mathbf{u} |\mathbf{u}| \quad (7.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

где;  $k$  – проницаемость пористой среды [м<sup>2</sup>];  $\varepsilon_p$  – пористость среды,  $C_f = \frac{1.75}{\sqrt{150\varepsilon_p^3}}$  -

безразмерный коэффициент трения.

Скорость в начальный момент времени полагается  $\mathbf{u} = 0$ , давление на устье скважины задавалось атмосферное (свободный налив без избыточного нагнетания), температура пород в интервале нижнекембрийского водоносного комплекса равна +4 °С.

На границе области моделирования полагается отсутствие потоков воды и тепла.

Температура входящей в канал воды была задана граничным условием уравнения теплопроводности. Уравнение теплопроводности с конвективным членом потока воды, без фазовых переходов было представлено в виде:

$$(\rho c)_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_f \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T), \quad (7.6)$$

где:  $(\rho c)_{eff} = (1 - \varepsilon_p) \rho_s c_s + \varepsilon_p \rho_f c_f$ ,  $\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon_p) \lambda_s + \varepsilon_p \lambda_f + \lambda_{disp}$ , где  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – плотность, удельная теплоемкость, теплопроводность среды, индекс  $s$  – твердая матрица среды,  $f$  – жидкость,  $\varepsilon_p$  – пористость среды.

При выполнении прогнозных расчётов было принято допущение, что физические свойства рассолов и породы не зависят и не меняются от температуры. Учитывая размеры (площадь поверхности через которую уходит тепло), мощность потока на единицу площади составляет  $-0,858 \text{ Вт/м}^2$ . Если учесть количество воды, проходящей через канал со скоростью  $100 \text{ м/сут}$ , изменение температуры воды с  $-4^\circ\text{C}$  до  $-8^\circ\text{C}$  в зимнее время (285–295 дней) и нагрев воды в накопителе на глубине установки всаса насосов до температуры  $-1^\circ\text{C}$  в летнее время (60-70 дней), то получаем  $-5,6 \times 10^9 \text{ Дж}$  за 10 лет.

Такое количество потери тепла приведёт к формированию отрицательного температурного градиента в радиусе 1 км от закачного ряда в  $-0,2^\circ\text{C}$  в год. Необходимо отметить, что полученная величина в целом согласуется фактически зафиксированной при эксплуатации участков закачки рудника Мир  $-0,15^\circ\text{C}$  в год (в эпицентре закачки).

Другими словами, в ближайшие 50 лет закачка 330–335 млн  $\text{м}^3$  дренажных рассолов (после их отстаивания и охлаждения в накопителе) вызовет локальное изменение мощности криолитозоны. Нулевая изотерма в эпицентре закачки и в радиусе до 1 км опустится до 1700 м (на 800 м ниже нынешнего уровня), сформировав локальную линейную аномалию геотермического режима. Отдельно необходимо отметить, что по причине высокой минерализации рассолов среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных комплексов (более 350 г/литр), прогнозное понижение температуры не окажет влияние на фазовое нахождение рассолов в коллекторах.

*Способ №2 – осветление в водосборниках рудника и закачка рассолов с остаточными тонкодисперсными полиминеральными взвесьями*

При производстве закачки с использованием имеющейся инфраструктуры, для участков Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный в течении ближайших 15 лет будут справедливы закономерности, выявленные при эксплуатации участков Левобережный и

Киенгский, а именно уменьшение температуры по ряду закачных скважин на  $-0,1^{\circ}\text{C}$  в год. Прогнозный объём закачки, определённый аналитическими методами и гидродинамическим моделированием, за это время составит порядка 60 млн. м<sup>3</sup>. Закачка в указанном режиме приведёт к локальному понижению нулевой изотермы на 100–150 м непосредственно в эпицентре закачки (100–150 м от закачных скважин), т.к. в интервале глубин 900–1050 м залегают практически водоупорные карбонатные породы.

Начиная с 2038 г. тренд на охлаждение сменится, т.к. доминирующая роль в формировании дренажных рассолов рудника Удачный придётся на нижнекембрийский водоносный комплекс, что приведёт к закачке рассолов с изначально положительной температурой от  $+2$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Учитывая объёмы и интенсивность закачки до 10–14 млн м<sup>3</sup> в год, в пределах закачного ряда скважин прогнозируется обратный процесс растепления пород. Закачка 270–275 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов с положительной температурой приведёт к формированию уже линейной аномалии положительных температур. Отдельно необходимо отметить, что за возвращением температурного режима нижнекембрийского водоносного комплекса к первоначальному от  $+2$  до  $+4^{\circ}\text{C}$ , последует растепление всего интервала криолитозоны, т.к. в процессе закачки через обсадные трубы будет обеспечен постоянный контакт. Выполним, с применением описанных ранее зависимостей, прогнозный расчёт интенсивности воздействия от процесса закачки на ярусы криолитозоны:

Расчётный объём моделируемого массива принят блоком с радиусом 50 м в ширину и 300 м в глубину. Период расчётов - 10 лет. Начальная температура пород:  $-4^{\circ}\text{C}$  (269,15 К). Температура закачиваемых рассолов в течение года неизменна и составляет  $+4^{\circ}\text{C}$ . На нижней и боковых границах поток тепла отсутствует.

В результате проведенных расчётов установлено, что за 10 лет закачки изотерма температуры фазового перехода в пористой породе ( $T_{ph}=-0,5^{\circ}\text{C}$ ) от поверхности ( $h=0$  м) пройдёт в глубь породы на  $h=12$  м при условиях что на нижней границе задана постоянная температура. Коэффициент теплоемкости среды учитывает энергию, затраченную на фазовый переход с учетом льдистости породы. Другими словами, каждая закачная скважина сформирует вокруг себя блок растеплённых пород радиусом порядка 12 м. Прогнозная площадь техногенного воздействия вокруг каждой скважины через 10 лет закачки положительно температурных дренажных рассолов составит или 450-500 м<sup>2</sup>, суммарная площадь от 10 закачных скважин до 5 000 м<sup>2</sup> или 0,005 км<sup>2</sup>. Учитывая суммарную площадь техногенного воздействия на нижнекембрийский водоносный комплекс, который к середине 50-х гг. XXI века достигнет 800 км<sup>2</sup> (результаты моделирования, представленные в гл. 6), зоны локального растепления (по своей сути зоны сквозных таликов составят 0,0006% от суммарной площади техногенного воздействия.

Исходя из представленной информации можно сделать вывод, что закачка дренажных вод, осуществляемая в коллекторы нижнекембрийского водоносного комплекса в период 2022–2070 гг., имеет ряд негативных сопутствующих процессов. Учитывая, что сохранение первого яруса криолитозоны в неизменном состоянии имеет первостепенное значение, по причине его экранирующей способности, наиболее «щадящим» после середины 30-х гг. XXI века выглядит способ закачки, осуществляемый через поверхностный накопитель минерализованных вод большой емкости, с обязательной полимерной гидроизоляцией всего ложа. Прогнозируемые температуры позволят отнести породы кумахской и эмяксинской свит в пределах эпицентра закачки и в радиусе 1 км от него к третьему ярусу охлаждённых пород криолитозоны.

По причине отсутствия льдистой фазы в интервале нижнекембрийского водоносного комплекса дополнительного вовлечения вод криолитозоны в процесс закачки не произойдёт. В закачку будут вовлекаться технологические воды рудника и дебалансные воды, выпадающие на поверхность накопителя, не превышающие 10% от объёма закачиваемых вод. Техногенная нагрузка на криолитозону при выборе рассматриваемого метода обращения с дренажными водами сводится к трансформации геотермического режима, и потребует более тщательного контроля для его минимизации.

***Проведенный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы:***

1. Анализ первоначальных криогидрогеологических условий кимберлитовых полей, а также наложенные техногенные факторы в виде интенсивности эксплуатации и типа используемых коллекторов, позволили выделить 5 групп участков закачки, отличных друг от друга по степени воздействия на криолитозону.

2. Установлено, что в пределах Алакит-Мархинского и Накынского кимберлитовых полей эксплуатируются участки первой группы, использующие для размещения дренажных вод морозные недонасыщенные породы второго яруса криогенной толщи, по причине низкой интенсивности (средний дебит закачки не должен превышать в разрезе года  $Q_{\text{ср}} = 45 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объём 395 тыс.  $\text{м}^3$  в год), характеризуются незначительной техногенной нагрузкой, и оказывают влияние на температурный режим пород только непосредственно в призабойных и пристволовых частях скважин закачного ряда. На основе выполненных расчётов и проведённого моделирования радиус влияния составляет от 15 до 25 м, в зависимости от локальных особенностей проницаемости пород. Результаты проведенного моделирования позволяют утверждать, что сформированные в процессе закачки природно-техногенные геосистемы, даже в конце «жизненного цикла» основных месторождений будут иметь локальное влияние, не превышая суммарной площади  $\sim 40 \text{ км}^2$ .

3. В пределах **Далдынского кимберлитового поля** эксплуатируются участки третьей и пятой групп.

Участки третьей группы характеризуются средней и высокой интенсивностью эксплуатации: среднегодовой дебит закачки, составляет  $Q_{\text{ср}} = 150\text{--}350 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем от 1,3 до 3,1 млн.  $\text{м}^3$  в год. В качестве рассолопоглощающих структур используются морозные недонасыщенные породы второго яруса криолитозоны. На настоящее время во втором ярусе криолитозоны было размещено свыше 45 млн.  $\text{м}^3$  дренажных вод: 10,6 млн.  $\text{м}^3$  в участок «Октябрьский»; 13,0 млн.  $\text{м}^3$  в участок «Киенгский»; 21,0 млн.  $\text{м}^3$  в участок «Левобережный» и 0,4 млн.  $\text{м}^3$  в участок «Левобережный-2». Полученные данные позволяют говорить о влиянии процесса закачки на второй ярус криолитозоны с точки зрения изменения геотермического режима (уменьшив температуру на  $-1,5/-2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Объёмы закачки позволяют сформировать выдержанные аномалии пониженных температур значительной площади, сопоставимые с площадью участков до  $50 \text{ км}^2$ ). Расчётный суммарный объём вод криолитозоны, вовлечённый в процесс формирования природно-техногенных геосистем: техногенного водоносного горизонта, связанного зонами вертикальной фильтрации с природным подмерзлотным ВВК, в настоящее время составляет 180 млн.  $\text{м}^3$ , с последующим увеличением до 550 млн.  $\text{м}^3$ . Площади формирующихся во втором ярусе криогенной толщи в пределах Далдынского кимберлитового поля природно-техногенных геосистем составят порядка  $85\text{--}90 \text{ км}^2$  и могут быть охарактеризованы как локальные. Однако дальнейшее развитие системы закачки с использованием дополнительных участков: Левобережный-2, Далдынский, Правобережный и Сугунахский увеличит их суммарную площадь до  $250 \text{ км}^2$ , что позволит отнести данное воздействие к региональному.

Участки пятой группы характеризуются средней и высокой интенсивностью эксплуатации: среднегодовой дебит закачки, составляет  $Q_{\text{ср}} = 150\text{--}500 \text{ м}^3/\text{час}$ , а суммарный объем от 1,3 до 4,4 млн.  $\text{м}^3$  в год. В качестве рассолопоглощающих пород используются коллекторы глубокозалегающих (ниже нулевой изотермы) подмерзлотных водоносных горизонтов и комплексов. Влияние процесса закачки на изменение нижней границы криолитозоны будет связано с режимом эксплуатации, а именно строительством накопителя минерализованных дренажных вод. Строительство накопителя приведёт к локальному изменению мощности криолитозоны, опустив нулевую изотерму к середине 2050-х гг. в эпицентре закачки и в радиусе до 1 км от него до глубины 1700 м (на 800 м ниже текущего положения). Это будет связано с закачкой в течение ближайших 50 лет  $330\text{--}335 \text{ млн. м}^3$ , охлаждённых до отрицательных температур в процессе осветления в накопителе дренажных рассолов. Что, в свою очередь, позволит сформировать локальную аномалию линейного типа распределения геотермического режима. Отдельно необходимо отметить, что по причине высокой минерализации рассолов среднекембрийского и нижнекембрийского водоносных

комплексов (более 350 г/литр), прогнозное понижение температуры не окажет влияния на фазовое нахождение рассолов в коллекторах.

В случае закачки с использованием существующей инфраструктуры без строительства накопителя на первом этапе, произойдет частичное локальное охлаждение пород, которое в последующем сменится обратным процессом растепления. В результате проведенных расчётов установлено, что за 10 лет закачки положительно температурных дренажных рассолов изотерма температуры фазового перехода в пористой породе пройдёт в глубь породы на  $h=12$  м. Прогнозная площадь техногенного воздействия вокруг каждой скважины через 10 лет закачки положительно температурных дренажных рассолов составит 450–500 м<sup>2</sup>, суммарная площадь от 10 закачных скважин до 5 000 м<sup>2</sup> или 0,005 км<sup>2</sup>. Учитывая суммарную площадь техногенного воздействия на нижнекембрийский водоносный комплекс, которая к середине 50-х гг. XXI века достигнет 800 км<sup>2</sup>, зоны локального растепления (по своей сути зоны сквозных таликов составят 0,0006% от суммарной площади техногенного воздействия.

Закачка дренажных вод, осуществляемая в коллекторы НВК в период 2022–2070 гг., имеет ряд негативных сопутствующих процессов. Учитывая, что сохранение первого яруса криолитозоны в неизменном состоянии имеет первостепенное значение, по причине его экранирующей способности, наиболее «щадящим» после середины 30-х гг. XXI века выглядит способ закачки, осуществляемый через поверхностный накопитель минерализованных вод большой емкости, с обязательной полимерной гидроизоляцией всего ложа. Прогнозируемые температуры позволят отнести породы кумахской и эмяксинской свит в пределах эпицентра закачки и в радиусе 1 км от него к третьему ярусу охлаждённых пород криолитозоны. По причине отсутствия льдистой фазы в интервале нижнекембрийского водоносного комплекса дополнительного вовлечения вод криолитозоны в процесс закачки не произойдёт. В закачку будут вовлекаться технологические воды рудника и дебалансные воды, выпадающие на поверхность накопителя, не превышающие 10% от объёма закачиваемых вод. Техногенная нагрузка на криолитозону при выборе рассматриваемого метода обращения с дренажными водами сводится к трансформации геотермического режима, и требует более тщательного контроля для его минимизации.

4. В пределах **Мирнинского кимберлитового поля** эксплуатируются участки второй и третьей групп. Обе группы участков для закачки используют коллекторы подмерзлотных комплексов, приуроченных к третьему ярусу криогенной толщи.

Эксплуатация участков второй группы, осуществляемая в зоне динамического влияния Западного разлома в 2001–2023 гг., в обход поверхностных накопителей большой емкости, привела к увеличению температуры по стволам скважин на +0,2/+0,85 °С. Данный процесс обусловлен тем фактом, что объёмы закачиваемых вод незначительны и успевают нагреться в

процессе их аккумуляции и сбора в подземных горных выработках до температур  $+3/+4^{\circ}\text{C}$ . Несмотря на некоторый утепляющий эффект, изменения граничных условий криолитозоны произошли только в пределах скважин закачного ряда. Дальнейшая эксплуатация в текущем режиме продолжится до 2026 г. Учитывая выявленную тенденцию растепления  $+0,04^{\circ}\text{C}$  в год, к концу 2026 г. в пределах УОЗ прогнозируется температура на забоях скважин в диапазоне  $-0,4/-0,5^{\circ}\text{C}$ , что позволит относить породы к третьему ярусу криолитозоны.

Эксплуатация участков четвертой группы, осуществляемая в зоне динамического влияния Восточного разлома в 1989–2023 гг., производимая через поверхностный накопитель большой емкости, после заглубления в 2014 г. водоприемной части насосов в слой рассолов, имеющих круглогодичные отрицательные температуры, привела к уменьшению температуры по стволам скважин на достаточно большие величины, составляющие от  $-0,5$  до  $-3^{\circ}\text{C}$ . Зафиксированные изменения температуры в настоящее время, из-за относительной кратковременности воздействия, а также отсутствия высокопроницаемых пород в чарской свите, относятся только к интервалу метегерской и ичерской свит, и не повлияли на глубину залегания нулевой изотермы. Наблюдаемые температуры позволяют отнести породы в пределах изучаемой территории к третьему ярусу криолитозоны. С 2036 г. интенсивность закачки возрастёт в объёмных значениях в 2 раза, что потребует вовлечения в процесс закачки зоны динамического воздействия Апшайнского разлома, увеличив прогнозную площадь техногенного воздействия до  $1200\text{ км}^2$ .

По причине отсутствия льдистой фазы в интервале МИВК дополнительного вовлечения вод криолитозоны в процесс закачки не происходит. Техногенная нагрузка на криогенную толщу при выборе рассматриваемого метода обращения с дренажными водами сводится к трансформации геотермического режима, и требует более тщательного контроля для его минимизации.

Необходимо отметить, что геокриологические, горно-геологические и структурно-гидрогеологические особенности кимберлитовых полей, по сути, предопределили площадные параметры и характер формирования рассматриваемых природно-техногенных геосистем и степень негативного воздействия в пределах изучаемой территории.

## ГЛАВА 8. ГЕОХИМИЯ РАССОЛОВ КИМБЕРЛИТОВЫХ ТРУБОК КАК ПОТЕНЦИАЛ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ПРОБЛЕМЫ ВЫБОРА СИСТЕМ ОСУШЕНИЯ И ЗАЩИТЫ ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ

### *8.1 Дренажные рассолы и их потенциал использования в качестве гидроминерального сырья*

Проблемы рассольного насыщения вмещающих пород коренных месторождений алмазов рассматривались многими учёными, как во второй половине XX века (Н.Н. Романовский, Е.В. Пиннекер, П.И. Трофимук, И.С. Ломоносов, М.Г. Валяшко, В.А. Твердохлебов, А.С. Анциферов, А.А. Дзюба, В.И. Вожов, А.Э. Конторович, Н.П. Коцупало, Е.В. Зелинская, С.Л. Шварцев, М.Б. Букаты, А.Г. Вахромеев и др.), так и в XXI – Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Дроздов А.В. и др. Всеми исследователями отмечалась уникальность природных рассолов Западной Якутии, и подтверждалась ключевая роль литолого-фациальных, гидрогеологических и геокриологических условий, повлиявших на процессы их формирования.

Формирование различных химических типов рассолов, безусловно, тесно связано с историей развития Западной Якутии в предыдущие геологические периоды [76]. Все перечисленные водоносные горизонты и комплексы, имеют насыщение хлоридными рассолами [41; 43; 132; 214]. Однако только рассолы метегеро-ичерский комплекса имеют отличный натриевый состав. Данный факт объясняется влиянием ряда факторов, наиболее значимыми, и существенно повлиявшими на процесс формирования, по мнению автора, являются региональное структурное строение территории и геокриологические условия Непско-Ботуобинской антеклизы, позволившие сформироваться текущему гидродинамическому режиму МИВК. Отличительной особенностью метегеро-ичерского водоносного комплекса, от более глубокозалегающих водоносных комплексов и горизонтов является не только относительно молодой возраст его образования (четвертичный) [38], но и наличие всех классических атрибутов водоносных комплексов артезианского типа (зон питания, массопереноса и разгрузки) [320; 282; 19; 73; 299; 307]. Между выделяемыми зонами отмечается тесная взаимосвязь, чего у более глубокозалегающих горизонтов не отмечается по причине их приуроченности к зоне затрудненного водообмена и генетического отнесения циркулирующих рассолов к седиментационными «захваченным» водам. Область питания водоносного комплекса находится на юге в 230-300 км, за пределами изучаемой территории, в пределах междуречья рек Нюя и Лена, а также в складчатом обрамлении юга Сибирской платформы, где трещиноватые и раздробленные среднекембрийские отложения выходят на дневную поверхность. Отдельно необходимо отметить, что в пределах Таас-Юрхской площади (в 100-150 км) на юг от Мирнинского кимберлитового поля, в интервале метегерской и ичерской свит вскрываются

солёные воды с минерализацией 10-30 г/литр, и имеющие сульфатно-хлоридный состав. Другими словами, по мере внедрения в областях питания метеорных вод, минерализация солёных вод постепенно повышается вследствие выщелачивания хлоридов и сульфатов кальция, из верхних горизонтов привносятся гидрокарбонаты кальция и магния [188]. На формирование солевого состава хлоридных натриевых рассолов, по всей видимости, решающее влияние оказывает присутствие в геологическом разрезе чарской свиты мощных пластов каменной соли.

Залегающие ниже по разрезу олекминский, толбачанский и эльгянский водоносные комплексы и горизонты из-за глубины залегания, а также экранированности мощными пачками галогенных отложений, не имеют какой-либо взаимосвязи с метеорными водами, и преимущественно формировались за счёт седиментационного захвата и притока по зонам разломов в периоды тектонических активизаций в девоне и триасе ювенильных вод.

Первые от поверхности водоносные комплексы Алакит-Мархинского, Далдынского, Верхне-Мунского и Накынского кимберлитовых полей, по тем же причинам: из-за структурной позиции, а именно приуроченности к склонам Анабарской антеклизы, и геокриологических условий – потенциальные области питания (участки выхода пород рассолосодержащих свит на дневную поверхность) находятся в зоне сплошного распространения ММП (рис 8.1).

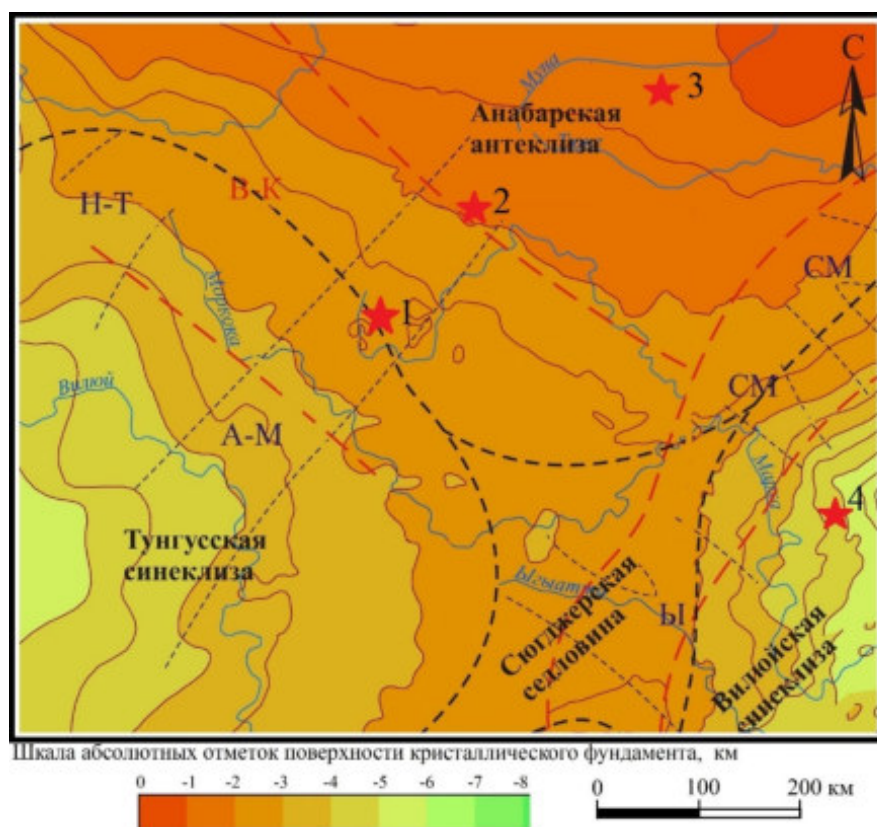


Рис. 8.1. Схема расположения Алакит-Мархинского (1), Далдынского (2), Верхне-Мунского (3) и Накынского (4) кимберлитовых полей, относительно склонов Анабарской антеклизы ([62] с дополнениями Янникова А.М.)

Наличие в разрезе вмещающих пород высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов, имеющих в своём составе также элементы, которые могут представлять промышленный интерес: бром, литий, стронций и др. позволяют рассматривать дренажные воды месторождений в качестве гидроминерального сырья [42; 44, 45, 46, 48; 69; 99; 142; 184; 223; 224; 246; 440; 483]. Перспективы применения рассолов Верхневиллойского и Оленёкского криоартезианских бассейнов в рамках своих исследований рассматривала Алексеева Л.П. [50; 52-55]. В результате, основываясь на фактически полученных притоках дренажных вод, был сделан вывод о перспективности использования рассолов трубки Удачная [415].

Указанные параметры прогнозного извлечения полезных компонентов (рис 8.2) были определены исходя из максимального притока рассолов к руднику Удачный, оценённого ~ 300 м<sup>3</sup>/ч. В рамках проведенных автором исследований были определены прогнозные притоки ко всем уникальным кимберлитовым трубкам, находящимся на разных стадиях отработки до 2050 г. В результате появилась возможность переоценки ресурсного потенциала рассолов применительно ко всем отрабатываемым месторождениям.

Отдельно необходимо отметить, что добыча полезных компонентов из дренажных вод не может рассматриваться как способ их безопасной утилизации.

Так как изъятие одного из микрокомпонентов (например, лития) не приводит к изменению химического типа данных вод, и они по-прежнему будут требовать последующей закачки с использованием коллекторов толщи ММП или региональных водоносных комплексов. Рассмотрим ресурсный потенциал добычи лития, как наиболее ценного компонента, применительно к рассматриваемым кимберлитовым полям.

В рамках текущей главы автором выполнены сопоставление и последующий анализ влияния природных рассолов на выбор системы осушения и защиты от затопления эксплуатируемых карьеров и рудников, а также рассмотрение ресурсного потенциала кимберлитовых полей и формируемых дренажных вод на всем «жизненном цикле» месторождений для добычи одного из микрокомпонентов – лития.

Краткая характеристика химического состава рассолов кимберлитовых полей выполнена с учётом имеющихся фондовых материалов, исследований, выполненных ранее (Акишев А.Н., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Анциферов А.С., Атрощенко Ф.Г., Бобров А.К., Гензель Г.Н., Дроздов А.В., Иост Н.А., Колганов В.Ф., Лобанов В.В., Пиннекер Е.В., Романовский Н.Н., Тагильцев С.Н., Шварцев С.Л., Шепелев В.В. и др.) и результатов научно-исследовательской деятельности автора.



Рис. 8.2. Потенциал использования рассолов трубки Удачная в качестве гидроминерального сырья [53]

В пределах осадочного чехла Алакит-Мархинского кимберлитового поля в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности межмерзлотный НоВК, от дневной поверхности отделен 350–400 м толщей ММП (породы перми, карбона, силура) рассолы вскрываются в отметках +180/+118 м абс., а подошвой являются многолетнемерзлые породы нижнего ордовика и верхнего кембрия (+87,2/+95,6 м абс.). Водосодержащие пласты – коллекторы, приуроченные к нижней части олдондинской свиты (O<sub>101</sub>), представлены песчанистыми доломитами, водорослевыми доломитами, известковистыми песчаниками, переслаивающимися с плотными непроницаемыми глинистыми разностями [22;132]. Степень водообильности комплекса очень слабая, приток рассолов составляет 0,86–1,27 м<sup>3</sup>/сут, величина пластового давления не превышает 23,2 атм., Т не превышает 0,1 м<sup>2</sup>/сут [406]. Формула солевого состава:

$$M_{28-150} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 50\ Mg\ 30\ (Na + K)\ 20} \text{ рН } 6,5$$

2. Второй от поверхности подмерзлотный ВВК, абсолютная отметка кровли составляет -20/-40 м. Подошвой служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -500/-550 м. Общая мощность достигает 300 м, однако эффективная мощность коллекторов редко превышает 50 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и мархинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200–250 м. Т составляет от 0,01 до 0,3 (редко до 3,0) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{200-350} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 55\ Mg\ 30\ (Na + K)\ 15} \text{ рН } 4,4 - 5,5$$

3. Третий от поверхности СВК. Абсолютная отметка кровли составляет -650/-680 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1500/-1550 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600-650 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 200-250 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчленённой известняково-доломитовой толщи и удачинской свиты. Водоносный комплекс напорный [30]. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Т составляет от 0,1 до 1,0 м<sup>2</sup>/сут [393]. Формула солевого состава:

$$M_{350-400} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 55\ (Na + K)\ 30\ Mg\ 15} \text{ рН } 4.4 - 5.5$$

В пределах осадочного чехла **Верхне-Мунского кимберлитового поля** в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности подмерзлотный СВК, от дневной поверхности отделен 240-280 м толщей ММП абсолютная отметка кровли составляет +50/0 м. Подошва комплекса находится

на абсолютных отметках -600/-650 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600 м, однако эффективная мощность коллекторов редко превышает 150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты [215]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~50–150 м. Т - 4-15 (до 20,0) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{80-200} \frac{Cl\ 99}{Mg\ 36\ (Na + K)\ 35\ Ca\ 29} \text{ рН } 5,5 - 6,1$$

2. Второй от поверхности НВК. Абсолютная отметка кровли составляет -700/-750 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -950/-1000 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 200–250 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 100–150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты эмьяксинской и манькайской свиты. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Т - 10–20 м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{350-400} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 55\ (Na + K)\ 30\ Mg\ 15} \text{ рН } 4,4 - 5,5$$

В пределах осадочного чехла **Далдынского кимберлитового поля** в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности подмерзлотный ВВК является наименее водообильным водоносным комплексом в пределах изучаемой территории. От дневной поверхности он отделён толщей (150–250 м) многолетнемерзлых пород олдондинской, онхойюряхской и моркокинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет +99/+180 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -180/-200 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300 м, однако эффективная мощность коллекторов редко превышает 50 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и мархинской свит [43; 132]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~20–50 м. Т 0,001-0,3 (до 1,0) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{100-200} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 39Mg\ 38\ (Na + K)23} \text{ рН } 5,5 - 6,5$$

2. Второй от поверхности СВК. Абсолютная отметка кровли составляет -200/-240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1000/-1050 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600–650 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 200-250 м. Водовмещающими

породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчленённой известняково-доломитовой толщи и удачининской свиты [43]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~350–450 м. Т составляет от 2,5 до 40 (редко до 60,0) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{350-380} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 54(Na + K)\ 30\ Mg\ 16} \text{ рН } 4.4 - 5.5$$

3. Третий от поверхности – НВК. Абсолютная отметка кровли составляет -1050/-1100 м. Подошвой служит нижняя часть разреза эмяксинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -1400/-1450 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 300–350 м, однако эффективная мощность коллекторов составляет 100-150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмяксинской свит [408]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях до 1200 м. Т – 15–100 (до 150-200) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{390-420} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 55\ (Na + K)\ 30\ Mg\ 15} \text{ рН } 3,8 - 5,0$$

В пределах осадочного чехла **Накынского кимберлитового поля** в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности МВВК от дневной поверхности отделен 120-150 м толщей ММП (породы юры, триаса, ордовика), рассолы вскрываются в отметках +160/+90 м абс., а подошвой являются многолетнемерзлые породы верхнего кембрия (-100/-120 м абс.). Водосодержащие пласты – коллекторы, приуроченные к верхней части моркокинской свиты, представлены доломитами, водорослевыми известняками, известковистыми песчаниками, переслаивающимися с плотными непроницаемыми глинистыми разностями [396; 397]. Степень водообильности комплекса очень слабая, приток природных рассолов составляет 0,5–2,7 м<sup>3</sup>/сут, Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~ 15–20 м. Т - 0,001-0,2 (до 0,5–0,8) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{80-180} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 54\ Mg\ 28\ (Na + K)\ 18} \text{ рН } 6,0 - 6.5$$

2. Второй от поверхности ПВВК, абсолютная отметка кровли составляет -120/-150 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза мархинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках -700/-750 м. Общая мощность водоносного комплекса достигает 600 м, однако эффективная мощность коллекторов редко превышает 150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты моркокинской и

мархинской свит [393]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях до 250 м. Т - 0,1 до 1,0 (до 3,0) м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{200-350} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 55\ (Na + K)\ 30\ Mg\ 15} \text{ рН } 4.4 - 5.5$$

В пределах осадочного чехла **Мирнинского кимберлитового поля** в отметках отработки и прямого техногенного влияния от процесса откачки-закачки выделяются следующие водоносные комплексы:

1. Первый от поверхности подмерзлотный надсолевой МИВК от дневной поверхности он отделён мощной толщей (300-400 м) многолетнемерзлых пород холомолохской и мирнинской свит. Абсолютная отметка кровли составляет -5/+20 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза ичерской свиты (пласты №№ 25–26 по сводному корреляционному разрезу), находящаяся на абсолютных отметках -130/-150 м. Общая мощность водоносного комплекса колеблется от 125 до 220 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты с прослоями менее проницаемых гипс-ангидритов [392; 393]. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~200-250 м. Т составляет от 5 до 300-400 м<sup>2</sup>/сут [385]. Формула солевого состава:

$$M_{70-120} \frac{Cl\ 92\ SO_4\ 8}{(Na + K)\ 90\ Ca\ 5\ Mg\ 5} \text{ рН } 6.5 - 8.5$$

2. Второй от поверхности межсолевой олекминский водоносный горизонт. Глубина залегания составляет 1 000–1 050 м. Мощность от 10 до 30 м. Приурочен к карбонатным породам олекминской свиты. Перекрывается галогенными отложениями чарской свиты, подстилается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты. В составе горизонта выделяется от 4 до 6 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами). Водоносный горизонт напорный. Напоры в естественных условиях составляют до 750 м. Т - 0,01-0,1-0,5 м<sup>2</sup>/сут. Формула солевого состава:

$$M_{400-490} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 62\ (Na + K)\ 22\ Mg\ 16} \text{ рН } 3.7 - 5.8$$

3. Третий от поверхности – толбачанский водоносный комплекс. Глубина залегания составляет 1 150-1 200 м. Суммарная мощность комплекса от 150 до 200 м. Приурочен к карбонатным породам толбачанской свиты. Перекрывается галогенными отложениями верхней пачки толбачанской свиты, подстилается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской и эльгянкой свит [393; 394]. В его составе выделяется 15-17 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (выделяемые коллекторы также насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами) [377, 378, 379]. Водоносный комплекс

напорный. Напоры в естественных условиях достигают 800 м.  $T = 0,001$  до  $0,1-0,5$  м<sup>2</sup>/сут [393].  
Формула солевого состава:

$$M_{440-520} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 62\ (Na + K)22\ Mg\ 16} \text{ рН } 5.2 - 5.8$$

4. Эльгянский водоносный горизонт. Глубина залегания от поверхности составляет 1 420-1 470 м. Мощность от 10 до 20 м. Приурочен к карбонатным породам эльгянской свиты. Перекрывается терригенно-карбонатными и сульфатными отложениями толбачанской и эльгянской свит, подстилается галогенными отложениями нелбинской свиты свит [393]. В составе горизонта выделяется от 2 до 4 коллекторов со сложной флюидной насыщенностью (помимо природных рассолов выделяемые коллекторы насыщены каустобиолитами и пластовыми углеводородными газами). Водоносный горизонт напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях достигают 1100 м.  $T = 0,001$  до  $0,1$  м<sup>2</sup>/сут [393]. Формула солевого состава:

$$M_{480-530} \frac{Cl\ 99}{Ca\ 62\ (Na + K)\ 22\ Mg\ 16} \text{ рН } 4.5 - 5.2$$

Выполним оценку ресурсного потенциала каждого из кимберлитового полей, с учётом имеющейся информации о химическом составе природных рассолов и результатов прогнозных расчётов, выполненных в рамках представленного диссертационного исследования (главы 5 и 6).

#### *Алакит-Мархинское кимберлитовое поле*

Источником гидроминерального сырья будут являться рассолы НоВК и ВВК, формирующие притоки к трубкам Айхал и Юбилейная. Содержание лития в данных водах колеблется от 15 до 100 г/м<sup>3</sup>. Результаты оценки ресурсного потенциала дренажных рассолов, исходя из min содержания (прил. 25).

Ресурсный потенциал (определённый по минимальному содержанию) лития из дренажных вод месторождений Алакит-Мархинского кимберлитового поля составляет от 1,8 до 5,5 тонн в год. Суммарно на всем жизненном цикле месторождений возможно извлечение не менее 140 тонн металла.

#### *Мирнинское кимберлитовое поле*

Источником гидроминерального сырья будут являться рассолы нижекембрийских олекминского, эльгянского водоносных горизонтов и толбачанского водоносного комплекса, формирующие притоки к трубкам Интернациональная и Мир. Содержание лития в данных крепких рассолах колеблется от 250 до 400 г/м<sup>3</sup>. Результаты оценки ресурсного потенциала дренажных рассолов, формирующихся при разгрузке коллекторов олекминской, толбачанской и эльгянской свит, исходя из min содержания в 250 г/м<sup>3</sup>, приведены в приложении 25. Не смотря на низкое содержание лития  $\sim 0,6$  г/м<sup>3</sup>, рассолы МИВК также были оценены в качестве перспективного сырья (прил. 25), из-за существенного притока к месторождениям.

Ресурсный потенциал добычи лития из дренажных вод месторождений Мирнинского кимберлитового поля составляет для хлоридно-кальциевых рассолов межсолевых коллекторов от 1,8 до 22,0 тонн в год. Суммарно на всем жизненном цикле месторождений может быть извлечено ~ 440 тонн металла.

Ресурсный потенциал рассолов метегеро-ичерского водоносного комплекса оценивается от 5,3 до 15,8 тонн в год. Суммарный как минимум в 300 тонн, однако, для добычи такого количества металла через технологический цикл придётся пропустить 500 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов, что ставит под сомнение общую рентабельность [202]. Отдельно необходимо отметить, что по данным [85; 86; 225; 213; 293] минимальное промышленное содержания лития составляет 10 г/м<sup>3</sup>.

#### *Накынское кимберлитовое поле*

Источником гидроминерального сырья будут являться рассолы МВВК и ПВВК, формирующие притоки к трубкам Ботуобинская и Нюрбинская. Содержание лития в данных водах колеблется от 20 до 70 г/м<sup>3</sup>. Результаты оценки ресурсного потенциала дренажных рассолов, исходя из min содержания в 20 г/м<sup>3</sup>, приведены в приложении 25.

Ресурсный потенциал (определённый по минимальному содержанию) извлечения лития из дренажных вод месторождений Накынского кимберлитового поля составляет от 0,7 до 1,8 тонн в год. Суммарно на всем жизненном цикле месторождений возможна добыча не менее 25 тонн металла.

#### *Верхне-Мунское кимберлитовое поле*

Источником гидроминерального сырья будут являться рассолы СВК, формирующие притоки к трубкам Заполярная, Деймос, Новинка, Комсомольская-Магнитная, которые будут отрабатываться двумя карьерами «Заполярный» (трубки «Заполярная» и «Деймос») глубиной 400 м и «Магнитный» (трубки «Комсомольская-Магнитная» и «Новинка») глубиной 300 м. Среднекембрийский водоносный комплекс представлен мощной однообразной толщей алевроито-глинисто-карбонатных осадков, условно разделяющейся на 3 свиты – силигирскую (Є<sub>2</sub>si), джахтарскую (Є<sub>2</sub>dj) и оленекскую (Є<sub>2</sub>ol), переходы между которыми постепенные, нечеткие, вследствие близости литологического состава с преобладанием глинистых разностей – мергелей, глинистых известняков, аргиллитов, алевролитов. Содержание лития в данных водах колеблется от 17 до 36 г/м<sup>3</sup>. Результаты оценки ресурсного потенциала дренажных рассолов, исходя из минимального содержания в 17 г/м<sup>3</sup>, приведены в приложении 25.

Ресурсный потенциал (определённый по минимальному содержанию) извлечения лития из дренажных вод месторождений Верхне-Мунского кимберлитового поля составляет от 3,6 до 59,1 тонн в год. Суммарно на всем жизненном цикле месторождений возможна добыча не менее 208 тонн металла.

*Далдынское кимберлитовое поле*

Источником гидроминерального сырья будут являться рассолы ВВК, СВК и НВК, которые формируют в настоящее время и будут формировать в будущем притоки к руднику Удачный. Содержание лития в данных водах колеблется от 140 до 300 г/м<sup>3</sup>. Причём наибольшие содержания характерны для нижнекембрийского водоносного комплекса (средняя концентрация лития возрастает до 204,8 мг/л), который будет участвовать в формировании дренажных вод с 2035 г. Результаты оценки ресурсного потенциала дренажных рассолов, исходя из минимального содержания в 140 г/м<sup>3</sup>, приведены в приложении 25.

Ресурсный потенциал извлечения лития из дренажных вод трубки Удачная Далдынского кимберлитового поля составляет для хлоридно-кальциевых рассолов ВВК+СВК+НВК от 331 до 2090 тонн в год. Суммарно на всем жизненном цикле месторождений возможно извлечение не менее **46,7** тыс. тонн металла.

### **8.2 Критерии влияния криогидрогеологических условий на выбор системы осушения и защиты от затопления отрабатываемых месторождений**

Наличие в разрезе вмещающих пород коллекторов, насыщенных природными рассолами, требует непосредственного учёта при выборе системы защиты карьера или рудника от затопления. Первоначальными проектами отработки предусматривался централизованный сбор всех типов вод, поступающих к месторождению, с последующей перекачкой и складированием в хвостохранилища или закачкой в недра. Однако такой подход приводит к вовлечению в процесс закачки дополнительного объёма пресных метеорных вод и атмосферных осадков. Количество атмосферных осадков, выпадающих на площадь карьера внутри системы нагорных канав, достигает значительных величин от 120 до 500 тыс. м<sup>3</sup> в год, и напрямую зависит от площади карьера по дневной поверхности. В таблице 8.1 приведены объёмы атмосферных вод, фактически зафиксированные по отрабатываемым и отработанным карьерам:

Таблица 8.1 – Объёмы атмосферных вод [409]

№ п/п	Карьер	Объём, тыс. м <sup>3</sup> /год		
		минимальный	средний	максимальный
1	Айхал	120	170	200
2	Ботубинский	160	190	250
3	Интернациональный	100	120	180
4	Мир	250	320	450
5	Нюрбинский	180	200	270
6	Удачный	250	350	700
7	Юбилейный	200	300	600
<b>ИТОГО</b>		<b>1 260</b>	<b>1 650</b>	<b>2 250</b>

Как видно из представленной таблицы, отработка ключевых месторождений сопряжена с вовлечением в процесс откачки/закачки дополнительного объёма атмосферных вод, суммарно

составляющего не менее 1,26 млн м<sup>3</sup> в год. Учитывая приведенную ранее информацию по количеству (объёму) природных рассолов, поступающих к карьерным и шахтным полям месторождений, в зависимости от их приуроченности к конкретному кимберлитовому полю, целью исследований являлось определение критериев ранжирования месторождений, для обоснования последующего проектирования отдельного или централизованного водоотлива. После проведенного анализа условий отработки были выделены следующие факторы:

1. Объём и минерализация природных рассолов, поступающих к месторождению;
2. Тип используемых участков закачки (толща ММП или коллекторы регионального водоносного комплекса);
3. Способ отработки подкарьерных запасов, и как следствие возможность размещения дополнительных зумпфов перехвата поверхностных и атмосферных вод на бермах отработанных карьеров.
4. Структурно-тектонические условия карьерного поля.

Рассмотрим каждый из определённых факторов:

**Объём и минерализация поступающих к месторождению природных рассолов** определяется не только природными условиями, а именно его принадлежностью к определённому кимберлитовому полю, но и технологическими особенностями – скоростью проходки и глубиной отработки месторождения. Причём влияние техногенного фактора весьма ощутимо, т.к. интенсификация процесса проходки горных выработок, требует сопутствующей интенсификации по осушению горных пород, что приводит к формированию увеличенного притока вод, особенно на первоначальных этапах отработки [66; 67; 417-419].

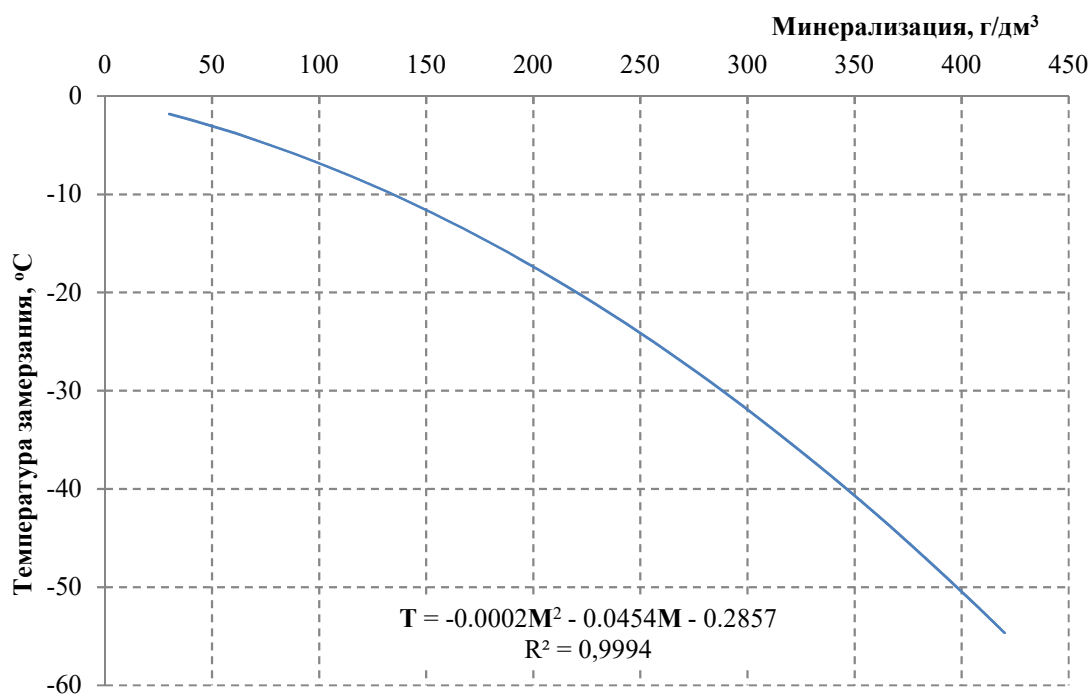
Прогнозные объёмы формирования природных рассолов по ключевым месторождениям были приведены в таблицах №№ 7.1-7.6 при оценке перспектив их использования в качестве гидроминерального сырья. Исходя из представленной информации, значительным ресурсом для разбавления, без существенного изменения химического состава, и как следствие, кондиционных свойств для закачки обладают месторождения Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей. Трубки Алакит-Мархинского, Верхне-Мунского и Накынского кимберлитовых полей характеризуются невысокими притоками, даже при глубине вскрытия свыше 500 м, что препятствует строительству водоотлива по централизованной схеме, т.к. атмосферные осадки в периоды интенсивного поступления (паводки и др.) будут существенно разубоживать природные рассолы, прежде всего, уменьшая их минерализацию, которая, в свою очередь, является кондиционной оставляющей для выбора вида обращения с водами.

В зависимости от **типов используемых коллекторов** кондиционное значение минимальной минерализации отличается, при этом всегда остается вопрос совместимости закачиваемых вод, при условии их существенного разубоживания.

Природные межмерзлотные коллекторы представляют собой криогенные геологические структуры [248], приуроченные к подразделам с определенной, в основном, тектонической нарушенностью и пластово-поровой и каверновой пустотностью ММП, которые обладают естественной и наведенной емкостью [118]. При воздействии на льдистую составляющую пород этих структур высокоминерализованными дренажными водами происходит формирование дополнительной гравитационной и поровой емкости в техногенном талике внутри мерзлого массива. В такие естественные коллекторы производится закачка дренажных вод (насыщенных и ненасыщенных рассолов). Минимальная минерализация для коллекторов толщи ММП составляет 55-60 г/литр, указанная минерализация позволяет выполнять закачку дренажных вод в ММП, т.к. является равновесной относительно их средней температуры. Однако воды такой минерализации не способны увеличивать приёмистость участков, т.к. не способны дополнительно разубоживаться за счёт плавления жильного льда. Поэтому минимальная минерализация, позволяющая использовать коллекторы толщи ММП хоть на сколь-либо отдалённой перспективе (1-2 года) без потери приемистости закачных скважин составляет не менее 80 г/литр. Определение температуры замерзания рассолов выполнялось специалистами ИЗК СО РАН (Алексеев С.В., Алексеева Л.П. и др.) в ходе проведения комплексных специализированных исследований. На основе лабораторных экспериментов выявлена зависимость между температурой замерзания и минерализацией соленых вод и рассолов хлоридного кальциево-магниевого состава для подмерзлотных вод (рис. 8.3), повсеместно распространенных в северной части Западной Якутии [29].

Известны экспериментальные данные о замерзании растворов солей натрия, калия, магния и кальция [136; 304; и др.]. По проведенным экспериментам при охлаждении хлоридного кальциевого рассола с минерализацией 353 г/дм<sup>3</sup> установлено, что до температуры -37 °С его жидкое состояние полностью сохраняется.

Природные подмерзлотные коллекторы представлены гидрогеологическими структурами (главным образом, участки обводненных разломных зон) с весьма замедленным водообменом, фильтрационные параметры которых существенно выше, нежели чем у региональных водоносных комплексов, а распространенные в них воды непригодны для хозяйственно-бытового использования. Как правило, в такие криогидрогеологические структуры производится закачка дренажных вод (в основном, природных рассолов) однородного химического состава из открытых и подземных горных выработок. К примерам использования естественных подмерзлотных коллекторов криолитозоны в Западной Якутии можно отнести обратную закачку дренажных вод месторождений трубок Мир и Интернациональная в метегеро-ичерский водоносный комплекс на участках обратной закачки, а также закачку рассолов трубки Удачная в нижекембрийский водоносный комплекс.



(Формула:  $T$  – температура замерзания, °С;  $M$  – минерализация воды, г/дм<sup>3</sup>;  $R^2$  – коэффициент достоверности аппроксимации).

Рис. 8.3. Изменение температуры замерзания соленых вод и рассолов в зависимости от их минерализации [29]

При выборе данного способа утилизации минерализация имеет меньшее значение, из-за значительных ёмкостных запасов самих водоносных комплексов. Минимально необходимое значение, определённое экспериментальным путём в процессе эксплуатации участков, составляет 35 г/л. Однако транспортировка таких вод возможна только по утеплённым трубопроводам или в период года с устойчивыми положительными температурами. Дополнительное распреснение закачиваемых вод (ниже 35 г/л) накладывает ряд ограничений, в части совместимости закачиваемых вод и приводит к выпадению плохо растворимых солей (сульфатов) в призабойной зоне закачных скважин, что в свою очередь приводит к падению производительности закачки.

Способ обработки подкарьерных запасов является определяющим, т.к. в настоящее время в компании реализовано несколько вариантов подземной обработки:

- комбайновая, нисходящими лентами с последующим замещением отработанного кимберлита закладочным массивом, формирующемся на цементной основе, с использованием местных материалов для изготовления, малоклинкерного вяжущего (данный метод используется на руднике Интернациональный, а также использовался на руднике Мир до аварии 2017 г.);

– камерно-целиковая отбойка кимберлита, с последующим заполнением отработанных камер твердеющей закладкой на цементной основе с использованием малоклинкерного вяжущего из местных материалов (данный метод в нисходящем порядке реализован на руднике Айхал, а также планируется к реализации в восходящем порядке, после восстановления рудника Мир);

– методами самообрушения с торцевым выпуском, под защитой предохранительной подушки, без использования закладываемых смесей для поддержания выработанного пространства (данный метод реализован на руднике Удачный, и планируется на руднике Юбилейный).

Определение конкретного метода основывается, прежде всего, на экономических показателях месторождения (содержание алмазов, цена товарной продукции и т.д.) [406; 411]. Однако немаловажную роль в выборе способа отработки играют гидрогеологические условия, а именно возможность реализации раздельного сбора подземных рассолов и атмосферных вод. Реализация раздельного сбора разных типов вод, требует строительства и обустройства дополнительных водоприёмных зумпфов [411-413]. При выборе места их заложения ключевым фактором является – *структурно-тектоническое строение локального участка* карьерного поля. При выборе места предпочтение отдаётся зонам, не осложнённым разрывными нарушениями. В случае выявления в пределах места заложения узлов, пересекающихся или оперяющих разломов, после проведения комплекса работ (опытное бурение, опытные нагнетания воздуха для определения локальной проницаемости массива и др.) принимается решение о переносе или проведении купирующих мероприятий по гидроизоляции.

В настоящее время, после подготовки соответствующего обоснования, подготовленного автором в период 2021-2022 гг., были внесены корректировки в проекты отработки целого ряда ключевых месторождений: на карьерах Айхал, Ботуобинский, Зарница, Нюрбинский и Юбилейный был реализован раздельный сбор различных типов вод. Зумпфы перехвата атмосферных вод оборудуются либо во временном исполнении на полосе разноса, либо в постоянных версиях (при условии постановки борта в проектное положение) в отметках распространения многолетнемерзлых пород, т.е. в незасоленных породах (ненасыщенных межмерзлотными или подмерзлотными рассолами). Оборудование карьеров дополнительными зумпфами, позволило на 70% уменьшить объём атмосферных вод, попадающих в призабойный зумпф, и как следствие, уменьшить объём дренажных вод, требующих закачки.

Карьеры Заря, Заполярный, Магнитный и Майский в настоящее время не вскрыли насыщенные рассолами коллекторы, поэтому в настоящее время на данных месторождениях реализован централизованный сбор всех типов вод (представленных метеорными водами сезонно-талого слоя и атмосферными осадками).

Из трех эксплуатируемых в настоящее время рудников – отдельный сбор дренажных вод реализован на двух – Айхал и Интернациональный. Частично отдельный сбор – на руднике Удачный.

На руднике Айхал в настоящее время реализуются мероприятия по организации эффективного водоотведения и защиты рудника от прорыва обводненных осей со дна карьера согласно утвержденных «Регламентов...» и «Проектов...», разработанных АГОКом, ООО НТЦ «НОВОТЭК» и институтом «Якутнипроалмаз». Непосредственно в карьере на отм. +375 м обустроены два зумпфа перехвата, оборудованные участковыми насосными станциями для перекачки. Данные зумпфы перехватывают до 40% поступающих атмосферных вод. Система подземного водоотлива построена по принципу централизованного водосбора всех постоянных и временных водопритоков в водосборники, расположенные на гор. +163 м и гор. +100 м. В участковый водосборник на гор. +163 м, ёмкость которого составляет 3 000 м<sup>3</sup>, собираются преимущественно дренажные воды карьера трубки «Айхал» (95-97%). В последующем данные воды складируются в хвостохранилище ОФ№8. В водосборнике гор. +100 м ёмкостью 3 500 м<sup>3</sup> собираются преимущественно рассолы НоВК и ВВК, поступающие из очистных забоев в процессе горно-добычных работ, стволов и подземных горных выработок. Собранные воды закачиваются в скважины участка закачки «Ноябрьский».

Особенностью рудника «Интернациональный» является совокупность различных типов обводнения: 1 – наличие в карьере водонасыщенных мергелистых, глинистых осей с бортов карьера; 2 – влияния коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса на эксплуатационные блоки от гор. +85 м до гор. -145 м; 3 – нахождение эксплуатационных блоков в отметках -790 м по -1050 м в пределах толбачанского водоносного комплекса, характеризующегося наличием высоконапорных насыщенных природных рассолов. На руднике выделяется 11 эксплуатационных блоков (ЭБ). Управляемая система дренажа рудника «Интернациональный» устроена следующим образом:

– Откачка карьерной и шахтной воды эксплуатационного блока №2 производится дренажной насосной станцией (ДНС), расположенной во вспомогательном штреке гор. +85 м. Насосная станция оборудована двумя водосборниками, общим объемом 300 м<sup>3</sup> и тремя насосными агрегатами: общей производительностью 390 м<sup>3</sup>/час. Карьерная вода из дренажных скважин поступает в осветлитель (V=374 м<sup>3</sup>) вспомогательного штрека гор. +85 м, откуда после осветления откачивается в водосборники ДНС. С ДНС гор. +85 шахтная вода откачивается на дневную поверхность, далее через ВСВО отводится на УОЗ. В весенне-летний паводковый период вода по пластиковому водопроводу сбрасывается в карьер «Новинка».

– Откачка шахтной воды с глубоких горизонтов производится из камеры главной водоотливной установкой (КГВУ), расположенной в околоствольном дворе гор. -625 м. Насосная

оборудована двумя водосборниками общим объемом 700 м<sup>3</sup> и тремя насосными агрегатами общей производительностью до 200 м<sup>3</sup>/час.

Система водоотлива карьера «Удачный» формировалась в течение всего периода его эксплуатации. В настоящее время отведение паводкового стока, а также всех выпадающих на площадь карьера атмосферных осадков осуществляется при помощи внешнего водоотлива, также предназначенного для отвода поступающих к карьерному полю поверхностных вод. Он состоит из системы нагорных канав и зумпфов с насосными станциями, расположенных на дневной поверхности вокруг карьера на горизонтах +280, +250, +220 абс. м, Южный и Северный зумпфы с перехватом атмосферных осадков и талых вод до отметки +220 абс. м и функционирует в теплый период года (порядка 165 дней в году). Объёмы перекачиваемых вод в 2017–2019 гг. приведены в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Объёмы перекачиваемых атмосферных вод (сост. Янников А.М.)

№ п/п	Местоположение насосной станции	Объём откачиваемых вод, м <sup>3</sup>		
		2017 г.	2018 г.	2019 г.
1	Зумпф №3 гор. +115 м	205 830	178 000	167 750
2	Зумпф №7 гор. +220 м	154 400	124 000	108 000
3	Зумпф №5 гор. +250 м	227 500	195 250	170 250
4	Станция перекачки вод из зумпфа №7 в зумпф №6	78 000	80 835	58 750

Система подземного водоотлива построена по принципу централизованного водосбора всех постоянных и временных водопритоков в водосборник главной насосной станции гор. -580 м, с последующей закачкой минерализованных вод в ММП на участках Левобережный, Левобережный-2, Среднекембрийский и Нижнекембрийский юго-восточный.

Наличие в интервале вмещающих пород рассолонасыщенных коллекторов требует непосредственного изучения их распространения как в плане, так и в разрезе, т.к. является определяющим фактором при проектировании систем осушения и защиты карьеров и рудников от затопления, а также накладывает жесткие ограничения при обращении с формируемыми дренажными водами, прежде всего из-за сопутствующих экологических рисков.

Ключевым фактором, позволяющим реализовывать централизованный, а не отдельный сбор дренажных вод является процентное соотношение атмосферных вод и природных рассолов. Минимально необходимое (допустимое) соотношение, позволяющее производить закачку дренажных и смешанных вод, составляет 1:1. Рекомендуемое количество не должно превышать 20% от суммарной годичной производительности закачки на сопряженном обрабатываемом месторождении узле закачки.

***Проведенный комплекс исследований позволяет сделать следующие выводы:***

1. По результатам исследований ресурсный потенциал лития в дренажных рассолах за весь период отработки месторождений составляет не менее 48 тыс. т. Годовая добыча металла может составлять от 345 до 2090 тонн в год. Необходимо отметить, что 97% ресурсов данного компонента приходится на дренажные воды рудника Удачный. Однако для добычи 46,7 тыс. тонн металла через технологический цикл придётся пропустить ~ 335 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов. Из оставшихся 3% ресурсного потенциала к реализации попутной добычи лития могут быть рекомендованы хлоридно-кальциевые рассолы олекминской, толбачанской и эльгянской свит месторождений Мирнинского кимберлитового поля, в виду высоких содержаний, превышающих промышленные до 40–50 раз. Учитывая, что годовая добыча лития составляет 90–100 тыс. тонн, а лидерами являются: Австралия (до 55 тыс. тонн); Чили (до 26 тыс. тонн); Китай (до 14 тыс. тонн) и Аргентина (до 6.2 тыс. тонн), вовлечение дренажных рассолов коренных месторождений алмазов будет составлять от 0,5 до 2% мировой добычи. Однако гидроминеральные ресурсы Далдынской флексуры позволяют говорить о возможности интенсифицирования процесса извлечения (минимум в 2–3 раза), которое правда потребует дополнительного бурения эксплуатационных скважин. Отдельным вопросом, требующим решения, является правовое регулирование, касаемо закачки вод, прошедших через технологический цикл. В настоящее время дренажные воды, после извлечения микрокомпонента, составляющего порядка ~ 0,07% от общей минерализации, переходят в разряд отходов 2 класса (учитывая наличия ряда токсичных элементов), и при последующей закачке требуют уплаты дополнительных взносов за размещение. Решение данного правового вопроса позволит начать рентабельную попутную добычу лития, а также стронция, рубидия, брома и т.д.

2. Присутствие в интервале вмещающих пород рассолонасыщенных коллекторов требует непосредственного изучения их распространения в плане и в разрезе, так как является определяющим фактором при проектировании систем осушения и защиты карьеров и рудников от затопления. Кроме того, наличие в разрезе таких коллекторов накладывает жёсткие ограничения на обращение с формируемыми дренажными водами, прежде всего из-за сопутствующих экологических рисков. Ключевым фактором, позволяющим реализовывать централизованный, а не раздельный сбор дренажных вод является процентное соотношение атмосферных вод и природных рассолов. Минимально необходимое (допустимое) соотношение, позволяющее производить закачку дренажных и смешанных вод, составляет 1:1. Рекомендуемое количество не должно превышать 20% от суммарной годичной производительности закачки на сопряжённом обрабатываемому месторождению узле закачки. В настоящее время после подготовки соответствующего обоснования по целому ряду ключевых месторождений трубок «Айхал», «Ботуобинская», «Зарница», «Нюрбинская» и «Юбилейная» был реализован

раздельный сбор различных типов вод. Зумпфы перехвата атмосферных вод оборудуются либо во временном исполнении на полосе разноса, либо в постоянных версиях (при условии постановки борта в проектное положение) в отметках распространения ММП, т.е. в незасолённых породах (ненасыщенных межмерзлотными или подмерзлотными рассолами). Оборудование карьеров дополнительными зумпфами позволило на 70% уменьшить объём атмосферных вод, попадающих в призабойный зумпф, и как следствие, уменьшить объём дренажных вод, требующих закачки. Карьеры «Заря», «Заполярный», «Магнитный» и «Майский» в настоящее время не вскрыли коллекторы, насыщенные рассолами. Поэтому на данных месторождениях реализован централизованный сбор всех типов вод, представленных метеорными водами сезонно-талого слоя и атмосферными осадками. Из трех эксплуатируемых в настоящее время рудников раздельный сбор дренажных вод реализован на двух – «Айхал» и «Интернациональный». Частично раздельный сбор – на руднике «Удачный».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных автором исследований, правомерным будет сделать ряд следующих выводов и обобщений:

1. Изучение криогидрогеологических, газодинамических условий Западной Якутии было проведено в достаточном объеме, позволяющем выполнить схематизацию в пределах кимберлитовых полей и детализацию до уровня отдельных обрабатываемых месторождений и эксплуатируемых участков закачки. Вертикальная криогидрогеологическая зональность, а именно расположение наиболее приёмистых коллекторов в разрезе вмещающих отложений, а также влияние структурно-тектонического фактора определили подходы к строительству участков обратной закачки в пределах Далдынского и Мирнинского кимберлитовых полей.

2. Экологическая надежность использования коллекторов подмерзлотных водоносных горизонтов, прежде всего, обеспечивается глубиной их залегания и надежностью экранирования вышележающими водоупорными пачками пород и отложений. Эффективность технологии обратной закачки подтверждается 32 летним периодом промышленной эксплуатации соответствующих участков. В настоящее время сооружены и эффективно эксплуатируются участки закачки рудника «Мир» («Тымтайдахский» и «Южный»), а также рудника «Интернациональный» (участок обратной закачки (УОЗ) и участок закачки карьерных вод (УЗВ)). В общей сложности в пласты-коллекторы метегеро-ичерского водоносного комплекса в зонах динамического влияния Восточного и Западного разломов, по состоянию на 01.01.2023 г, закачано порядка 340 млн. м<sup>3</sup>.

Дренажные воды, поступающие в рудник «Интернациональный», закачиваются в пределах динамического воздействия зоны Западного разлома, для рудника «Мир» использовалась, и будет использоваться в будущем, аналогичная зона Восточного разлома. Дальнейшая безопасная отработка данных месторождений формирует следующие проблемы:

I. Существующие системы обратной закачки в своем современном виде не смогут полностью обеспечить потребность в закачке формируемых дренажных вод, особенно учитывая рост объемов дренажных вод при возобновлении добычи на руднике Мир, связанный с увеличением площади осушения [403; 407; 409].

II. Концентрированность существующих закачных скважин приводит к формированию избыточного напорного фронта в эпицентрах закачки, что в свою очередь, является причиной обратного возврата закачиваемых вод к горным выработкам. Величина возврата, по разным оценкам, составляет от 25 до 40%. Увеличение расстояний между разными участками и разделение закачиваемых объемов между ними приведёт к общему понижению уровней в эпицентрах закачки, и как следствие, уменьшению разницы напоров.

Решение указанных проблем лежит в плоскости дальнейшего развития систем обратной закачки, а именно строительства дополнительных закачных скважин в рамках как уже опробованных разрывных структур, так и выборе перспективных блоковых дислокаций. Обязательным условием выглядит учёт не только структурно-тектонического строения территории, но и литолого-фациальных особенностей, а также направления естественного потока. В настоящее время основным способом повышения производительности систем закачки выступает увеличение количества закачных скважин на площади уже исследованных участков, ранее прошедших поисково-оценочный этап. Например, бурение 7 скважин в зоне Западного разлома для закачки дренажных вод рудника «Интернациональный», суммарной производительностью закачки  $\sim 800 \text{ м}^3/\text{час}$ ; или строительство участка «Южный», для развития системы обратной закачки рудника «Мир» за Восточным разломом (было пробурено 4 скважины, с суммарной производительностью  $\sim 300 \text{ м}^3/\text{час}$ ).

Перечисленные решения, безусловно, позволяют создать необходимый резерв мощностей. Но главная проблема принимаемых решений – это безальтернативность использования динамических зон Западного разлома (для рудника Интернациональный) и Восточного разлома (для рудника Мир). Из-за возможного падения производительности уже построенных систем обратной закачки, в случае кольматации коллекторов МИВК, а также из-за прогнозируемого увеличения объёма формируемых дренажных вод, есть необходимость рассмотрения перспективы использования в качестве рассолопоглощающих других блоковых дислокаций и зон тектонических нарушений. Для обоснования перспективности зон динамического воздействия региональных разломов (кроме Восточного и Западного), было выполнено изучение площадных вариаций коэффициента водопроницаемости. Объектом изучения выступали коллекторы МИВК, как целевые пласты для реализации технологии обратной закачки. В результате проведенных работ в пределах Мирнинского кимберлитового поля были выделены площади, пригодные для строительства дополнительных участков.

Криогидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля, а именно наличие высокопроницаемых коллекторов, пригодных для обратной закачки на глубинах более 1200 м от дневной поверхности, предопределило на первоначальном этапе тип участков, используемых для возврата в недра дренажных рассолов. Исследования, проведенные коллективом учёных ИЗК СО РАН и ИМЗ СО РАН, с последующей адаптацией применительно к эксплуатируемым участкам, позволили обосновать использование толщи многолетнемерзлых пород для закачки высокоминеральных вод. Для выбора перспективных криогенных структур разработан и успешно применен на практике комплекс поисковых критериев, включающий: структурные, тектонические, геоморфологические, геофизические, газодинамические, температурные, криогидрогеологические, геохимические признаки. Каждый критерий имеет свою физическую

подоплеку, напрямую или косвенно связан с фильтрационно-емкостными свойствами криогеологической среды. Предложенная технология уже имеет 30-ти летний опыт применения в АК АЛРОСА. Преимуществом данного метода являются относительно неглубокие закачные скважины, составляющие 250–280 м, главным недостатком – ограниченность объёмов таких участков. В настоящее время начата эксплуатация уже четвёртого участка закачки, использующего коллекторы толщи ММП. Дренажные воды трубки Удачная в разные периоды отработки закачивались в участки «Октябрьский» (1985–2002 гг.), «Киенгский» (2003–2012 гг.), «Левобережный» (2012–2023 гг.) и в настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2, с оценённым объёмом ~ 17 млн. м<sup>3</sup>. Всего за весь период эксплуатации во внутримерзлотные коллекторы криолитозоны по состоянию на 01.01.2023 г. закачено ~ 45 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов, в том числе: 10,6млн.м<sup>3</sup> в участок «Октябрьский»; 13,0млн.м<sup>3</sup> в участок «Киенгский»; 21,0 млн.м<sup>3</sup> в участок «Левобережный» и 0,4 млн.м<sup>3</sup> в участок «Левобережный-2».

Учитывая текущую криогидрогеологическую ситуацию на руднике Удачный (приток природных рассолов ~ 9000 м<sup>3</sup>/сут), прогнозируемый рост притоков к системе подземных горных выработок (до ~ 40 000 м<sup>3</sup>/сут к 2062 г), в процессе отработки месторождения, а также перспективу работы рудника до 2060 г, закачка дренажных вод в зону ММП не смогла бы решить в полной мере проблемы утилизации дренажных вод. Поэтому в пределах Далдынского кимберлитового поля потребовалось строительство новых участков, основанных на принципах обратной закачки. Для решения этой задачи был поставлен комплекс исследований НВК. По результатам полевого комплекса работ, автором в период 2020–2022 гг. было выполнено гидрогеологическое моделирование с последующим выпуском и успешной защитой Технических проектов опытно-промышленной эксплуатации узлов закачки шахтных и дренажных вод рудника «Удачный» на участках «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный». В рамках проектов были обоснованы параметры эксплуатации каждого из участков, учитывающие локальные особенности структурно-геологического и гидрогеологического строения. Были выполнены подтверждающие расчёты, позволяющие производить закачку в каждый из участков с расходом до 7200 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 14 400 м<sup>3</sup>/сут) в режиме свободного налива, и с расходом до 9600 м<sup>3</sup>/сут (суммарно 19 200 м<sup>3</sup>/сут) с избыточными давлениями на устье, величиной до 3 МПа. Т.к. прогнозируемое увеличение притока на руднике Удачный потребует строительства дополнительных участков, в рамках проведенных исследований, в пределах Далдынской флексуры, было выделено 3 перспективных площади.

3. Изучение природных газов, содержащихся как во вмещающих горных породах, так и непосредственно в самих кимберлитах выполняется на разных стадиях освоения месторождений. Но наиболее критичным является выделение газосодержащих интервалов при переходе на подземную отработку, т.к. газоносность пород, объём, состав и форма содержащихся газов

определяют не только параметры вентиляции рудников, но и скорость горнопроходческих работ, а также технологические решения по опережающей дегазации массива. Наибольшую опасность представляют взрывоопасные или ядовитые газы. На всех кимберлитовых трубках без исключения в процессе изучения фиксировалось наличие углеводородных газов, находящихся как в свободной, так и в растворённой и связанной формах. В результате проведенных исследований была выполнена характеристика газодинамических условий непосредственно для месторождений отдельных кимберлитовых полей. Большинство выделенных коллекторов, как правило, приурочено к карбонатным разностям: известнякам, доломитам. В первоначальном, неразгруженном состоянии, массив характеризуется не только достаточно высокими дебитами природного газа (по отдельным скважинам более  $150 \text{ м}^3/\text{час}$ ), но и высокими первоначальными пластовыми давлениями (свыше  $100 \text{ кгс/см}^2$ ). Описанные выше первоначальные газодинамические условия делают возможным отработку месторождений только в соответствии со строгим соблюдением норм и правил «газового режима». Для обеспечения безопасного ведения горных и проходческих работ было принято решение об использовании системы опережающей дегазации. Причём дегазация вмещающих пород осуществляется в два этапа. На первом этапе на всю мощность эксплуатационного блока бурятся вертикальные опережающие скважины. На втором этапе перед грудью забоя строящейся подземной горной выработки проходятся 25–30 метровые горизонтальные и слабонаклонные (до  $10^\circ$ ) скважины. В зависимости от результатов первого этапа дегазации, их количество от 3 до 7 штук.

4. Отработка уникальных коренных месторождений алмазов (трубки Интернациональная, Мир, Нюрбинская, Удачная, Юбилейная и др.) на всю глубину разведанных запасов возможна только при эксплуатации системы опережающего водопонижения и сопряжённых участков закачки. Осушение месторождений во всех случаях приводит к формированию депрессионных воронок в интервалах осушаемых водоносных комплексов и горизонтов, однако, в зависимости от выбора способа закачки дренажных вод, конфигурации депрессионных воронок и их площадь существенно отличаются. В настоящее время дренажные воды месторождений закачиваются обратно в недра. Для закачки используется два вида коллекторов – формируемые в толще ММП и региональных водоносных комплексов. Проведенный комплекс исследований позволил оценить масштаб влияния процесса откачка-закачка в пределах каждого из изученных кимберлитовых полей Западной Якутии.

5. Формирующиеся в результате закачки дренажных вод во второй и третий яруса криолитозоны природно-техногенные геосистемы, ожидаемо оказывают существенное воздействие на геотермический режим пород, особенно в интервалах рассолопоглощающих коллекторов. Анализ первоначальных криогидрогеологических условий кимберлитовых полей, а также наложенные техногенные факторы в виде интенсивности эксплуатации и типа

используемых коллекторов, позволили выделить 5 групп участков закачки, отличных друг от друга по степени воздействия на криолитозону. Наибольшим влиянием характеризуются участки 3, 4 и 5 групп; наименьшим 1 и 2 групп. Закачка дренажных рассолов привела к разнонаправленным изменениям температуры, составляющим от -3 до +0,85 °С, в зависимости от конкретного участка и его принадлежности к кимберлитовому полю. Суммарная площадь трансформации геотермического режима в результате закачки дренажных рассолов в настоящее время составляет порядка 800 км<sup>2</sup> и будет увеличиваться в будущем, достигнув ко второй половине XXI века 2100 км<sup>2</sup>.

6. Формирование в интервале второго яруса криолитозоны техногенных водоносных горизонтов приводит к плавлению вод, находящихся в твёрдой фазе. Объём вовлеченных вод криолитозоны к настоящему моменту достиг 180 млн. м<sup>3</sup>. Дальнейшая закачка высокоминерализованных вод увеличит объём растворенного льда ко второй половине XXI века до 550 млн. м<sup>3</sup>.

7. Отрабатываемые в настоящее время в Западной Якутии коренные месторождения алмазов приурочены к пяти кимберлитовым полям: Алакит-Мархинскому, Верхне-Мунскому, Далдынскому, Мирнинскому и Накынскому. Формирование различных химических типов рассолов, безусловно, тесно связано с историей развития Западной Якутии в предыдущие геологические периоды. Все перечисленные водоносные горизонты и комплексы, имеют насыщение хлоридными рассолами. Однако только рассолы метегеро-ичерского комплекса имеют отличный натриевый состав. Данный факт объясняется влиянием ряда факторов, наиболее значимыми, и существенно повлиявшими на процесс формирования, по мнению автора, являются региональное структурное строение территории и геокриологические условия Непско-Ботуобинской антеклизы, позволившие сформироваться текущему гидродинамическому режиму МИВК. Наличие в разрезе вмещающих пород высокоминерализованных хлоридно-кальциевых рассолов, имеющих в своём составе также элементы, которые могут представлять промышленный интерес: бром, литий, стронций и др. позволяют рассматривать дренажные воды месторождений в качестве гидроминерального сырья. В рамках проведенных автором исследований были определены прогнозные притоки ко всем уникальным кимберлитовым трубкам, находящимся на разных стадиях отработки, до 2050 года. В результате появилась возможность переоценки ресурсного потенциала рассолов, применительно ко всем месторождениям. Исходя из полученной по результатам проведенных исследований информации, суммарный ресурсный потенциал дренажных рассолов на всем жизненном цикле отрабатываемых месторождений составляет не менее 48 тыс. тонн лития. Годовая добыча металла может составлять от 345 до 2090 тонн в год. Необходимо отметить, что 97% ресурсов данного компонента приходится на дренажные воды рудника Удачный. Однако для добычи 46,7

тыс. тонн металла через технологический цикл придётся пропустить ~ 335 млн. м<sup>3</sup> дренажных рассолов. Из оставшихся 3% ресурсного потенциала к реализации попутной добычи лития могут быть рекомендованы хлоридно-кальциевые рассолы олекминской, толбачанской и эльгянской свит месторождений Мирнинского кимберлитового поля, ввиду высоких содержаний, превышающих промышленные до 40–50 раз.

8. Наличие в разрезе вмещающих пород коллекторов, насыщенных природными рассолами, требует непосредственного учёта при выборе системы защиты карьера или рудника от затопления. Первоначальными проектами отработки предусматривался централизованный сбор всех типов вод, поступающих к месторождению, с последующей перекачкой и складированием в хвостохранилища или закачкой в недра. Однако такой подход приводит к вовлечению в процесс закачки дополнительного объёма пресных метеорных вод и атмосферных осадков. Оработка ключевых месторождений сопряжена с вовлечением в процесс откачки/закачки дополнительного объёма атмосферных вод, суммарно составляющего не менее 1,26 млн м<sup>3</sup> в год. Учитывая приведенную ранее информацию по количеству (объёму) природных рассолов, поступающих к карьерным и шахтным полям месторождений в зависимости от их приуроченности к конкретному кимберлитовому полю, целью исследований являлось определение критериев ранжирования месторождений, для обоснования последующего проектирования отдельного или централизованного водоотлива. После проведенного анализа условий отработки были выделены следующие факторы:

- объём и минерализация природных рассолов, поступающих к месторождению;
- тип используемых участков закачки (толща ММП или коллекторы регионального водоносного комплекса);
- способ отработки подкарьерных запасов, и как следствие возможность размещения дополнительных зумпфов перехвата поверхностных и атмосферных вод на бермах отработанных карьеров;
- структурно-тектонические условия карьерного поля. Ключевым фактором, позволяющим реализовывать централизованный, а не отдельный сбор дренажных вод является процентное соотношение атмосферных вод и природных рассолов. Минимально необходимое (допустимое) соотношение, позволяющее производить закачку дренажных и смешных вод, составляет 1:1. Рекомендуемое количество не должно превышать 20% от суммарной годичной производительности закачки на сопряжённом обрабатываемом месторождении узле закачки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов, В. Ю. Химическая зональность подземных вод, льдов и минералов как отражение криогенных процессов / В. Ю. Абрамов, В. А. Кирюхин // Проблемы изучения химического состава подземных вод : (VI Толстихинские чтения, 11–12 ноября 1997 г.). – СПб., 1997. – С. 30–35.
2. Абрамов, В. Ю. Криогидрогеологические условия кимберлитовой трубки Удачная и их изменения в связи с разработкой месторождения / В. Ю. Абрамов, В. А. Кирюхин, Л. И. Сердюков // Проблемы региональной гидрогеологии : (VII Толстихинские чтения, 11–12 ноября 1998 г.). – СПб., 1998. – С. 43–48.
3. Абрамов, В. Ю. Геохимическая зональность вторичных минералов, льдов и вод криосферы и процессы ею управляющие / В. Ю. Абрамов, В. А. Кирюхин // Записки ЛГИ. IX Толстихинские чтения : материалы конф. – СПб., 2000. – С. 95–99.
4. Абрамов, В. Ю. Криогенная метаморфизация химического состава подземных вод / В. Ю. Абрамов // Разведка и охрана недр. – 2014. – № 5. – С. 16–20.
5. Авдеева, В. И. Стратиграфия позднекембрийских отложений Ботуобинского газоносного района / В. И. Авдеева, О. Д. Драгунов, А. С. Ковтун [и др.] // Новое в стратиграфии и палеонтологии позднего докембрия Сибирской платформы. – Новосибирск, 1976. – С. 76–84.
6. Агринский, А. В. Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии / А. В. Агринский // Тр. ВСЕГИНГЕО. – 1980. – № 135. – С. 48–57.
7. Акишев, А. Н. Управление развитием рабочей зоны кимберлитовых карьеров / А. Н. Акишев, В. А. Бахтин, Е. В. Бондаренко // Горная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 43–58.
8. Акишев, А. Н. Схемы вскрытия и отработки глубоких горизонтов алмазных карьеров крутонаклонными выработками / А. Н. Акишев, А. С. Чадаев, В. А. Бахтин, С. Л. Бабаскин // Горная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 75–80.
9. Акишев, А. Н. Современное состояние и основные тенденции развития открытого способа разработки алмазорудных месторождений АК «АЛРОСА» / А. Н. Акишев, И. Ф. Бондаренко, С. Л. Бабаскин // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений : сб. докл. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию ин-та «Якутнипроалмаз», Мирный. – Новосибирск : Наука, 2011. – С. 12–15.
10. Акишев, А. Н. Управление запасами и качеством алмазорудного сырья / А. Н. Акишев, П. В. Васильев, С. С. Мининг, И. Ф. Бондаренко. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 382 с.
11. Акишев, А. Н. Техничко-технологический комплекс для доработки запасов на глубинных горизонтах алмазорудных карьеров / А. Н. Акишев, И. В. Зырянов, Г. В. Шубин [и др.] // Горный журнал. – 2012. – № 12. – С. 39–43.

12. Акишев, А. Н. Техничко-технологический комплекс для доработки запасов на глубинных горизонтах алмазородных карьеров / А. Н. Акишев, И. В. Зырянов, Г. В. Шубин [и др.] // Горный журнал. – 2012. – № 12. – С. 39–43.
13. Акишев, А. Н. Проектирование сверхглубоких алмазородных карьеров. Проблемы и решения / А. Н. Акишев, В. Ф. Колганов, И. Ф. Бондаренко, С. Л. Бабаскин // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием: сб. докл. – Апатиты; Санкт-Петербург, 2012. – С. 160–165.
14. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 440 с.
15. Алексеев, В. Р. Криогенная метаморфизация природных вод / В. Р. Алексеев, А. В. Иванов // Проблемы зимоведения. – Чита, 1972. – Вып. 4. – С. 80–82.
16. Алексеев, В. Р. Криология Сибири: избранные труды / В. Р. Алексеев; науч. ред. А. Н. Антипов, В. П. Мельников; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т географии им. В. Б. Сочавы. – Новосибирск: Гео, 2008. – 483 с.
17. Алексеев, В. Р. Подземные льды и гидротермическое движение грунтов на наледных участках речных долин / В. Р. Алексеев // Лёд и снег. – 2015. – Т. 55, № 1. – С. 69–88.
18. Алексеев, С. В. О криогенной метаморфизации подземных вод / С. В. Алексеев // III тематич. конф. молод. науч. сотр.: тез. докл. – Иркутск, 1983. – С. 86–89.
19. Алексеев, С. В. Экспериментальные исследования криометаморфизма рассолов Далдыно-Алакитского района / С. В. Алексеев // XI конф. молод. науч. сотр. по геол. и геофиз. Вост. Сибири: тез. докл. – Иркутск, 1984. – С. 158–159.
20. Алексеев, С. В. Гидрогеохимическая зональность мёрзлой толщи района трубки Северная (Западная Якутия) / С. В. Алексеев, А. В. Дроздов // XI Всесоюз. совещ. по подз. водам Востока СССР: тез. докл. – Иркутск-Чита, 1985. – С. 114–115.
21. Алексеев, С. В. О взаимодействии криопэгов с мёрзлыми грунтами / С. В. Алексеев, А. В. Дроздов // XII конф. молод. научн. сотр. по геол. и геоф. Вост. Сибири: тез. докл. – Иркутск, 1986. – С. 152–154.
22. Алексеев, С. В. Криогенез подземных вод Далдыно-Алакитского района (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / С. В. Алексеев. – Иркутск, 1987. – 18 с.
23. Алексеев, С. В. Криогенез подземных вод Далдыно-Алакитского района / С. В. Алексеев // XII Всес. совещ. по подз. водам Востока СССР: тез. докл. – Иркутск; Южно-Сахалинск, 1988. – С. 120.
24. Алексеев, С. В. Экологические последствия освоения месторождений алмазов Западной Якутии / С. В. Алексеев, В. Н. Борисов // I Междунар. конф. «Знание – на службу нуждам Севера»: тез. докл. – Якутск, 1996. – С. 178.

25. Алексеев, С. В. Итоги изучения гидрогеохимического разреза криолитозоны Далдыно-Алакитского района / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // XV Всерос. совещ. по подз. водам Сибири и Дальнего Востока : тез. докл. – Тюмень, 1997. – С. 33.
26. Алексеев, С. В. Гидрогеохимические особенности криолитозоны Далдыно-Алакитского района (Западная Якутия) / С. В. Алексеев, Е. В. Пиннекер // Проблемы изучения химического состава подземных вод (VI Толстихинские чтения, 11–12 ноября 1997 г.). – Санкт-Петербург : СПбГУ, 1997. – С. 27–30.
27. Алексеев, С. В. Криолитозона Далдыно-Алакитского района. Проблемы эволюции и освоения / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // IV Междунар. междисциплинар. науч. симп. «Закономерности строения и эволюции геосфер». – Хабаровск, 1998. – С. 399–401.
28. Алексеев, С. В. Геохимия подземных льдов в осадочных толщах Якутии / С. В. Алексеев, Е. В. Пиннекер // ДАН. – М. : МАИК, 2000. – Т. 373, № 5. – С. 660–662.
29. Алексеев, С. В. Криогенез подземных вод и горных пород на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии / С. В. Алексеев. – Новосибирск : Изд-во СО РАН : НИЦ ОИГГМ, 2000. – 119 с.
30. Алексеев, С. В. Динамика состава дренажных вод при разработке алмазодобывающего карьера (Якутия) / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, В. Н. Борисов // География и природные ресурсы. – 2000. – № 4. – С. 143–146.
31. Алексеев, С. В. База данных по геохимии подземных льдов, вод и рассолов Далдыно-Алакитского района / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, В. Н. Борисов // Мат-лы XVI Всерос. совещ. по подз. водам Востока России. – Новосибирск, 2000. – С. 113–115.
32. Алексеев, С. В. Природные и техногенные процессы в криолитозоне Якутской алмазоносной провинции / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, В. Н. Борисов // Материалы Второй конференции геокриологов России : в 2 т. – М. : МГУ, 2001. – Т. 2. – С. 3–9.
33. Алексеев, С. В. Гидрогеохимия криолитозоны центральной части Якутской алмазоносной провинции / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // Криосфера Земли. – 2000. – Т. IV, № 4. – С. 89–96.
34. Алексеев, С. В. Геохимия дренажных рассолов кимберлитовой трубки Удачная / С. В. Алексеев, В. Н. Борисов, Л. П. Алексеева [и др.] // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже III тысячелетия. – Томск : ТПУ, 2000. – С. 575–579.
35. Алексеев, С. В. Первый опыт захоронения солёных дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемёрзлые породы / С. В. Алексеев, А. В. Дроздов, Т. И. Дроздова [и др.] // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI, № 2. – С. 61–65.
36. Алексеев, С. В. Геокриологическая и гидрогеохимическая оценки состояния массива пород в условиях захоронения техногенных вод карьера трубки Удачная / С. В. Алексеев, В. А. Павлов, Л. П. Алексеева [и др.] // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики (28 февраля – 2 марта 2002 г.). – Санкт-Петербург : СПбГУ, 2002. – С. 30–39.

37. Алексеев, С. В. Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в мёрзлых породах / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003. – С. 67–78.

38. Алексеев, С. В. Стабильные изотопы ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  и  $^{37}\text{Cl}$ ) в рассолах Сибирской платформы / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, О. Shouakar-Stash [и др.] // Материалы Всерос. совещ. по подземным водам Востока России (XVII совещ. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск ; Красноярск : Изд-во Ирк. техн. ун-та, 2003. – С. 106–109.

39. Алексеев, С. В. Особенности миграции высокоминерализованных стоков карьера трубки Удачная в многолетнемёрзлых породах при их подземном захоронении / С. В. Алексеев, В. И. Гунин, А. В. Дроздов [и др.] // Материалы Третьей Конференции геокриологов России. – Т. 4. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – С. 5–12.

40. Алексеев, С. В. Криогидрогеологические системы. Принципы типизации и картографического отображения / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // Подземная гидросфера : материалы Всерос. совещ. по подземным водам востока России. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 144–147.

41. Алексеев, С. В. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, В. Н. Борисов [и др.] // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 3. – С. 291–304.

42. Алексеев, С. В. Литиеносные рассолы Далдыно-Алакитского района (Западная Якутия) / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // География и природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 103–108.

43. Алексеев, С. В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / С. В. Алексеев. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2009. – 319 с.

44. Алексеев, С. В. Литиеносные подземные воды Сибирской платформы / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. Г. Вахромеев // Материалы Всерос. науч.-практ. совещ. с междунар. участием «Литий России» (24–26 мая 2011 г.). – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. – С. 7–13.

45. Алексеев, С. В. Литиеносные подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. Г. Вахромеев, Г. П. Шмаров // Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 8–13.

46. Алексеев, С. В. Литиевые подземные воды Иркутской области и Западной Якутии / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. Г. Вахромеев, А. Г. Владимиров, Н. И. Волкова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – № 20. – С. 27–33.

47. Алексеев, С. В. Промышленные рассолы Сибирской платформы: гидрогеология, бурение и добыча, переработка, утилизация / С. В. Алексеев, А. Г. Вахромеев, Н. П. Коцупало, А. Д. Рябцев. – Иркутск : Изд-во «Географ», 2014. – 162 с.

48. Алексеев, С. В. Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. С. Гладков, Н. С. Трифионов, Е. В. Серебряков, С. С. Павлов, А. В.

Ильин // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 1235–1253. – DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0393.

49. Алексеева, Л. П. Взаимодействие подземных вод и многолетнемерзлых пород в условиях техногенеза / Л. П. Алексеева, С. В. Алексеев // Мат-лы XVI Всерос. совещ. по подз. водам Востока России. – Новосибирск, 2000. – С. 77–79.

50. Алексеева, Л. П. Новые данные об изотопии стронция в рассолах Далдыно-Алакитского района (Западная Якутия) / Л. П. Алексеева, Ф. Шабо, В. Н. Борисов [и др.] // Труды Международной конференции «Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии» (Томск, 4–8 октября 2004 г.). – Томск : Изд-во НТЛ, 2004. – С. 36–40.

51. Алексеева, Л. П. Геохимические особенности подземных текстурообразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии / Л. П. Алексеева, С. В. Алексеев, А. М. Кононов // Лёд и снег. – 2014. – № 1. – С. 101–113.

52. Алексеева, Л. П. Изотопы хлора и брома в рассолах Западной Якутии / Л. П. Алексеева, С. В. Алексеев, А. М. Кононов, Т. Ма, Ю. Лю // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2015. – Т. 13. – С. 19–30.

53. Алексеева, Л. П. Геохимия подземных льдов, солёных вод и рассолов Западной Якутии : автореф. дис. ... д ра геол.-минерал. наук : 25.00.07 / Л. П. Алексеева ; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т]. – Томск, 2016. – 43 с.

54. Алексеева, Л. П. Промышленные подземные воды Оленёкского артезианского бассейна: геохимия и перспективы использования / Л. П. Алексеева, С. В. Алексеев // Водные ресурсы. – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 42–51.

55. Алексеева, Л. П. Геохимия подземных льдов, солёных вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы / Л. П. Алексеева, С. В. Алексеев // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 2. – С. 183–197.

56. Алькова, Е. Л. Обоснование рациональной схемы водоотлива на кимберлитовых карьерах Якутии : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Е. Л. Алькова ; [Место защиты: Ин-т горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН]. – Якутск, 2011. – 18 с.

57. Андреев, М. Н. Обоснование технологии разработки подкарьерных запасов кимберлитовых трубок в условиях МГОК АК «АЛРОСА» : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / М. Н. Андреев ; [Место защиты: С.-Петерб. гос. гор. ун-т]. – Санкт-Петербург, 2011. – 20 с.

58. Анисимова, Н. П. Формирование химического состава подземных вод таликов (на примере центральной Якутии) / Н. П. Анисимова. – М. : Наука, 1971. – 195 с.

59. Антышко, Б. Е. Гидрогеологические ёмкости горно-складчатых областей СССР / Б. Е. Антышко. – М. : Недра, 1986. – 141 с.

60. Анциферов, А. С. Нефтегазовая гидрогеология юга Сибирской платформы / А. С. Анциферов. – М. : Недра, 1984. – 192 с.

61. Анциферов, А. С. Гидрогеология древнейших нефтегазоносных толщ Сибирской платформы / А. С. Анциферов. – М. : Недра, 1989. – 176 с.
62. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции / С. И. Костровицкий, З. В. Специус, Д. А. Яковлев, Г. С. Фон-дер-Флаас, Л. Ф. Суворова, И. Н. Богуш ; науч. ред. Н. П. Похиленко ; Акционерная компания «АЛРОСА», Науч. исслед. геологоразведочное предприятие (НИГП), ФАНО Ин-т геохимии РАН. – Мирный : Изд-во НИГП АЛРОСА, 2015. – 480 с.
63. Атрощенко, Ф. Г. Исследование процессов, контролирующих миграцию минерализованных вод при их захоронении в многолетнемёрзлые породы / Ф. Г. Атрощенко // Матер. Межд. научн. конф. «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов (на рубеже третьего тысячелетия)». – Томск : Изд-во НТЛ, 2000. – С. 579–583.
64. Атрощенко, Ф. Г. Физико-химические процессы, контролирующие захоронение высокоминерализованных рассолов в многолетнемёрзлые породы (на примере Октябрьского полигона, Западная Якутия, район кимберлитовой трубки Удачная) / Ф. Г. Атрощенко, В. Ю. Абрамов // Проблемы захоронения промоторов в глубокие горизонты земных недр (Матлы 2 респ. науч.-практ. конф., Саратов, сентябрь, 2001 г.). – Саратов : Научная книга, 2001. – С. 71–72.
65. Атрощенко, Ф. Г. Гидрогеоэкологические проблемы утилизации дренажных рассолов при обработке подкарьерных запасов трубки «Мир» / Ф. Г. Атрощенко, В. В. Лобанов // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 240–248.
66. Атрощенко, Ф. Г. Оптимизация системы осушения и захоронения дренажных рассолов месторождения трубки «Мир» / Ф. Г. Атрощенко, К. А. Соловейчик // Записки СПб Горного института. – 2003. – Т. 153. – С. 126–128.
67. Атрощенко, Ф. Г. Гидрогеологические проблемы на месторождениях алмазов Якутии / Ф. Г. Атрощенко, Р. А. Филин // Записки СПб Горного института. – 2003. – Т. 153. – С. 123–125.
68. Афанасенко, В. Е. Некоторые данные по динамике солёных подземных вод криозоны Ботуобинского алмазоносного района / В. Е. Афанасенко, А. Б. Чижов // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1968. – Вып. VIII. – С. 123–128.
69. Балашов, Л. С. Подземные хлоридные воды и рассолы как комплексный сырьевой источник редких и рассеянных элементов / Л. С. Балашов // Тр. Юбилейной сессии учёных советов ВСЕГИНГЕО, МГУ, МГРИ и ПНИИИС, 1968. – С. 96–124.
70. Балобаев, В. Т. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии в связи с её нефтегазоносностью / В. Т. Балобаев, В. Н. Девяткин // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. – Новосибирск : СНИИГГиМС, 1982. – С. 18–28.
71. Баранов, И. Я. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:10 000 000. Пояснительная записка / И. Я. Баранов. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 48 с.

72. Баранов, И. Я. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:5 000 000. Пояснительная записка / И. Я. Баранов. – М. : Изд-во АН СССР, 1970. – 52 с.
73. Басков, Е. А. Основные черты гидрогеологии Сибирской платформы / Е. А. Басков, И. К. Зайцев // Тр. ВСЕГЕИ. Новая серия. – 1963. – Т. 101: Вопросы региональной и поисковой гидрогеологии. – С. 89–152.
74. Басков, Е. А. Гидрогеологические структуры Восточной Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока СССР / Е. А. Басков, Г. И. Климов, В. А. Кирюхин, С. Н. Суриков, Н. А. Петрова, О. Н. Толстихин // Основные типы гидрогеологических структур СССР. – Л. : Изд-во ВСЕГЕИ, 1974. – С. 70–83.
75. Батугин, С. А. Теоретические основы опробования и оценки запасов месторождений / С. А. Батугин, Е. Д. Чёрный. – Новосибирск : Наука, 1998. – 344 с.
76. Баулин, В. В. История развития многолетнемёрзлых пород на территории СССР / В. В. Баулин, А. А. Величко, Н. С. Данилова // Проблемы геокриологии. – М. : Наука, 1983. – С. 222–230.
77. Белоусова, А. П. Экологическая гидрогеология: учебник для вузов / А. П. Белоусова, И. К. Гавич, А. Б. Лисенков [и др.]. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. – 397 с.
78. Бобров, А. К. К стратиграфии кембрия нижнего течения р. Олёкмы / А. К. Бобров // Материалы по геологии и полезным ископаемым Якутии // Тр. Якутского ФАН СССР. – Сб. 4, 1959. – С. 155–164.
79. Бобров, А. К. Стратиграфия кембрия долины реки Лена между реками Ичер и Пеледуй / А. К. Бобров // В кн.: Геология и полезные ископаемые Якутской АССР. – Якутск, 1962. – С. 125–134.
80. Бобров, А. К. Стратиграфия и палеогеография отложений верхнего докембрия Южной Якутии / А. К. Бобров. – Якутск, 1979. – С. 55–59.
81. Бобров, А. К. Об объёме и возрасте метегерской свиты кембрия Березовского и Ангаро-Ленского прогибов / А. К. Бобров, С. А. Боброва // Науч. сообщения ЯФ СО АН СССР. Вып. 7: Геология. – Якутск, 1962. – С. 31–39.
82. Боголюбов, А. Н. К вопросу о мощности многолетнемёрзлых пород в Ботуобинском районе (по данным комплексных мерзлотно-геофизических работ) / А. Н. Боголюбов, В. Г. Кондратьев // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1968. – Вып. VIII. – С. 144–159.
83. Бодунов, Е. И. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы / Е. И. Бодунов, В. Л. Белецкий, Г. С. Фрадкин [и др.]. – Якутск : Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1986. – 176 с.
84. Бойцов, А. В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и меж мерзлотного стока в Центральной Якутии : дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.08 / А. В. Бойцов. – Якутск, 2002. – 176 с.

85. Бондаренко, И. Ф. Проектирование алмазородных карьеров в криолитозоне / И. Ф. Бондаренко, И. В. Зырянов, В. А. Валентинасов, А. М. Янников, И. Б. Бокий. – Новосибирск : Изд-во ЯНА/СО РАН, 2023. – 407 с.
86. Бондаренко, С. С. Подземные промышленные воды / С. С. Бондаренко, Г. В. Куликов. – М. : Недра, 1984. – 358 с.
87. Борисов, В. Н. К вопросу о взаимодействии рассолов и мёрзлых пород / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев // XII Всес. совещ. по подз. водам Востока СССР : тез. докл. – Иркутск-Южно-Сахалинск, 1988. – С. 162.
88. Борисов, В. Н. Криогенное строение и ёмкостные свойства многолетнемёрзлых пород (в Западной Якутии) / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев // XIV Всерос. совещ. по подз. водам Востока России : тез. докл. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 1994. – С. 94
89. Борисов, В. Н. Криопэги – особый фактор осложнения работ в криолитозоне / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев // III Межд. симпозиум «Горное дело в Арктике» : тез. докл. – Санкт-Петербург, 1994. – С. 150.
90. Борисов, В. Н. Многолетнемёрзлые породы как объект для захоронения высококонцентрированных промстоков (на примере севера Сибирской платформы) / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев // Мат. I конференции геокриологов России. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996. – С. 160–170.
91. Борисов, В. Н. Гидрогеохимическая зональность Западной Якутии (в связи с условиями отработки коренных месторождений алмазов) / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев, А. Ю. Климов, В. А. Плешевенкова // Земная кора и верхняя мантия Восточной Сибири. – Иркутск, 1987. – С. 146–153.
92. Борисов, В. Н. Метаморфизованные рассолы в сфере влияния горных работ / В. Н. Борисов, С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, В. А. Плешевенкова // Мат-лы XV Всерос. совещ. по подз. водам Сибири и Дальнего Востока. – Тюмень, 1997. – С. 32.
93. Белов, С. В. Минерагения платформенного магматизма (траппы, карбонатиты, кимберлиты) / С. В. Белов, А. В. Лапин, А. В. Толстов, А. А. Фролов. – М. : ИМГРЭ, 2008. – 537 с.
94. Брахфогель, Ф. Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы / Ф. Ф. Брахфогель. – Якутск : ЯФ СО АН СССР, 1984. – 128 с.
95. Бурова, И. А. Закономерности распределения и прогноз коллекторов в венд-кембрийском галогенно-карбонатном комплексе Сибирской платформы (на примере Непско-Ботуобинской антеклизы) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук : 25.00.06 / И. А. Бурова ; [Место защиты: Всерос. нефтяной науч.-исслед. геологоразведочный ин-т]. – Санкт-Петербург, 2001. – 26 с.
96. Ваганов, В. И. Алмазные месторождения Мира / В. И. Ваганов. – М. : Геоинформмарк, 2000. – 312 с.
97. Валяшко, М. Г. Геохимия и генезис рассолов Иркутского амфитеатра / М. Г. Валяшко, А. И. Поливанова, И. К. Жеребцова [и др.]. – М. : Наука, 1965. – 160 с.

98. Вассоевич, Н. Б. Природа органического вещества современных и ископаемых осадков / Н. Б. Вассоевич. – М. : Наука, 1973. – 261 с.
99. Вахромеев, А. Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере юга Сибирской платформы) : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / А. Г. Вахромеев. – Иркутск, 2009. – 36 с.
100. Великин, С. А. Локальный эколого геофизический мониторинг криолитозоны / С. А. Великин, А. М. Снегирев, А. Д. Фролов // Геофизические исследования криолитозоны. – Москва : Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 2000. – Вып. 3. – С. 25–38.
101. Великин, С. А. Изучение фильтрации на гидротехнических объектах Якутии / С. А. Великин, С. Ю. Милановский, А. Г. Петрунин // Материалы Третьей Конференции геокриологов России. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – Т. 4. – С. 50–59.
102. Великин, С. А. Комплексное геофизическое изучение инженерно геокриологического состояния оснований гидро и горнотехнических сооружений Якутской алмазоносной провинции : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.08 / С. А. Великин. – Якутск, 2020. – 42 с.
103. Вельмина, Н. А. Особенности гидрогеологии области многолетнемёрзлых пород и основные её проблемы / Н. А. Вельмина // Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. – Москва : Наука, 1966. – С. 16–28.
104. Вельмина, Н. А. Особенности гидрогеологии мёрзлой зоны литосферы (криогидрогеология) / Н. А. Вельмина. – Москва : Недра, 1970. – 326 с.
105. Вигандт, В. А. Опыт сооружения и эксплуатации обратной закачки дренажных вод карьера «Мир» / В. А. Вигандт // Горный журнал. – 1994. – № 9. – С. 60–62.
106. Власов, В. М. Технологии открытой добычи алмаза в криолитозоне / В. М. Власов, А. Д. Андросов. – Якутск : Изд-во ЯНЦ СО ПВН, 2007. – 378 с.
107. Власов, Н. А. Физико-химические процессы в ледовой фазе при замерзании природных вод / Н. А. Власов, Л. А. Чернышев // Вопросы гидрогеологии и гидрогеохимии. – Иркутск, 1969. – Вып. IV. – С. 187–191.
108. Власов, Н. А. Роль криогенной метаморфизации в формировании химического состава природных вод / Н. А. Власов, Л. И. Павлова, А. В. Иванов // Международный геохимический конгресс : тезисы докладов. – Москва, 1971. – Т. 2. – С. 799–800.
109. Вожов, В. И. Геотермические условия нефтегазоносности Сибирской платформы / В. И. Вожов, Ф. Г. Гурари, А. И. Сурнин // Советская геология. – 1983. – № 10. – С. 49–56.
110. Вожов, В. И. Закономерности распространения многолетнемёрзлых пород на Сибирской платформе / В. И. Вожов, А. И. Сурнин // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. – Новосибирск, 1982. – С. 5–8.
111. Волков, Н. Г. Методики оценки температуры формирования ионно-солевого состава криопэггов / Н. Г. Волков, И. А. Комаров, М. В. Мироненко и др. // Криосфера Земли. – 2005. – Т. IX, № 4. – С. 54–61.

112. Волкова, В. П. Химический состав природных вод Мирнинского района Якутской АССР / В. П. Волкова // Мерзлотные исследования. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1971. – Вып. 11. – С. 152–160.
113. Всеволожский, В. А. Основы гидрогеологии / В. А. Всеволожский. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 351 с.
114. Втюрин, Б. И. Подземные льды СССР / Б. И. Втюрин. – Москва : Наука, 1975. – 213 с.
115. Гасанов, Ш. Ш. Криолитологический анализ / Ш. Ш. Гасанов. – Москва : Наука, 1981. – 112 с.
116. Гензель, Г. Н. Консервация карьера «Мир» и защита рудника от затопления в период перехода на подземный способ добычи / Г. Н. Гензель, Б. П. Воропаев, М. В. Якушенко [и др.] // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 219–230.
117. Гензель, Г. Н. Исследование процесса закачки дренажных рассолов рудника «Айхал» в многолетнемёрзлые породы / Г. Н. Гензель, Н. Ф. Карачевцев, В. В. Лобанов // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 249–251.
118. Геокриологический словарь. – Москва : ГЕОС, 2003. – 140 с.
119. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / под ред. Э. Д. Ершова. – Москва : Недра, 1989. – 515 с.
120. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / под ред. Э. Д. Ершова. – М. : Недра, 1989. – 414 с.
121. Геологический словарь : в 2 т. Т. 2. – М. : Недра, 1978. – 455 с.
122. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А. Э. Конторовича, В. С. Суркова, А. А. Трофимука. – М. : Недра, 1981. – 552 с.
123. Геология СССР : в 18 т. Т. XVIII, ч. I : Геологическое описание. Кн. 1 / Недра. – Москва, 1970. – 536 с.
124. Геология Якутской АССР. – М. : Недра, 1981. – 300 с.
125. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антеклизы. – Якутск : Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1986. – 176 с.
126. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых : в т. Т. 4 : Сибирская платформа / под ред. Н. С. Малича, В. Л. Масайтиса, В. С. Суркова. – Недра, 1987. – 448 с.
127. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода : в 5 т. Т. 2 : Система вода-порода в условиях гипергенеза / С. Л. Шварцев и др. ; отв. ред. Б. Н. Рыженко. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
128. Геоэкология Севера (введение в геокриоэкологию). – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 270 с.

129. Гидрогеологические исследования за рубежом / под ред. Н. А. Маринова. – М. : Недра, 1982. – 428 с.
130. Гидрогеология / под ред. В. М. Шестакова, М. С. Орлова. – М. : Изд во Моск. ун та, 1984. – 317 с.
131. Гидрогеология Азии / под ред. Н. А. Маринова. – М. : Недра, 1974. – 576 с.
132. Гидрогеология СССР : в т. Т. 20 : Якутская АССР. – М. : Недра, 1970. – 384 с.
133. Гидрогеология СССР. Сводный том. Вып. 1 : Основные закономерности распространения подземных вод на территории СССР. – М. : Недра, 1976. – 656 с.
134. Гиниятулин, И. М. Материалы к легенде Ботуобинской серии листов геологических карт масштаба 1 : 50 000 / И. М. Гиниятулин, Д. В. Блажкун, Е. И. Ивашина, Г. В. Коробков ; Министерство геологии РСФСР. – Мирный, 1989. – 70 с.
135. Гинсбург, Г. Д. О причинах низких пластовых давлений на севере Сибири / Г. Д. Гинсбург, А. Е. Гуревич, А. Д. Резник // Советская геология. – 1971. – № 9. – С. 45–58.
136. Гиттерман, К. Э. Термический анализ морской воды. Концентрирование соляных рассолов естественным вымораживанием / К. Э. Гиттерман // Труды Соляной лаборатории АН СССР. – 1937. – Вып. 5, ч. 1. – С. 5–23.
137. Глинка, Н. Л. Общая химия : учебное пособие для вузов / Н. Л. Глинка. – Москва : Интеграл-Пресс, 2002. – 728 с.
138. Гольдберг, В. М. Подземное захоронение промышленных сточных вод / В. М. Гольдберг, Н. П. Скворцов, Л. Г. Лукьянчикова. – Москва : Недра, 1994. – 282 с.
139. Готовцев, С. П. Прогноз эволюции многолетней мерзлоты при подземном захоронении высокоминерализованных подземных вод / С. П. Готовцев, И. В. Климовский, В. А. Михайлов [и др.] // Рациональное природопользование в криолитозоне. – Якутск : Институт мерзлотоведения СО РАН, 1992. – С. 63–71.
140. Грабовников, В. А. Использование недр для экологически безопасного подземного захоронения токсичных жидких отходов / В. А. Грабовников, Ю. С. Татарчук, Ю. К. Шипулин // Геоэкологические исследования и охрана недр. – 1995. – № 4. – С. 38–48.
141. Граусман, В. В. О пограничных слоях позднего докембрия и кембрия в разрезах глубоких скважин Западной Якутии / В. В. Граусман, В. П. Жерновский // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири : сборник научных трудов / Сибирское отделение АН СССР, Институт геологии и геофизики. – Новосибирск, 1988. – С. 61–75.
142. Гребнева, П. И. Адсорбция лития из рассолов Сибирской платформы / П. И. Гребнева, А. Г. Вахромеев, В. Н. Воробьёв // Материалы XV Всероссийского совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. – Тюмень, 1997. – С. 20.
143. Гринбаум, И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород / И. И. Гринбаум. – Москва : Недра, 1965. – 188 с.
144. Гунин, В. И. Оценка условий захоронения техногенных рассолов в мёрзлых породах на основе численного эксперимента / В. И. Гунин // Подземная гидросфера : материалы

Всероссийского совещания по подземным водам востока России. – Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2006. – С. 377–380.

145. Данилов, И. Д. Подземные льды / И. Д. Данилов. – Москва : Недра, 1990. – 140 с.

146. Данилов, Ю. Г. Месторождения алмазов в Якутии / Ю. Г. Данилов // Алмазы. Алмазодобывающая промышленность : сборник научно-технической информации. – 2012. – Вып. 2. – С. 5–7.

147. Даркович, Г. В. Состояние и перспективы разработки месторождений алмазов Мирнинского ГОКа / Г. В. Даркович, А. Н. Черепнов, А. С. Нечаев // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – Москва : Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 25–28.

148. Девяткин, В. Н. Результаты определения глубинного теплового потока на территории Якутии / В. Н. Девяткин // Региональные и тематические геокриологические исследования. – Новосибирск : Наука, 1975. – С. 148–150.

149. Девяткин, В. Н. Геотермические условия кимберлитовой трубки Юбилейная / В. Н. Девяткин, В. Ю. Шамшури // Мерзлотные исследования в осваиваемых районах СССР. – Новосибирск : Наука, 1980. – С. 79–82.

150. Девяткин, В. Н. Геотермия вмещающих пород карьера «Мир» (Западная Якутия) / В. Н. Девяткин, Р. И. Гаврильев // Строение и тепловой режим мёрзлых пород. – Новосибирск : Наука, 1981. – С. 76–79.

151. Девяткин, В. Н. Тепловой поток криолитозоны Сибири / В. Н. Девяткин. – Новосибирск : Наука, 1993. – 165 с.

152. Девяткин, В. Н. О связи между тепловыми потоками в мёрзлых и подстилающих талых породах в литосфере Саха-Якутии / В. Н. Девяткин, В. В. Ан // Криосфера Земли. – 1998. – Т. II, № 1. – С. 28–31.

153. Дзюба, А. А. Разгрузка рассолов Сибирской платформы / А. А. Дзюба. – Новосибирск : Наука, 1984. – 156 с.

154. Докембрийская геология СССР. – Ленинград : Наука, 1988. – 442 с.

155. Доржиева, Н. А. Изменение газодинамических условий рудника «Интернациональный» в результате опережающей дегазации массива / Н. А. Доржиева, А. М. Янников // Горнодобывающая промышленность в XXI веке: вызовы и реальность : сборник тезисов докладов. – Мирный, 2021. – С. 167–168.

156. Достовалов, Б. Н. Общее мерзлотоведение / Б. Н. Достовалов, В. А. Кудрявцев. – Москва : Издательство Московского университета, 1967. – 404 с.

157. Дроздов, А. В. Особенности гидрогеологического строения и гидрохимической зональности кимберлитовой трубки «Удачная» / А. В. Дроздов, К. Н. Егоров, С. П. Готовцев, И. В. Климовский // Комплексные мерзлотно-гидрогеологические исследования. – Якутск : Институт мерзлотоведения СО АН СССР, 1989. – С. 145–155.

158. Дроздов, А. В. Особенности миграции рассолов в мёрзлой толще при подземном захоронении / А. В. Дроздов, С. В. Алексеев // Материалы XIII Всесоюзного совещания по подземным водам Востока СССР. – Иркутск – Томск, 1991. – С. 200.
159. Дроздов, А. В. Особенности миграции рассолов при их подземном захоронении / А. В. Дроздов, С. П. Готовцев // Формирование подземных вод криолитозоны. – Якутск : Институт мерзлотоведения СО РАН, 1992. – С. 31–48.
160. Дроздов, А. В. Оценка водопроницаемости техногенного талика при захоронении стоков в многолетнемёрзлых породах / А. В. Дроздов, Т. И. Дроздова // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XVII совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск – Красноярск : Издательство Иркутского технического университета, 2003. – С. 113–115.
161. Дроздов, А. В. К вопросу о формировании криогидрогеологических структур Сибирской платформы / А. В. Дроздов // Наука и образование. – 2004. – № 4. – С. 62–69.
162. Дроздов, А. В. Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемёрзлые породы (на примере Удачинского ГОКа в Западной Якутии) / А. В. Дроздов // Геоэкология. – 2005. – № 3. – С. 234–243.
163. Дроздов, А. В. Структурно-тектонические критерии оценки приёмистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии / А. В. Дроздов // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X, № 2. – С. 27–45.
164. Дроздов, А. В. Захоронение промышленных соков горнодобывающих предприятий АК «АЛРОСА» в криолитосфере / А. В. Дроздов // Горный журнал. – 2006. – № 6. – С. 12–15.
165. Дроздов, А. В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемёрзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы) / А. В. Дроздов. – Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2007. – 296 с.
166. Дроздов, А. В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии / А. В. Дроздов, Н. А. Иост, В. В. Лобанов. – Иркутск : Издательство ИрГТУ, 2008. – 507 с.
167. Дроздов, А. В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы) / А. В. Дроздов. – Якутск : Издательство Северо-Восточного федерального университета, 2011. – 416 с.
168. Дубиков, Г. И. Состав и криогенное строение мёрзлых толщ Западной Сибири / Г. И. Дубиков. – Москва : ГЕОС, 2002. – 246 с.
169. Дукарт, Ю. А. К вопросу о возрасте среднепалеозойских отложений Мархинской впадины / Ю. А. Дукарт, Г. В. Коробков // Геология и геофизика. – 1973. – № 2. – С. 15–20.
170. Егоров, К. Н. Контактные взаимоотношения кимберлитов разных фаз внедрения в сложнопостроенных трубках / К. Н. Егоров // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. – 1985. – № 9. – С. 23–35.
171. Ершов, Э. Д. Криолитогенез / Э. Д. Ершов. – Москва : Недра, 1982. – 212 с.

172. Ершов, Э. Д. Геокриологические аспекты подземного захоронения средне- и низкорadioактивных отходов / Э. Д. Ершов, О. М. Лисицина, С. Ю. Пармузин // Вестник Московского университета. Серия 4 : Геология. – 1995. – № 6. – С. 37–52.

173. Ершов, Э. Д. Проблемы захоронения радиоактивных отходов в криолитозоне / Э. Д. Ершов, С. Ю. Пармузин, О. М. Лисицина // Геоэкология. – 1995. – № 5. – С. 20–36.

174. Ершов, Э. Д. Многолетнемёрзлые породы как среда захоронения экологически опасных отходов / Э. Д. Ершов, С. Ю. Пармузин, О. М. Лисицина // Геоэкология. – 1997. – № 1. – С. 23–39.

175. Ершов, Э. Д. Прогноз процессов взаимодействия жидких техногенных рассолов, захороняемых в массиве мёрзлых пород / Э. Д. Ершов, И. А. Комаров, Е. М. Чувиллин // Геоэкология. – 1997. – № 2. – С. 19–29.

176. Ершов, Э. Д. Общая геокриология : учебник / Э. Д. Ершов. – Москва : Издательство Московского университета, 2002. – 682 с.

177. Ефимов, А. И. Гидрогеологические особенности района месторождения алмазов трубки «Мир» в Юго-Западной Якутии / А. И. Ефимов // II Совещание по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири. – 1959. – Вып. 2. – С. 79–89.

178. Железняк, И. И. Динамика криогенных процессов в грунтах и оценка их воздействия на устойчивость оснований сооружений в Забайкалье : автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук : специальность 04.00.07 «Гидрогеология» / И. И. Железняк ; Читинский институт природных ресурсов. – Чита, 1996. – 46 с.

179. Железняк, М. Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы : диссертация на соискание учёной степени доктора геолого-минералогических наук : специальность 25.00.08 «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение» / М. Н. Железняк ; Институт мерзлотоведения СО РАН. – Якутск, 2002. – 337 с.

180. Железняк, М. Н. Геолого-геокриологические условия Верхне-Мунского алмазного рудного поля на этапе завершения разведки / М. Н. Железняк, М. М. Шац // Недропользование XXI век. – 2019. – № 4 (80). – С. 46–55.

181. Железняк, М. Н. Криотеплофизические условия освоения месторождения алмазов «Айхал» (Северо-Западная Якутия) / М. Н. Железняк, М. М. Шац // Экономика природопользования. – 2022. – № 5. – С. 4–20.

182. Зайцев, И. К. Основы структурно-гидрогеологического районирования СССР / И. К. Зайцев, Н. И. Толстихин // Материалы по региональной и поисковой гидрогеологии. – Ленинград : Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. – 1963. – Т. 101. – С. 5–35.

183. Зайцев, И. К. Гидрогеохимия СССР / И. К. Зайцев. – Ленинград : Недра, 1986. – 239 с.

184. Зелинская, Е. В. Теоретические аспекты использования гидроминерального сырья / Е. В. Зелинская, Ю. В. Воронина. – Москва : Академия естествознания, 2009. – 118 с.

185. Зинчук, Н. Н. Тектоника и алмазоносный магматизм / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев ; Акционерная компания «АЛРОСА», Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие (ЯНИГП) ЦНИГРИ, Воронежский государственный университет. – Воронеж : Воронежский государственный университет, 2004. – 281 с.

186. Зуев, В. М. Создание экологически безопасной системы защиты горных работ от подземных вод / В. М. Зуев, Л. А. Сафонов, А. Т. Солопанов // Разведка и охрана недр. – 1990. – № 12. – С. 39–42.

187. Зуева, И. Н. Химическая структура нафтидов Далдыно-Алакитского района (по данным ИК- и УФ-спектроскопии) / И. Н. Зуева. – Якутск : Издательство Якутского филиала СО АН СССР, 1987. – С. 99–110.

188. Иванов, А. В. Влияние криогенных процессов на формирование гидрокарбонатных натриевых вод / А. В. Иванов, Н. А. Власов // Гидрохимические материалы. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1974. – Т. 61. – С. 55–61.

189. Иванов, Д. В. Геологическое строение и вещественный состав кимберлитового тела «Январское» (Далдыно-Алакитский алмазоносный район) / Д. В. Иванов, А. В. Толстов, В. В. Иванов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2018. – № 5. – С. 39–43.

190. Игнатович, Н. К. Зональность, формирование и деятельность подземных вод в связи с развитием геоструктуры / Н. К. Игнатович // Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Сб. 13. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1950. – С. 6–22.

191. Иост, Н. А. Гидрогеологическая характеристика отложений толбачанской свиты в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / Н. А. Иост, А. М. Янников // Молодёжь и научно-технический прогресс в современном мире: сб. докл. VIII-й Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Мирный, 2017. – С. 201–205.

192. Калинин, В. И. Подготовка обводнённых кимберлитовых трубок к подземной отработке / В. И. Калинин, В. Н. Власов, Н. П. Крамсков // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 231–234.

193. Карцев, А. А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений / А. А. Карцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1972. – 280 с.

194. Карцев, А. А. Гидрогеология нефтегазоносных районов / А. А. Карцев, С. Б. Вагин, В. М. Матусевич. – М.: Недра, 1986. – 224 с.

195. Карцев, А. А. Типы и эволюция геогидродинамических систем / А. А. Карцев, В. В. Колодий, В. А. Кудряков, Р. Г. Семашов // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1971. – № 6. – С. 122–127.

196. Каменский, Г. Н. Гидрогеология СССР / Г. Н. Каменский, Н. И. Толстихин, М. М. Толстихина. – М. : Госгеолтехиздат, 1959. – 366 с.

197. Катасонов, Е. М. Исследования состава и криогенного строения многолетнемёрзлых горных пород / Е. М. Катасонов // Полевые геокриологические (мерзлотные) исследования. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – С. 78–92.
198. Катасонов, Е. М. Закономерности развития криогенных явлений / Е. М. Катасонов // Актуальные вопросы советской географической науки. – М. : Наука, 1972. – С. 28–35.
199. Катасонов, Е. М. Типы мерзлых толщ и проблемы криолитологии / Е. М. Катасонов // Геокриологические и гидрогеологические исследования Сибири. – Якутск, 1972. – С. 5–16.
200. Кирюхин, В. А. Региональная гидрогеология / В. А. Кирюхин, Н. И. Толстихин. – М. : Недра, 1987. – 382 с.
201. Кирюхин, В. А. Региональная гидрогеология : учебник для вузов / В. А. Кирюхин. – СПб. : Изд-во СПбГИ (ТУ), 2005. – 344 с.
202. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых / Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов Российской Федерации (ГКЗ). – М., 1997. – 16 с.
203. Климентов, П. П. Методика гидрогеологических исследований / П. П. Климентов, В. М. Кононов. – М. : Высшая школа, 1978. – 408 с.
204. Климовский, И. В. Об особенностях температурного режима ММП района кимберлитовой трубки Удачная / И. В. Климовский, З. Г. Устинова // Многолетнемёрзлые породы и сопутствующие им явления на территории Якутской АССР. – М. : АН СССР, 1962. – С. 96–106.
205. Климовский, И. В. О природе аномалий температуры мёрзлых толщ в Западной Якутии / И. В. Климовский // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО АН СССР, 1983. – С. 54–65.
206. Климовский, И. В. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции / И. В. Климовский, С. П. Готовцев. – Новосибирск : Наука, 1994. – 167 с.
207. Климовский, И. В. Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки “Удачная” / И. В. Климовский, С. П. Готовцев, В. В. Шепелев // Криосфера Земли. – 2002. – Т. VI, № 3. – С. 45–50.
208. Ковальский, В. В. Обзор представлений о закономерностях размещения проявлений кимберлитового магматизма / В. В. Ковальский, Ф. Ф. Брахфогель // Структурный контроль проявления кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы. – Новосибирск : Наука, 1974. – С. 5–11.
209. Колганов, В. Ф. Коренные месторождения алмазов Западной Якутии : справочное пособие / В. Ф. Колганов, А. Н. Акишев. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2011. – 215 с.
210. Колганов, В. Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии / В. Ф. Колганов, А. Н. Акишев, А. В. Дроздов. – Мирный, 2013. – 558 с.

211. Колосов, П. Н. Стратиграфическая схема верхнего докембрия газоносного района Юго-Западной Якутии / П. Н. Колосов, В. И. Авдеева // Бюл. НТИ. – Якутск, 1979. – С. 3–7.
212. Колосов, П. Н. Стратиграфия верхнекембрийских и нижнекембрийских отложений Ботуобинского газоносного района Юго-Западной Якутии / П. Н. Колосов, В. И. Авдеева и др. // Стратиграфия нефтегазоносных отложений Якутии. – Якутск, 1988. – С. 3–35.
213. Комплексная переработка поликомпонентных литиеносных рассолов с предварительным их обогащением по литию / под ред. Н. П. Коцупало; ЗАО «Экостар-Наутех». – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2014. – 172 с.
214. Кононов, А. М. Солёные воды и рассолы Оленёкского криоартезианского бассейна : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / А. М. Кононов. – Иркутск, 2009. – 18 с.
215. Кононов, А. М. Гидрогеохимические особенности криолитозоны Далдынского и Верхне-Мунского кимберлитовых полей / А. М. Кононов, С. В. Алексеев // Подземная гидросфера: материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2006. – С. 69–73.
216. Кононова, Р. С. О роли процессов криогенеза в формировании региональной зональности на примере подземных вод Якутии / Р. С. Кононова // Материалы VI совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск-Хабаровск, 1970. – С. 42–43.
217. Кононова, Р. С. Криопэги – отрицательнотемпературные воды Земли / Р. С. Кононова, Я. В. Неизвестнов, Н. И. Толстихин, О. Н. Толстихин // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1971. – Вып. 11. – С. 75–88.
218. Кононова, Р. С. Криогенная метаморфизация подмерзлотных вод Восточно-Сибирской артезианской области / Р. С. Кононова // Советская геология. – 1974. – № 3. – С. 106–115.
219. Кононова, Р. С. Криогенные факторы формирования химического состава подземных вод и особенности гидрогеохимической зональности территории мёрзлой зоны / Р. С. Кононова // Проблемы теоретической и региональной гидрогеохимии. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – Кн. 1. – С. 119–123.
220. Конторович, Э. Л. Общая теория нафтидогенеза. Базисные концепции, пути построения / Э. Л. Конторович // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа. – Новосибирск : Наука, 1991. – С. 29–44.
221. Косолапов, А. И. Геохимические исследования природных вод и газов Западной Якутии / А. И. Косолапов. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 207 с.
222. Косыгин, Ю. А. Основы тектоники / Ю. А. Косыгин. – М. : Недра, 1974. – 215 с.
223. Коцупало, Н. П. Химия и технология получения соединений лития из литиеносного и гидроминерального сырья / Н. П. Коцупало, А. Д. Рябцев. – Новосибирск : Академическое изд-во «ГЕО», 2008. – 291 с.

224. Крайнов, С. Р. Геохимия редких элементов в подземных водах (в связи с геохимическими поисками месторождений) / С. Р. Крайнов. – М. : Недра, 1973. – 295 с.
225. Крайнов, С. Р. Гидрохимия : учебное пособие / С. Р. Крайнов, В. М. Швец. – М. : Недра, 1992. – 463 с.
226. Крайча, Я. Газы в подземных водах / Я. Крайча. – М. : Недра, 1990. – С. 23–42.
227. Кривоногова, Н. Ф. Развитие талика под водохранилищем в условиях кондуктивного теплообмена / Н. Ф. Кривоногова, С. В. Соболев, А. В. Февралев // Геоэкология. – 1994. – № 3. – С. 95–98.
228. Крицук, Л. Н. Подземные льды Западной Сибири / Л. Н. Крицук. – М. : Научный мир, 2010. – 352 с.
229. Кудрявцев, В. А. Взаимодействие подземных вод с многолетнемёрзлыми породами / В. А. Кудрявцев, Н. Н. Романовский, А. Б. Чижов // Гидрогеология и инженерная геология. – М. : Наука, 1972. – С. 57–63.
230. Кузьмин, Г. П. Подземные сооружения в криолитозоне / Г. П. Кузьмин. – Новосибирск : Наука, 2002. – 176 с.
231. Лапин, А. В. Петрогеохимические особенности кимберлитов Средне-Мархинского района в связи с проблемой геохимической неоднородности кимберлитов / А. В. Лапин, А. В. Толстов, В. Б. Василенко // Геохимия. – 2007. – № 12. – С. 1292–1304.
232. Лепин, В. С. Генезис кальция рассолов Сибирской платформы (по данным об изотопном составе стронция) / В. С. Лепин, В. Н. Борисов // Проблемы региональной гидрогеохимии : материалы межведомственного совещания. – Ленинград, 1979. – С. 115–116.
233. Легостаева, Я. Б. Гидрогеологические условия и геоэкологическая ситуация на территории подземных техногенных хранилищ при утилизации дренажных рассолов Удачинского горно-обогатительного комбината / Я. Б. Легостаева, В. Ф. Попов, М. И. Ксенофонтова // Отечественная геология. – 2018. – № 5. – С. 93–102.
234. Лобанов, В. В. Изменение гидрогеологических условий на одном из месторождений алмазов в процессе водопонижения / В. В. Лобанов, А. В. Дроздов, А. Т. Солопанов // XII Всесоюзное совещание по подземным водам Востока СССР : тезисы докладов. – Иркутск – Южно-Сахалинск, 1988. – С. 129–130.
235. Лобанов, В. В. Прогнозирование геологических структур для захоронения агрессивных рассолов в многолетнемёрзлых породах / В. В. Лобанов, А. В. Дроздов, Ю. Д. Молчанов // Горный журнал. – 1995. – № 10. – С. 21–24.
236. Лобанов, В. В. О возможности вовлечения в подземную отработку дополнительных запасов руды на месторождении трубки «Интернациональная» / В. В. Лобанов, Н. П. Крамсков, А. П. Филатов и др. // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. – М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2002. – С. 235–239.

237. Лобанов, В. В. Решение задач охраны недр и окружающей среды в реализуемом проекте консервации карьера «Мир» / В. В. Лобанов, Ю. В. Мищенко, М. К. Сороченко и др. // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА»: современное состояние и перспективы решения. – Мирный : Изд-во ООО «Мирнинская городская типография», 2003. – С. 345–350.

238. Ломоносов, И. С. Вертикальная гидрохимическая зональность в районе месторождения алмазов трубки Мир / И. С. Ломоносов // Материалы по гидрогеологии месторождений полезных ископаемых Восточной Сибири. – Иркутск, 1962. – Вып. 9. – С. 67–83.

239. Ломтадзе, В. Д. Словарь по инженерной геологии / В. Д. Ломтадзе. – СПб. : Изд-во СПб горн. ин-та, 1999. – 360 с.

240. Лутц, Б. Г. Глубоко эродированные зоны разломов Анабарского щита / Б. Г. Лутц, В. С. Оксман. – М. : Наука, 1990. – 250 с.

241. Лукьянов, А. Е. Формирование современной гидродинамической структуры Петропавловского рудного поля (Южный Урал) : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / А. Е. Лукьянов. – Екатеринбург, 2008. – 20 с.

242. Макаров, В. Н. Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутии / В. Н. Макаров // География и природные ресурсы. – 2010. – № 1. – С. 45–48.

243. Макаров, В. Н. Влияние подземного захоронения рассолов трубки Удачная на гидрогеохимию речных вод / В. Н. Макаров, А. А. Семерня, Н. В. Торговкин // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии : материалы конференции (Якутск, 22–28 июня 2015 г.). – Якутск : Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2015. – С. 214–216.

244. Макаров, В. Н. Гидрогеохимические особенности отработки алмазоносных россыпей / В. Н. Макаров // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : материалы третьей Всероссийской научной конференции с международным участием (Чита, 20–25 августа 2018 г.) / отв. ред. Л. В. Замана, С. Л. Шварцев. – Чита : Бурятский научный центр СО РАН, 2018. – С. 354–356.

245. Макаров В. Н. Влияние подземного захоронения дренажных рассолов алмазоносной трубки Удачная на химический состав поверхностных вод / В. Н. Макаров, Н. В. Торговкин // Сергеевские чтения : Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Пермь, 02–04 апреля 2019 года / Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха и др. Том Выпуск 21. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2019. – С. 321–325.

246. Масловская, М. Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса : автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук / М. Н. Масловская. – Иркутск, 1985. – 20 с.

247. Медведев, М. Л. Научно-методические вопросы определения границ карьера при поэтапной разработке крутопадающих месторождений / М. Л. Медведев, В. Г. Васильев, Ю. И. Колдырев, А. Н. Акишев // ГИАБ. – 2004. – № 10. – С. 189–197.

248. Мельников, В. П. Криогенные образования в литосфере Земли (изобразительная версия) / В. П. Мельников, В. И. Спесивцев. – Новосибирск : НИЦ ОИГГМ СО РАН, 2000. – 343 с.
249. Мельников, Н. В. Палеогеография Сибирской платформы в раннем кембрии / Н. В. Мельников, В. А. Асташкин, Л. И. Килина, Б. Б. Шишкин // Палеогеография фанерозоя Сибири. – Новосибирск : СНИИГиМС, 1989. – С. 10–17.
250. Мельников, Н. В. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и её складчатого обрамления / Н. В. Мельников, М. С. Якшин, Б. Б. Шишкин и др. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2005. – 428 с.
251. Мельников, П. И. Криосфера как водообменная система / П. И. Мельников, Г. В. Воропаев, А. А. Шарбатян // Доклады АН СССР. – 1984. – Т. 279, № 3. – С. 587–590.
252. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. – Новосибирск : Наука, 1984. – 191 с.
253. Методика мерзлотной съёмки. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1979. – 358 с.
254. Методы битуминологических исследований: задачи исследований и пути их разработки : методическое пособие / под ред. В. А. Успенского. – Ленинград : Недра. Ленингр. отделение, 1975. – 319 с.
255. Милашев, В. А. Кимберлитовые провинции / В. А. Милашев. – Л. : Недра, 1974. – 238 с.
256. Милашев, В. А. Структуры кимберлитовых полей / В. А. Милашев. – Л. : Недра, 1979. – 183 с.
257. Мингазов, Д. Т. Первые находки палеозойских кимберлитов в центральной части Анабарского щита / Д. Т. Мингазов, Л. Е. Голота, В. А. Истомина // Доклады РАН. – 1996. – Т. 347, № 1. – С. 72–76.
258. Минорин, В. Е. Оценка и разведка коренных месторождений алмазов / В. Е. Минорин, Д. Н. Гречишников, Ю. И. Горохов и др. – М. : ЦНИГРИ, 2000. – 196 с.
259. Мироненко, В. А. Опыт захоронения дренажных рассолов в многолетнемёрзлых породах при разработке месторождения трубки Удачная / В. А. Мироненко, Ф. Г. Атрощенко, В. В. Лобанов и др. // Горный журнал. – 1995. – № 10. – С. 25–27.
260. Молчанов, Ю. Д. Составление физико-геологической модели участков захоронения дренажных вод карьера трубки Удачная (1992–1993) / Ю. Д. Молчанов, С. М. Халитова, С. П. Готовцев. – Якутск, 1993. – 70 с.
261. Михайлов, М. В. Стратиграфия верхнего кембрия, ордовика, силура бассейна среднего течения р. Вилюй / М. В. Михайлов, Ю. И. Тесаков // Геология и геофизика. – 1972. – № 1. – С. 32–42.
262. Мощанский, В. А. Некоторые данные о строении верхней части многолетнемёрзлой толщи в пределах Лено-Вилюйского водораздела / В. А. Мощанский, А. В. Мулина // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1961. – Вып. II. – С. 115–128.

263. Овчинников, А. М. Общая гидрогеология / А. М. Овчинников. – М. : Госгеолтехиздат, 1955. – 383 с.
264. Оловин, Б. А. Фильтрационная проницаемость вечномёрзлых грунтов / Б. А. Оловин. – Новосибирск : Наука, 1993. – 257 с.
265. Основные типы гидрогеологических структур СССР / под ред. И. К. Зайцева // Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. – 1974. – Т. 229. – 92 с.
266. Основы геокриологии (мерзлотоведения). Часть I. Общая геокриология / под ред. П. Ф. Швецова. – М. : Изд-во АН СССР, 1959. – 460 с.
267. Основы геокриологии. Часть 1. Физико-химические основы геокриологии. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1995. – 368 с.
268. Основы геокриологии. Часть 2. Литогенетическая геокриология. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996. – 397 с.
269. Основы геокриологии. Часть 3. Региональная и историческая геокриология Мира. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 575 с.
270. Основы геокриологии. Часть 4. Динамическая геокриология. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 688 с.
271. Основы геокриологии. Часть 5. Инженерная геокриология. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1999. – 526 с.
272. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. – Новосибирск : Наука, 1980. – 225 с.
273. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. – Новосибирск : Наука, 1982. – 286 с.
274. Основы гидрогеологии. Гидрогеодинамика. – Новосибирск : Наука, 1983. – 241 с.
275. Основы гидрогеологии. Использование и охрана подземных вод. – Новосибирск : Наука, 1983. – 231 с.
276. Павлов, В. А. Эколого-гидрогеологические проблемы отработки месторождения трубки «Удачная» / В. А. Павлов, А. Т. Солопанов, В. И. Уральский // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XIV совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск : ИЗК СО РАН, 1994. – С. 63.
277. Павлова, Н. А. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно межмерзлотно стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия) / Н. А. Павлова, В. В. Шепелев, А. А. Галанин, В. С. Ефремов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 4. – С. 391–401.
278. Павлова, Н. А. Минеральные лечебные подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / Н. А. Павлова, В. В. Шепелев, М. В. Данзанова [и др.] // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 236–247.
279. Пиннекер, Е. В. Некоторые замечания о терминологии / Е. В. Пиннекер // II Международная конференция по мерзлотоведению. Доклады и сообщения. Вып. 8. – Якутск, 1973. – С. 270–271.

280. Пиннекер, Е. В. Значение изотопных определений при изучении месторождений подземных вод // Месторождения подземных вод Иркутской области / Е. В. Пиннекер. – Л. : Недра, 1974. – С. 14–31.
281. Пиннекер, Е. В. Гидрогеология – наука о подземной гидросфере // Водные ресурсы. – 1975. – № 4. – С. 130–133.
282. Пиннекер, Е. В. Проблемы региональной гидрогеологии. (Закономерности распространения и формирования подземных вод) / Е. В. Пиннекер. – М. : Наука, 1977. – 196 с.
283. Пиннекер, Е. В. Особенности взаимодействия подземных вод и многолетнемёрзлых пород / Е. В. Пиннекер, Б. И. Писарский // Региональная гидрогеология и инженерная геология Восточной Сибири. – Новосибирск : Наука, 1978. – С. 21–27.
284. Пиннекер, Е. В. Подземная гидросфера / Е. В. Пиннекер. – Новосибирск : Наука, 1984. – 159 с.
285. Пиннекер, Е. В. Новые данные об изотопном составе кислорода и водорода рассолов Сибирской платформы / Е. В. Пиннекер, В. Н. Борисов, Ю. И. Кустов и др. // Водные ресурсы. – 1987. – № 3. – С. 105–115.
286. Пиннекер, Е. В. Подземные воды мёрзлой зоны литосферы в условиях интенсивной техногенной нагрузки / Е. В. Пиннекер, С. В. Алексеев // Современные проблемы гидрогеологии (V Толстихинские чтения, 11–13 ноября 1996 г.). – Санкт-Петербург, 1996. – С. 44–46.
287. Пиннекер, Е. В. Гидрогеология и гидрогеохимия центральной части Якутской алмазоносной провинции / Е. В. Пиннекер, С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева // Проблемы региональной гидрогеологии (VII Толстихинские чтения, 11–12 ноября 1998 г.). – Санкт-Петербург, 1998. – С. 32–36.
288. Пиннекер, Е. В. Изотопы стронция в рассолах Сибирской платформы / Е. В. Пиннекер, С. Л. Шварцев // Доклады РАН. – 1996. – Т. 351, № 1. – С. 109–111.
289. Пиннекер, Е. В. Экологические проблемы гидрогеологии / Е. В. Пиннекер. – Новосибирск : Наука, 1999. – 128 с.
290. Плотников, Н. И. Техногенные изменения гидрогеологических условий / Н. И. Плотников. – М. : Недра, 1989. – 270 с.
291. Подчасов, В. М., Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения / В. М. Подчасов, В. Е. Минорин, И. Я. Богатых и др. – Якутск : ЯФ ГУ «Издательство СО РАН», 2004. – 548 с.
292. Порохняк, А. М. Захоронение жидких отходов в криолитозоне / А. М. Порохняк, А. В. Рассудов. – М. : Недра, 1993. – 112 с.
293. Посохов, Е. В. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические) / Е. В. Посохов, Н. И. Толстихин. – Л. : Недра, 1977. – 240 с.
294. Потехина, И. А. Разломно-блоковое строение и кимберлитовые тела Алакит-Мархинского алмазоносного поля: тектонофизический анализ: диссертация ... кандидата

геолого-минералогических наук: 25.00.03 / И. А. Потехина; [Место защиты: Ин-т земной коры СО РАН]. – Иркутск, 2010. – 163 с.

295. Похиленко, Н. П. Мегакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской платформы: минералогия, геохимические особенности и проблема происхождения / Н. П. Похиленко, Н. В. Соболев, Ф. Р. Бойд, Д. Г. Пирсон, Н. Шимизу // Геология и геофизика. – 1993. – Т. 34, № 1. – С. 71–84.

296. Резников, А. А. Методы анализа природных вод / А. А. Резников, Е. П. Муликовская, И. Ю. Соколов. – М. : Недра, 1970. – 488 с.

297. Розен, О. М. Якутская кимберлитовая провинция: положение в структуре Сибирского кратона, особенности состава верхней и нижней коры / О. М. Розен, В. П. Серенко, З. В. Специус и др. // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 1. – С. 3–26.

298. Романовский, Н. Н. Схема подразделения подземных вод области распространения многолетнемёрзлых горных пород / Н. Н. Романовский // Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. – М. : Наука, 1966. – С. 28–41.

299. Романовский, Н. Н. Некоторые особенности мерзлотно-гидрогеологического строения артезианских бассейнов открытого типа в области многолетней мерзлоты / Н. Н. Романовский // Мерзлотные исследования. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1968. – Вып. VIII. – С. 89–111.

300. Романовский, Н. Н. Особенности изучения подземных вод области развития многолетнемёрзлых пород / Н. Н. Романовский // Методика комплексной мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съёмки. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1970. – С. 175–218.

301. Романовский, Н. Н. Подземные воды криолитозоны / Н. Н. Романовский; под ред. В. А. Всеволожского. – М. : Изд-во МГУ, 1983. – 232 с.

302. Романовский, Н. Н. Основы криогенеза литосферы / Н. Н. Романовский. – М. : Изд-во МГУ, 1993. – 335 с.

303. Руководство по анализу битумов и рассеянного органического вещества горных пород (для лабораторий геологоразведочных организаций) / ред. А. И. Горская, К. Ф. Родионова, В. А. Успенский, А. И. Шишкова. – Л. : Недра, 1966. – 316 с.

304. Савельев, Б. А. Методы изучения мёрзлых пород и льдов / Б. А. Савельев. – М. : Недра, 1985. – 222 с.

305. Сердюков, Л. И. О природе поглощающей способности многолетнемёрзлых пород при захоронении в них дренажных рассолов / Л. И. Сердюков, Е. Л. Артемьева, Е. В. Строганова и др. // Горный журнал. – 1996. – № 7–8. – С. 5–12.

306. Серебряков, Е. В. Разрывная структура коренных месторождений алмаза Накынского кимберлитового поля (на основе трёхмерных моделей): диссертация ... кандидата геолого-

минералогических наук: 25.00.11 / Е. В. Серебряков; [Место защиты: Ин-т геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН]. – Иркутск, 2018. – 150 с.

307. Сидкина, Е. С. Равновесие подземных рассолов западной части Тунгусского артезианского бассейна с минералами вмещающих пород / Е. С. Сидкина, Д. А. Новиков, С. Л. Шварцев // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 364. – С. 187–192.

308. Славин, В. И. О гидрогеологических условиях района Мархинской опорной скважины на южном склоне Анабарской антеклизы / В. И. Славин // Геология и нефтегазоносность Западной Якутии. – Л. : Недра, 1966. – С. 240–251.

309. Соломонов, Н. М. Состояние компонентов водной экосистемы верховьев реки Муна до начала промышленного освоения месторождения алмазов / Н. М. Соломонов, И. Г. Собакина, М. И. Ксенофонта // Проблемы региональной экологии. – 2018. – № 5. – С. 106–110.

310. Солопанов, А. Т. Мерзлотно-гидрогеологические условия массива Томтор / А. Т. Солопанов, А. В. Толстов // Криолитозона и подземные воды Сибири: Подземные воды и наледи. – Якутск: ИМЗ СО РАН, 1996. – С. 87–94.

311. Строение земной коры Анабарского щита / О. М. Розен, А. Н. Вишневский, М. З. Глуховский и др. – М. : Наука, 1986. – 198 с.

312. Степанов, В. М. Региональная гидрогеология Восточной Сибири и Дальнего Востока: учеб. пособие / В. М. Степанов. – Иркутск: ИПИ, 1981. – 95 с.

313. Степанов, В. М. Введение в структурную гидрогеологию: учеб. пособие / В. М. Степанов; Иркут. политехн. ин-т. – Иркутск: ИПИ, 1985. – 103 с.

314. Тагильцев, С. Н. Основы гидрогеомеханического анализа фильтрационной структуры скальных массивов: дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.08 / С. Н. Тагильцев; Ур. гос. горн.-геолог. акад., Каф. гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии. – Екатеринбург, 2001. – 356 с.

315. Теоретические основы нефтегазовой гидрогеологии / А. А. Карцев, Ю. П. Гаттенбергер, Л. М. Зорькин и др.; под ред. А. А. Карцева. – М.: Недра, 1992. – 208 с.

316. Термо- и геомеханика алмазных месторождений / А. А. Козеев, В. Ю. Изаксон, Н. К. Звонарев; отв. ред. А. В. Самохин; РАН, ИГДС, АК «Алмазы России – Саха», Ин-т Якутнiproалмаз. – Новосибирск: Наука; Сиб. издат. фирма РАН, 1995. – 244 с.

317. Толстихин, Н. И. Якутский артезианский бассейн / Н. И. Толстихин, В. М. Максимов // Записки Ленинградского горного института. – 1955. – Т. 31, вып. 2. – С. 18–24.

318. Толстихин, Н. И. Принципы структурно-гидрогеологического районирования территории Сибири / Н. И. Толстихин // Региональная гидрогеология Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск, 1962. – С. 2–9.

319. Толстихин, Н. И. Гидрогеология области многолетнемерзлых пород СССР / Н. И. Толстихин, Н. А. Вельмина, А. И. Ефимов // Доклады на международной конференции по мерзлотоведению. – Москва : Изд-во АН СССР, 1963. – С. 158–166.

320. Толстихин, О. Н. Об одном своеобразном типе артезианских бассейнов зоны многолетнемёрзлых пород / Н. И. Толстихин // Доклады Академии наук СССР. – 1965. – Т. 163, № 6. – С. 1463–1466.
321. Толстихин, Н. И. Гидрогеология Земли и криосфера / Н. И. Толстихин // Подземные воды Сибири и Дальнего Востока. – Москва : Наука, 1971. – С. 28–33.
322. Толстихин, Н. И. Криогенез и водоносность гидрогеологических структур / Н. И. Толстихин, О. Н. Толстихин // Очерки по гидрогеологии Сибири. – Новосибирск : Наука, 1973. – Вып. VI. – С. 21–29.
323. Толстихин, Н. И. Подземные и поверхностные воды территории распространения мёрзлой зоны / Н. И. Толстихин, О. Н. Толстихин // Общее мерзлотоведение. – Новосибирск : Наука, 1974. – С. 192–229.
324. Толстихин, Н. И. Подземные воды мёрзлой зоны СССР / Н. И. Толстихин, О. Н. Толстихин // II Международная конференция по мерзлотоведению : доклады и выступления. – Якутск, 1975. – Вып. 8. – С. 73–87.
325. Толстихин, Н. И. Криосфера и криопэги / Н. И. Толстихин // Известия вузов. Геология и разведка. – 1982. – № 3. – С. 115–117.
326. Тулисова, К. Ю. Моделирование процесса растворения грунтов основания дамбы гидротехнического сооружения атмосферными водами / К. Ю. Тулисова, Т. А. Кулешова, А. М. Янников, Н. В. Юркевич // Интерэкспо Гео-Сибирь. – Новосибирск, 2021. – С. 10–15.
327. Устинова, З. Г. К гидрохимии кимберлитов трубок Якутии // Вопросы геохимии подземных вод / З. Г. Устинова. – Москва : Недра, 1964. – С. 237–252.
328. Фёдоров, А. М. Лабораторные исследования разрушения льда и ледопородных монолитов рассолами / А. М. Фёдоров // Условия и процессы криогенной миграции вещества. – Якутск, 1989. – С. 83–96.
329. Филин, В. А. Гидрогеологические условия утилизации слабосолёных вод на алмазных месторождениях Якутии (на примере трубки «Удачная») / В. А. Филин, Ф. Г. Атрощенко // 7 Сергеевские чтения. Инженерно-геологические и геоэкологические проблемы утилизации и захоронения отходов. – Вып. 7. – Москва : ГЕОС, 2005. – С. 205–209.
330. Фотиев, С. М. Роль химического состава и минерализации подземных вод в процессе промерзания водоносных комплексов Сибирской платформы / С. М. Фотиев // Труды ПНИИИС. – 1971. – Вып. 11. – С. 55–62.
331. Фотиев, С. М. Гидрогеотермические особенности криогенной области СССР. / С. М. Фотиев. – Москва : Наука, 1978. – 236 с.
332. Фотиев, С. М. Схема гидрогеокриологического районирования территории СССР платформы / С. М. Фотиев // Известия вузов. Геология и разведка. – 1990. – № 9. – С. 76–85.
333. Фотиев, С. М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод. / С. М. Фотиев. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2009. – 266 с.

334. Фукс, А. Б. Причины различных пластовых давлений в газоконденсатных залежах Непского свода / А. Б. Фукс, Б. А. Фукс // Геология нефти и газа. – 1976. – № 10. – С. 48–54.
335. Хархордин, И. Л. Моделирование процессов тепло- и массопереноса при закачке солёных вод и рассолов в многолетнемёрзлые породы / И. Л. Хархордин, Ф. Г. Атрощенко // Проблемы поисковой и экологической геохимии. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – С. 281–284.
336. Харьков, А. Д. История алмаза / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, В. М. Зуев. – Москва : Недра, 1997. – 601 с.
337. Харьков, А. Д. Коренные месторождения алмазов мира / А. Д. Харьков, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков. – Москва : Недра, 1998. – 555 с.
338. Черкасов, Р. В. Охрана водных ресурсов при осушении алмазных месторождений / Р. В. Черкасов, Л. Д. Синкевич // Горный журнал. – 1995. – № 3. – С. 58–59.
339. Чижов, А. Б. Изменение геологической среды криолитозоны при хозяйственном освоении / А. Б. Чижов, Ю. В. Ванько, А. Ю. Деревягин // Инженерная геология. – 1990. – № 5. – С. 76–82.
340. Шваров, Ю. В. Алгоритмизация метода численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов / Ю. В. Шваров // Геохимия. – 1999. – № 6. – С. 646–652.
341. Шварцев, С. Л. Источники кальция, стронция и бария крепких и сверхкрепких рассолов хлоридно-кальциевого типа / С. Л. Шварцев // Геология и геофизика. – 1973. – № 6. – С. 23–30
342. Шварцев, С. Л. Особенности формирования микрокомпонентного состава подземных вод зоны криогенеза (на примере западной части Сибирской платформы) / С. Л. Шварцев, Н. Г. Шубенин // Геология и геофизика. – 1973. – № 11. – С. 69–74.
343. Шварцев, С. Л. К проблеме самоорганизации геологической системы вода-порода / С. Л. Шварцев // Геология и геофизика. – 1995. – № 4. – С. 22–29.
344. Шварцев, С. Л. О роли горных пород в формировании крепких рассолов хлоридно-кальциевого типа / С. Л. Шварцев, М. Б. Букаты // Доклады Российской академии наук. – 1995. – Т. 342, № 4. – С. 530–533.
345. Шварцев, С. Л. Общая гидрогеология : учебник для вузов. / С. Л. Шварцев. – Москва : Недра, 1996. – 423 с.
346. Шварцев, С. Л. Геологическая система вода-порода / С. Л. Шварцев // Вестник РАН. – 1997. – № 6. – С. 518–524.
347. Шварцев, С. Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода-горная порода и её внутренняя геологическая эволюция / С. Л. Шварцев // Литосфера. – 2008. – № 6. – С. 3–24.
348. Шепелёв, В. В. Классификация подземных вод криолитозоны // Тезисы докладов Всесоюзного совещания по подземным водам Востока СССР (X Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Часть I. / В. В. Шепелев. – Иркутск, 1982. – С. 16–17.

349. Шепелёв, В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны, их подразделение и характеристика / В. В. Шепелёв // Проблемы геокриологии. – Москва : Наука, 1983. – С. 239–244.
350. Шепелёв, В. В. Геокриологические условия формирования и классификация надмерзлотных вод / В. В. Шепелёв // Формирование подземных вод криолитозоны. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 1992. – С. 3–14.
351. Шепелёв, В. В. Надмерзлотные воды. Особенности формирования и распространения : учебное пособие / В. В. Шепелёв. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 1995. – 48 с.
352. Шепелёв, В. В. К понятию о криолитосфере Земли / В. В. Шепелёв. – Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 1997. – 72 с
353. Шепелёв, В. В. Надмерзлотные воды криолитозоны / В. В. Шепелёв. – Новосибирск : Академическое издательство «Гео», 2011. – 169 с.
354. Шепелёв, В. В. О специфических мерзлотно-гидрогеологических условиях района трубки «Мир» / В. В. Шепелёв, М. Н. Железняк, Н. А. Павлова // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2019. – Т. 24, № 3. – С. 80–87.
355. Шепелева, Н. Н. Взаимосвязь битумо- и газонасыщенности осадочной толщи пород Далдыно-Алакитского района / Н. Н. Шепелева, В. И. Краевский, В. И. Федоров // Геологические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. Экспресс-информация. – Москва : ВИЭМС, 1984. – Вып. 6. – С. 15–25.
356. Якупов, В. С. Мощность мёрзлой толщи на Анабарском кристаллическом массиве (по данным ВЭЗ) / В. С. Якупов, А. А. Алиев, О. В. Демченко [и др.] // Геофизические методы исследования мёрзлых толщ. – Якутск : Якутское книжное издательство, 1976. – С. 12–21.
357. Янников, А. М. Геохимические особенности и физико-химические параметры подземных вод и вертикальная гидрохимическая зональность в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, В. Л. Бочаров // Молодёжь и научно-технический прогресс в современном мире : сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Мирный, 2017. – С. 260–263.
358. Янников, А. М. Газоносность отложений толбачанской свиты в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, О. А. Голованев // Естественные и технические науки. – Москва, 2018. – № 10. – С. 83–88.
359. Янников, А. М. Зависимость интенсивности самоизлива рассолов от буровзрывных работ в районе трубки «Интернациональная» / А. М. Янников, О. А. Голованев // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2018. – № 3. – С. 111–113.
360. Янников, А. М. Инженерно-геологическая характеристика пород олекминской и толбачанской свит в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, А. О. Голованев // Современные проблемы и опыт гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследований на

территории Центрально-Чернозёмного региона : материалы региональной научно-практической конференции. – Воронеж, 2018. – С. 146–152.

361. Янников, А. М. Влияние атмосферного давления на интенсивность самоизлива природных рассолов из малодебитных коллекторов толбачанской и эльгянской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия)) на примере скважины 1Д / А. М. Янников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, 2018 г. : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск, 2018. – С. 295–298.

362. Янников, А. М. Литологическая характеристика вмещающих пород в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, А. О. Голованев // 20-е чтения памяти П. Н. Чирвинского : сборник докладов. – Пермь, 2018. – С. 199–203.

363. Янников, А. М. Влияние литологического и петрографического состава пород осадочного чехла на микрокомпонентный состав поверхностных вод в пределах Мирнинского кимберлитового поля / А. М. Янников, Е. В. Дагаева // Молодёжь и научно-практический прогресс в современном мире : сборник тезисов IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Мирный, 2018. – С. 150.

364. Янников, А. М. Влияние атмосферного давления на интенсивность самоизлива природных рассолов из малодебитных коллекторов толбачанской и эльгянской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия)) на примере скважины 5Д / А. М. Янников // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии : материалы XXIX молодежной научной школы-конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К. О. Кратца и академика РАН Ф. П. Митрофанова. – Петрозаводск, 2018. – С. 326–329.

365. Янников, А. М. Газодинамическая характеристика коллекторов во внешнем контуре месторождения «трубка Интернациональная» / А. М. Янников // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2018. – № 4. – С. 98–101.

366. Янников, А. М. Гидрогеологическая характеристика пород эльгянской, нелбинской и юрегинской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля (на примере околотрубочного массива вмещающих пород трубки «Интернациональная») / А. М. Янников // Эффективность геологоразведочных работ на алмазы : сборник докладов V Всероссийской научно-практической конференции. – Мирный, 2018. – С. 335–339.

367. Янников, А. М. Изменения коэффициента проводимости в околотрубочном пространстве кимберлитовой трубки «Интернациональная» / А. М. Янников // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2018. – № 4. – С. 98–101.

368. Янников, А. М. Влияние атмосферного давления на интенсивность самоизлива природных рассолов из малодебитных коллекторов толбачанской и эльгянской свит в пределах Мирнинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия)) на примере скважины 2Д / А. М. Янников, Л. Ю. Янникова, Ю. Ю. Янникова // Геологи XXI века : сборник докладов

XVIII Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов. – Саратов, 2018. – С. 98–100.

369. Янников, А. М. Режим и параметры самоизлива природных рассолов толбачанской свиты по сети опытных скважин гор.-790 рудника Интернациональный в 2017 году / А. М. Янников, Л. Ю. Янникова, Ю. Ю. Янникова // Сибирская конференция молодых учёных по наукам о Земле : сборник докладов IX Сибирской конференции. – Новосибирск, 2018. – С. 730–732.

370. Янников, А. М. Интенсивность и продолжительность движения пластовых вод из малодобитных коллекторов толбачанской свиты / А. М. Янников // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2018. – № 1. – С. 139–141.

371. Янников, А. М. Анализ воздействия обратной закачки на гидродинамический режим Метегеро-Ичерского водоносного комплекса в пределах Мало-Ботуобинского алмазоносного района / А. М. Янников, Л. Ю. Янникова, Ю. Ю. Янникова // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий : сборник докладов VII Всероссийского симпозиума, посвящённого 50-летию Читинского отделения Российского минералогического общества. – Чита, 2018. – С. 178–182.

372. Янников, А. М. Инженерно-геологическая характеристика пород эльгянской свиты в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, Ю. Ю. Янникова // Комплексные проблемы техносферной безопасности : материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвящённой Году культуры безопасности. – Воронеж, 2018. – С. 105–108.

373. Янников, А. М. Обратная закачка как один из самых экологически безопасных способов утилизации агрессивных дренажных вод / А. М. Янников, Ю. Ю. Янникова // Современные проблемы и опыт гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследований на территории Центрально-Чернозёмного региона : материалы региональной научно-практической конференции. – Воронеж, 2018. – С. 146–152.

374. Янников, А. М. Режим и интенсивность самоизлива насыщенных природных рассолов толбачанской свиты / А. М. Янников, Ю. Ю. Янникова // Геология в развивающемся мире : сборник докладов XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Пермь, 2018. – С. 284–287.

375. Янников, А. М. Влияние глубинных разломов на фильтрационные свойства подоозёрных таликовых пород в условиях сплошного распространения многолетнемёрзлых пород / А. М. Янников, Ю. Ю. Янникова // Современные проблемы и опыт гидрогеологических, инженерно-геологических и эколого-геологических исследований на территории Центрально-Чернозёмного региона : материалы региональной научно-практической конференции. – Воронеж, 2019. – С. 54–56.

376. Янников, А. М. Режим и параметры самоизлива природных рассолов толбачанской свиты по сети опытных скважин гор.-790 рудника Интернациональный в 2018 году /

А. М. Янников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, 2019 г. : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск, 2019. – С. 233–235.

377. Янников, А. М. Характеристика каустобиолитов толбачанской свиты в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Интернациональная» / А. М. Янников // Естественные и технические науки. – Москва, 2019. – № 6. – С. 99–103.

378. Янников, А. М. Коррелирование наблюдаемой интенсивности самоизлива природных рассолов толбачанской и эльгянской свит с изменением атмосферного давления (на примере скважины 7Д) / А. М. Янников // Естественные и технические науки. – Москва, 2019. – № 12. – С. 153–156.

379. Янников, А. М. Влияние малоамплитудной тектоники на гидродинамические и ёмкостные параметры коллекторов толбачанской свиты / А. М. Янников // Геология в развивающемся мире : сборник докладов XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Пермь, 2019. – С. 428–431.

380. Янников, А. М. К проблеме экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника «Интернациональный» / А. М. Янников, В. Л. Бочаров // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2019. – № 4. – С. 99–103.

381. Янникова, С. А. Особенности формирования зон разгрузки рассолов НоБК в карьерном поле трубки Юбилейная / С. А. Янникова, А. М. Янников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, 2021 г. : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск, 2019. – С. 453–455.

382. Янников, А. М. Влияние природных и техногенных факторов на интенсивность самоизлива природных рассолов из малодебитных коллекторов толбачанской и эльгянской свит в околотрубочном массиве месторождения трубка «Интернациональная» (Республика Саха (Якутия)) / А. М. Янников // Строение литосферы и геодинамика : материалы XXVIII Всероссийской молодёжной конференции. – Иркутск, 2019. – С. 189–191.

383. Янников, А. М. Особенности формирования зон разгрузки рассолов НоБК в подземных горных выработках рудника Айхал / А. М. Янников // Геология в развивающемся мире : сборник докладов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Пермь, 2020. – С. 502–504.

384. Янников, А. М. Характер и динамика газопроявлений во вмещающих породах, в зоне динамического воздействия ультраосновного магматизма (на примере месторождений Мирнинского кимберлитового поля) / А. М. Янников, А. В. Корзун // Новые идеи в геологии нефти и газа. Новая реальность 2021 : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. – Москва, 2021. – С. 709–713.

385. Янников, А. М. Проблемы развития системы обратной закачки в пределах Малоботуобинского алмазоносного района / А. М. Янников // Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск, 2021. – С. 453–455.

386. Янников, А. М. Формирование рассолопоглощающих коллекторов в толще ММП, на примере участка «Ботуобинский» (Республика Саха (Якутия)) / А. М. Янников, А. Т. Ильков // Геология и недропользование. ЕСОЭН. – Москва, 2021. – № 4. – С. 64–73.

387. Янников, А. М. Глубинные разломы – определяющий фактор формирования гидрогеологических условий коренных месторождений алмазов / А. М. Янников, С. А. Янникова, И. В. Зырянов // Наука и техника в Якутии. – Якутск, 2021. – № 1. – С. 14–17.

388. Янников, А. М. Влияние тектонических нарушений на проектируемые системы опережающего водопонижения на примере таликов в карьерном поле трубки «Юбилейная» / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. Ю. Корепанов // Сборник тезисов докладов: Горнодобывающая промышленность в XXI веке: вызовы и реальность. – Мирный, 2021. – С. 161–162.

389. Янников, А. М. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газоносность глубоких горизонтов трубки "Айхал" (Республика Саха (Якутия)) / А. М. Янников, Н. С. Трифонов, О. Е. Лепокурова // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2021. – № 1. – С. 104–113. – DOI 10.17308/geology.2021.1/3342.

390. Янников, А. М. Проблемы и перспективы развития гидрогеологической службы АК «АЛРОСА» / А. М. Янников, А. Ю. Корепанов, И. В. Зырянов // Горный журнал. – 2021. – № 5. – С. 30–34. – DOI 10.17580/gzh.2021.05.01.

391. Янников, А. М. Дегазационное бурение как эффективный способ разгрузки карбонатных коллекторов вмещающих толщ коренных месторождений алмазов / А. М. Янников, А. В. Харченко // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 6. – С. 88–94. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-6-88-94.

392. Янников, А. М. Гидродинамическая характеристика удачинской свиты в околотрубочном массиве трубки «Удачная» (РС (Якутия)) / А. М. Янников // Строение литосферы и геодинамика : материалы XXIX Всероссийской молодёжной конференции. – Иркутск, 2021. – С. 302–304.

393. Янников, А. М. Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля / А. М. Янников. – Мирный : Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. – 240 с.

394. Янников, А. М. Изменение коэффициента водопроницаемости Метегеро-Ичерского водоносного комплекса в пределах Мирнинского кимберлитового поля (Якутия) / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. Ю. Корепанов // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2021. – № 3. – С. 96–103.

395. Янников, А. М. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка "Ноябрьский" (рудник "Айхал") / А. М. Янников, С. А. Янникова, М. Ю. Овчинникова, А. Ю. Корепанов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 284–299. – DOI 10.17072/psu.geol.20.3.284.

396. Янников, А. М. Влияние разрывных нарушений на условие проходки подземных горных выработок на примере трубки Айхал / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. С. Стручкова //

Сборник тезисов докладов: Горнодобывающая промышленность в XXI веке: вызовы и реальность. – Мирный, 2021. – С. 165–166.

397. Янников, А. М. Изменение макрокомпонентного состава пластовых вод толбачанской свиты на месторождении трубка «Интернациональная» / А. М. Янников, С. А. Янникова // Материалы VI Всероссийской молодежной научной конференции, посвящённой памяти академика Н. Л. Добрецова. – Улан-Удэ, 2021. – С. 152–153.

398. Янников, А. М. Моделирование гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса после возобновления добычных работ на месторождении "Мир" / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. Ю. Корепанов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2022. – № 1. – С. 90–99. – DOI 10.17308/geology.2022.1/9103.

399. Янников, А. М. Влияние разрывных нарушений на систему опережающей дегазации проектируемого рудника "Мир" / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. В. Харченко // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 10. – С. 73–78. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-10-73-78. Импакт-фактор SJR – 0,29; объем публикации: 0,6 п.л.; вклад соискателя: 0,3 п.л.

400. Янников, А. М. Литологическая и инженерно-геологическая характеристика пород толбачанской свиты в пределах шахтного поля трубки Мир / А. М. Янников, С. А. Янникова, М. Ю. Овчинникова, А. Ю. Корепанов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 1. – С. 34–44. – DOI 10.17072/psu.geol.21.1.34.

401. Янников, А. М. Влияние тектонических нарушений на проектируемые системы опережающего водопонижения на примере трубки "Юбилейная" / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. Ю. Корепанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 5-2. – С. 174–186. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_52\_0\_174.

402. Янников, А. М. Моделирование гидродинамического режима метегеро-ичерского водоносного комплекса после возобновления добычных работ на месторождении "Мир" / А. М. Янников, С. А. Янникова, А. Ю. Корепанов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2022. – № 1. – С. 90–99. – DOI 10.17308/geology.2022.1/9103.

403. Янников, А. М. Изменение гидрогеологических характеристик толбачанской свиты в пределах шахтных полей трубок «Мир» и «Интернациональная» / А. М. Янников, С. А. Янникова // Известия Уральского государственного горного университета. – 2022. – № 1. – С. 118–126.

404. Янников, А. М. Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынского кимберлитового поля / А. М. Янников, И. В. Зырянов, А. Ю. Корепанов, А. С. Стручкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 9. – С. 60–73. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2022\_9\_0\_60.

405. Янников, А. М. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод / А. М. Янников, С. А. Янникова, И. В. Зырянов, А. Ю. Корепанов // Горная промышленность. – 2022. – № 1. – С. 76–81. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-1-76-81.

406. Янников, А. М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля / А. М. Янников. – Мирный : Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. – 132 с.
407. Янников, А. М. Особенности формирования дезинтегрированных толщ в открытых горных выработках в зонах ММП / А. М. Янников // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России, 2022 г. : сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции. – Якутск, 2022. – С. 513–515.
408. Янников, А. М. Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля / А. М. Янников. – Мирный : Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2023. – 305 с.
409. Янников, А. М. Криогидрогеологические условия как ключевой фактор при проектировании систем водоотведения на примере кимберлитовых трубок Западной Якутии / А. М. Янников, И. В. Зырянов, А. Ю. Корепанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 5. – С. 112–129. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_112.
410. Янников, А. М. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал» / А. М. Янников, А. С. Стручкова, А. Ю. Корепанов // Науки о Земле и недропользование. – 2023. – Т. 46, № 1(82). – С. 20–35. – DOI 10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35.
411. Янников, А. М. Особенности гидрогеологического моделирования цифровых двойников эксплуатируемых коренных месторождений алмазов и сопряженных участков закачки / А. М. Янников, А. С. Стручкова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 6. – С. 71–78. – DOI 10.31857/S0869780923060097.
412. Янников, А. М. Перспективы использования силурийских карбонатных толщ Алакит-Мархинского кимберлитового поля для закачки дренажных вод / А. М. Янников, А. С. Стручкова, М. Ю. Овчинникова // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 2. – С. 107–120. – DOI 10.17072/psu.geol.21.2.107.
413. Янников, А. М. Вертикальная гидрогеологическая зональность в пределах Далдынского кимберлитового поля / А. М. Янников // Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России», 2023 г. – Якутск, 2023. – С. 481–485.
414. Янников, А. М. Влияние структурно-тектонического фактора на формирование криогидрогеологических условий Накынского кимберлитового поля / А. М. Янников // Материалы VI Международной научной конференции, посвящённой 50-летию Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН: геодинамика и минерагения Северной Евразии. – Улан-Удэ, 2023. – С. 609–612.
415. Янников, А. М. Перспективы использования высокоминерализованных дренажных вод в качестве гидроминерального сырья на примере коренных месторождений алмазов Западной Якутии / А. М. Янников // Геология и недропользование. ЕСОЭН. – Москва, 2023. – № 3. – С. 40–46.

416. Янников, А. М. Перспективы использования коллекторов нижнекембрийского водоносного комплекса для развития системы закачки рудника «Удачный» / А. М. Янников // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2023. – № 2. – С. 104–115. – DOI 10.17308/geology/1609-0691/2023/2/104-115.

417. Янников, А. М. Перспективы использования многолетнемерзлых пород Далдынского кимберлитового поля для закачки дренажных вод трубок Зарница и Удачная / А. М. Янников // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2023. – № 2. – С. 43–55. – DOI 10.31857/S0869780923020108.

418. Янников, А. М. Способы утилизации дренажных рассолов, реализуемые на предприятиях АК АЛРОСА в зависимости от криогидрогеологических условий кимберлитового поля / А. М. Янников // Современная гидрогеология: актуальные вопросы науки, практики и образования : труды Всероссийской научной конференции с международным участием. – Москва, 2023. – С. 530–535.

419. Янников, А. М. Формирование зон высокой водопроницаемости в зонах динамического воздействия ультраосновного магматизма / А. М. Янников // V Всероссийская научная конференция с международным участием имени профессора С. Л. Шварцева : материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием. – Томск, 2023. – С. 354–357.

420. Янников, А. М. Газодинамическая характеристика пород удачинской свиты (Є1-2) в пределах шахтного поля трубки Удачная (Республика Саха (Якутия)) / А. М. Янников, Д. Г. Дмитриев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2024. – № 1. – С. 118–128. – DOI 10.17308/geology/1609-0691/2024/1/118-128.

421. Янников, А. М. Гидрогеологическое сопровождение горных работ при отработке кимберлитовых месторождений криолитозоны Западной Якутии / А. М. Янников, И. В. Зырянов, А. Ю. Корепанов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2024. – № 7. – С. 169–179. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2024\_7\_0\_169.

422. Янников, А. М. Перспективы использования инженерно-геофизических методов на гидроузле реки Ирелях (Западная Якутия) / А. М. Янников, М. С. Полицинский, С. А. Великин // Вестник Пермского университета. Геология. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 136–144. – DOI 10.17072/psu.geol.23.2.136.

423. Янников, А. М. Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия) / А. М. Янников, А. Ю. Корепанов, А. С. Стручкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 61–72. doi: 10.18799/24131830/2024/9/4455

424. Янникова, С. А. Газодинамическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов шахтного поля трубки "Мир" / С. А. Янникова, А. М. Янников // Науки о Земле и

недропользование. – 2021. – Т. 44, № 3(76). – С. 293–300. – DOI 10.21285/2686-9993-2021-44-3-293-300.

425. Янникова, С. А. Литологическая характеристика вмещающих пород глубоких горизонтов в околотрубочном пространстве месторождения трубка «Мир» / С. А. Янникова, А. М. Янников // Геологический международный студенческий саммит : сборник материалов. – Санкт-Петербург, 2022. – С. 67–72.

426. Янникова, С. А. Изменение гидродинамического режима толбачанского водоносного комплекса в процессе отработки кимберлитовой трубки «Мир» / С. А. Янникова // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – Воронеж, 2022. – № 2. – С. 81–86.

427. Alexeev, S. V. Environmental effects of developing the diamond deposits of Western Yakutia / S. V. Alexeev // Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment. – Athens (Greece) – Rotterdam : Balkema, 1997. – Pp. 2303–2307.

428. Alexeev, S. V. The cryogenesis of groundwaters of the Daldyn-Alakit region (Western Yakutia) / S. V. Alexeev // Proceedings of the Fifth International Symposium on Cold Region Development. – Anchorage (Alaska) – Hanover (NH 03755-1290), 1997. – Pp. 369–372.

429. Alexeev, S. V. Permafrost zone of Daldyn-Alakit region. The problems of evolution and development / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // 28th Arctic Workshop. – Colorado (USA), 1998. – Pp. 301–304.

430. Alexeev, S. V. Dynamics of drainage water composition during development of diamond mining quarries (Western Yakutia, Russia) / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // 30th Arctic Workshop. – Colorado (USA), 2000. – Pp. 2–5.

431. Alexeev, S. V. Ground ice in the sedimentary rocks and kimberlites of Yakutia, Russia / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // Permafrost and Periglacial Processes. – John Wiley & Sons, Ltd., 2002. – Vol. 13. – Pp. 53–59.

432. Alexeev, S. V. The Peculiarities of Utilization of the Technogenic Waste into Permafrost / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // Proceedings of the 11th International Conference on Cold Regions Engineering (20–22 May 2002). – Anchorage (Alaska, USA), 2002. – Pp. 948–953.

433. Alexeev, S. V. Hydrogeochemistry of the permafrost zone in the central part of the Yakutian diamond-bearing province, Russia / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // Hydrogeology Journal. – Springer-Verlag, 2003a. – Vol. 11, No. 5. – Pp. 574–581.

434. Alexeev, S. V. The burial of drainage waters of Udachnaya kimberlite pipe into permafrost / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // Permafrost. – Vol. 1. – Lisse (Netherlands) : Swets & Zeitlinger, 2003b. – Pp. 1–4.

435. Alexeev, S. V. Geochemical and isotope features of brines of the Siberian platform / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva, O. Shouakar-Stash et al. // Proceedings of the 11th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-11) (27 June – 2 July 2004, Saratoga Springs, NY, USA). – Rotterdam : Balkema, 2004. – Pp. 333–336. Alexeev Sergey V., Alexeeva Ludmila P. & Kononov

Alexander M. Cryopegs in the Yakutian diamond-bearing province (Russia) / Groundwater quality sustainability/ Ed. P.Maloszewski, S. Witzczak & G. Malina. CRC Press/ Balkema. 2012. – Pp. 101–101.

436. Alexeev, S. V. Cryopegs in the Yakutian diamond-bearing province (Russia) / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva, A. M. Kononov // Groundwater Quality Sustainability / ed. by P. Maloszewski, S. Witzczak, G. Malina. – Boca Raton : CRC Press/ Balkema, 2012. – Pp. 101–107.

437. Alexeev, S. V. Technogenic processes in the brine-permafrost system / S. V. Alexeev, V. N. Borisov // Hydrological Science and Technology. – 1995. – Vol. 11, No. 1–4. – Pp. 169–173.

438. Alexeev, S. V. Interaction between brines and perennially frozen ground / S. V. Alexeev, V. N. Borisov // Proceedings of the International Symposium on Hydrogeology and the Environment. – Beijing : China Environmental Science Press, 2000. – Pp. 168–170.

439. Alexeev, S. V. The first experience of saline drainage water disposal from Udachnaya pipe quarry into permafrost / S. V. Alexeev, A. V. Drozdov, T. I. Drozdova et al. // 32nd Arctic Workshop (Colorado, USA), 2002. – Pp. 4–7.

440. Alexeev, S. V. Brines of the Siberian platform (Russia): geochemistry and processing prospects / S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva, A. G. Vakhromeev // Applied Geochemistry. – 2020. – Vol. 117. – P. 104588.

441. Borisov, V. N. Permafrost as a matter for burial of highly concentrated industrial waste / V. N. Borisov, S. V. Alexeev // Proceedings of the 7th International Congress of the International Association for Engineering Geology. – Rotterdam : Balkema ; Lisboa (Portugal), 1994. – Pp. 2385–2391.

442. Borisov, V. N. Brines – perennially frozen ground. Problems of interaction / V. N. Borisov, S. V. Alexeev // Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost (Extended Abstracts). – Yellowknife (Canada), 1998. – Pp. 117–118.

443. Borisov, V. N. The peculiarities and factors of brine (cryopeg)-permafrost interaction / V. N. Borisov, S. V. Alexeev // Proceedings of the 8th International Congress of the International Association for Engineering Geology (IAEG). – Rotterdam : Balkema ; Vancouver (Canada), 2000. – Pp. 3907–3911.

444. Chen, M. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model / M. Chen, A. Izady, O. A. Abdalla // Journal of Hydrology. – 2017. – Vol. 544. – Pp. 591–603.

445. Herzog, B. L. Hydrostratigraphic modeling of a complex, glacial-drift aquifer system for importation INTO MODFLOW / B. L. Herzog, D. R. Larson, C. Abert, S. D. Wilson, G. S. Roadcap // Ground Water. – 2003. – Vol. 41, No. 1. – P. 57.

446. Hughes, J. D. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability / J. D. Hughes, M. J. Russcher, C. D. Langevin, E. D. Morway, R. R. McDonald // Environmental Modelling & Software. – 2022. – Vol. 148. – P. 105257.

447. Huff G.F. Evolution of Li-enriched oilfield brines in Devonian carbonates of the south-central Alberta Basin, Canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 2016; 64 (3): 438–448. doi: <https://doi.org/10.2113/gscpgbull.64.3.438>

448. Huff, G. F. Evolution of Li-enriched oilfield brines in Devonian carbonates of the south-central Alberta Basin, Canada / G. F. Huff // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. – 2016. – Vol. 64, No. 3. – Pp. 438–448. – DOI: 10.2113/gscpgbull.64.3.438.

449. Kelson, V. Predicting collector well yields with MODFLOW / V. Kelson // *Ground Water*. – 2012. – Vol. 50, No. 6. – Pp. 918–926.

450. Lake, R. A. Salts rejection by sea ice during growth / R. A. Lake, E. L. Lewis // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – Vol. 75, No. 3. – Pp. 583–587.

451. Legostaeva, Ya. Geochemical risks of diamond mining in Siberia / Ya. Legostaeva, A. Gololobova, V. Popov // *Environmental Sciences Proceedings*. – 2021. – Vol. 5, No. 1. – P. 4.

452. Pinneker, E. V. The groundwaters of the permafrost zone under the conditions of man-made load / E. V. Pinneker, S. V. Alexeev // *Proceedings of the Fifth International Symposium on Cold Region Development*. – Hanover (NH 03755-1290, USA) ; Anchorage (Alaska, USA), 1997. – Pp. 353–355.

453. Pinneker, E. V. Grundwasserschutz in Permafrostgebieten / E. V. Pinneker, S. V. Alekseew // *Grundwasser*. – 2000. – Jg. 4, Heft 5. – Pp. 159–169.

454. Pinneker, E. V. Hydrogeology and Hydrogeochemistry of permafrost zone of Daldyn-Alakit region (Western Yakutia) / E. V. Pinneker, S. V. Alexeev, L. P. Alexeeva // *30th Arctic Workshop (Colorado, USA)*, 2000. – Pp. 134–136.

455. Pinneker, E. V. The interaction of brines and permafrost / E. V. Pinneker, S. V. Alexeev, V. N. Borisov // *Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction (WRI-6)*. – Rotterdam : Balkema ; Malvern (England), 1989. – Pp. 557–560.

456. Spencer, R. J. Origin of CaCl brines in Devonian formations, western Canada sedimentary basin / R. J. Spencer // *Applied Geochemistry*. – 1987. – Vol. 2, No. 4. – Pp. 373–384.

#### *Фондовая*

457. Валева П.В. Проект на геологическое изучение и оценку тектонических структур для обратной закачки дренажных и шахтных вод рудника «Мир» для расширения участка системы обратной закачки в 2019-2021гг. Мирный. Фонды ВГРЭ. 2019.

458. Власова Т.А. Отчёт о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботубинского алмазоносного района и прилегающей территории, за 2007-2009 гг. (объект «Режимный-Мир-8») в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2010.

459. Власова Т.А. Отчёт о результатах работ по ведению мониторинга подземных вод на площади Мало-Ботубинского алмазоносного района и прилегающей территории, за 2010-2012 гг. (объект «Режимный-Мир-9») в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2013.

460. Готовцев С.П., Шепелев В.В. и др. Отчет о НИР по договору с институтом «Якутнипроалмаз» по теме: «Мерзлотно-геотермический мониторинг подземного захоронения в

мерзлую толщу дренажных вод карьера трубки «Удачная». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Якутск, 2002

461. Готовцев С.П., Шепелев В.В. и др. Отчет о НИР по договору с институтом «Якутнипроалмаз» по теме: «Провести исследования динамики геотермических условий полигонов захоронения дренажных рассолов месторождения трубки «Удачная»». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Якутск, 2005

462. Готовцев С.П., Шепелев В.В. и др. Отчет о НИР по договору с институтом «Якутнипроалмаз» по теме: «Провести исследования динамики геотермических условий полигонов захоронения дренажных рассолов месторождения трубки «Удачная»». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Якутск, 2007

463. Гриков С.В. Янников А.М. Отчёт о результатах проведённых работ по поиску и оценке структур для обратной закачки дренажных вод рудника «Мир» в районе восточного разлома в 2015-2017 гг. Мирный. Фонды ВГРЭ. 2018.

464. Гриков С.В. Янников А.М. Отчет о результатах проведённых работ по опытно-промышленной эксплуатации ботубинского полигона захоронения высокоминерализованных дренажных вод карьеров трубок Нюрбинская и Ботубинская в 2011-2016 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

465. Гладков А.С. Научно-технический отчёт детальное картирование разломно-блоковой структуры месторождения трубки «Мир» для прогнозирования водопроявлений в подземные горные выработки рудника и развития гидрогеомеханических процессов. Иркутск. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2014.

466. Гладков А. С. Отчёт «Уточнить разломно-блоковое строение вмещающих пород трубок «Юбилейная» и «Комсомольская» по обнаженным откосам карьера в 2011-2012 гг. / Фонды ЯНА. – Мирный, 2013.

467. Загоруйко А.А., Янников А.М. Отчёт о результатах геологического изучения глубоких горизонтов трубки «Интернациональная» в интервале абсолютных отметок -1050 - -1250м с подсчетом запасов алмазов по состоянию на 01.01.2017г в 6-ти книгах(Объект «Глубокий-4») Лицензия ЯКУ № 15827 КП. Книга 4. Текст.результаты бурения скважины № 307 с комплексом гидрогеологических и геофизических исследований в районе трубки «Интернациональная» в 2015-2017 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017.

468. Ильин А. В. Отчёт о результатах бурения геолого-разведочных скважин в районе камеры РПП гор. -100 м и северо-восточного рудного тела рудника «Айхал» в абс. отм. /-100 м/ ÷ /-400 м/. / Фонды ВГРЭ. Мирный, 2019.

469. Ильков А. Т. Отчёт о результатах проведённых работ по поиску и оценке структур для закачки дренажных вод карьера «Юбилейный» в 2011-2013 гг. / Фонды МГРЭ. Мирный, 2014.

470. Иост Н.А. Отчёт о результатах бурения скважины № 306 с комплексом гидрогеологических и геофизических исследований в районе трубки Интернациональная в 2003-

2006 гг. (к материалам доразведки месторождения между горизонтами (-560)-(-690)м) (объект Глубокий) в 3-х книгах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2007.

471. Иост Н.А. Отчет по комплексному анализу работы системы обратной закачки дренажных вод карьера Мир за период 1990-2014 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

472. Корепанов А. Ю., Янников А.М. Отчёт научно методическое сопровождение горных работ на руднике «Айхал» с анализом и подготовкой материалов по обеспечению возможности эксплуатации выработок рудника «Айхал» в интервале -145/-400 м в негазовом режиме / Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2019.

473. Моров А. В. Отчёт определение таликовых зон на участке оз. Травянистое / Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2018.

474. Отчет о результатах проведённых работ по геологическому изучению и оценке пригодности участка недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых (поиск и оценка структур для закачки дренажных вод рудника «Удачный» на участке «Левобережный-2») в 2018-2019гг. Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, 2020.

475. Потуроев А. А., Голубева Т. В., Борисов Г. К., Авраменко В. И., Мосиенко Б. А. и др. Отчёт о результатах работ по теме «Структура кимберлитовых полей и тектонический контроль размещения кимберлитов Далдыно-Алакитского района» / Фонды АмГРЭ. Нюрба, 1974.

476. Потуроев А. А., Кружалова Е. Ф. и др. Отчёт о результатах работ по теме № 24 «Составление прогнозных карт для Далдыно-Алакитского района за 1975-1977 гг.» / Фонды АмГРЭ, 1977.

477. Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Заречный»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

478. Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Левобережный-2»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

479. Янников А. М. Отчёт «Разработать комплексную гидродинамическую модель двух участков закачки «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский Юго-восточный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

480. Янников А.М. Информационный отчёт о выполненных гидрогеологических работах с МГОК за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018

481. Янников А.М. Гидрогеологические условия месторождения Майское (Накынское кимберлитовое поле). Мирный. Фонды МГРЭ. 2015.

482. Янников А.М. Гриков С.В. Информационный отчёт о выполненных гидрогеологических работах на объектах Мирнинского ГОКа за 2015 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

483. Янников А.М. Заключение о гидрогеологических условиях месторождений Верхне-Мунского кимберлитового поля. Мирный. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2021.

484. Янников А.М. Заключение о составе, количестве и характере выделения взрывоопасных газов до отм. -1300 м рудника «Мир». Мирный. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2021.

485. Янников А.М. Заключение по оценке склонности пород глубоких горизонтов (до отм. -1250 м абс.) рудника «Мир» к газодинамическим явлениям (ГДЯ). Мирный. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2022.

486. Янников А.М. Информационный отчёт о выполненных опытно-эксплуатационных наливах на участке «Южный». Мирный. Фонды ВГРЭ. 2017.

487. Янников А.М. Информационный отчёт о результатах бурения контрольно-стволовой скважины по трассе слепого скипового ствола (ССС) рудника «Интернациональный». И дополнительных материалов к нему. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018

488. Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2013-2015 гг. Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

489. Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2016 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2017г.

490. Янников А.М. Информационный отчёт о результатах мониторинговых замеров по сети дегазационных скважин гор. -790 рудника «Интернациональный» за 2017 год. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018.

491. Янников А.М. О результатах гидрогеологического мониторинга и гидрогеологических исследований, выполненных по сети наблюдательных скважин нижнего бьефа плотины накопителя минерализованных вод на ручье Тымтайдах. Мирный. Фонды МГРЭ. 2018

492. Янников А.М. Заключение о количестве и характере притоков рассолов к выработкам рудника "Мир", при отработке запасов в интервале -565 м/-1250 м, с учётом структурно-тектонического и литолого-фациального строения карьерного поля. Мирный. Фонды Института «Якутнипроалмаз». 2021.

493. Янников А. М. Информационный отчёт о выполненных опытных наливах на участке «Заречный» / Фонды АГОК. Айхал, 2019.

494. Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Интернациональная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

495. Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Мир» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

496. Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

497. Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Удачная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

498. Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

499. Янников А. М. Отчёт «Разработать гидродинамическую модель участка закачки «Ноябрьский»» Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

500. Янников А. М. Отчёт о гидрогеологических условиях месторождения до отм.-820 м рудника «Удачный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2020.

501. Янников А. М. Отчёт о составе, количестве и характере выделения взрывоопасных газов до отм. -820 м абс. рудника «Удачный». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2020.

502. Янников А. М. Отчёт по комплексному анализу результатов работ по закачке шахтных и дренажных вод рудника «Удачный» на Киенгском участке за период 2012-2020 гг с оценкой его остаточной емкости и рекомендациями его дальнейшей эксплуатации. Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021

503. Янников А. М. Отчёт по комплексному анализу результатов строительных и опытных работ на участке «Заречный» с обоснованием его дальнейшего промышленного освоения. Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2022.

504. Яхин Ш.М., Янников А.М. и др. Отчёт с подсчётом запасов алмазов по коренному месторождению трубка Интернациональная (по состоянию на 01.01.2016 г). Мирный. Фонды МГРЭ. 2016.

ИНСТИТУТ «ЯКУТНИПРОАЛМАЗ»  
АК АЛРОСА (ПАО)

*На правах рукописи*

**Янников Алексей Михайлович**

**Структурная гидрогеология коренных алмазных месторождений Западной  
Якутии**

Специальность: 1.6.6. Гидрогеология

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

**Том 2. Приложения**

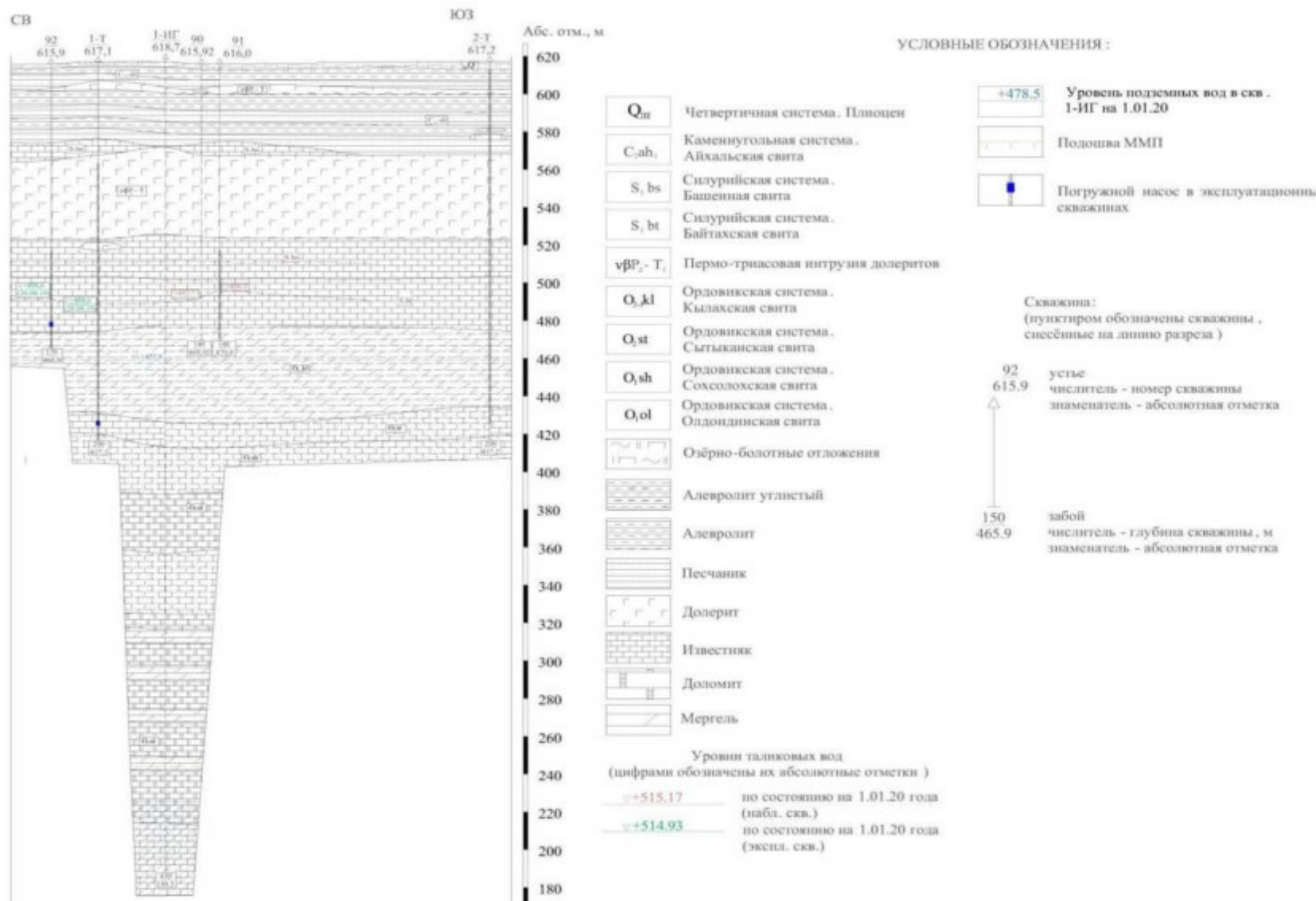
МИРНЫЙ – 2026

## Оглавление

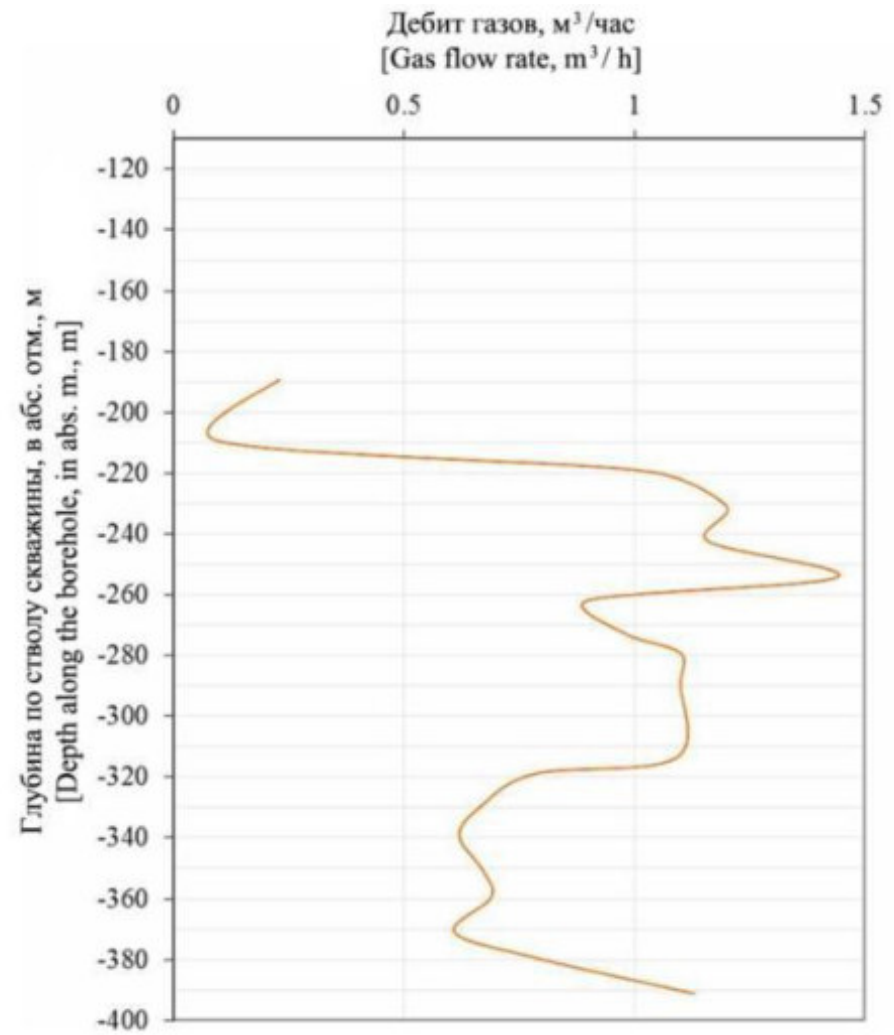
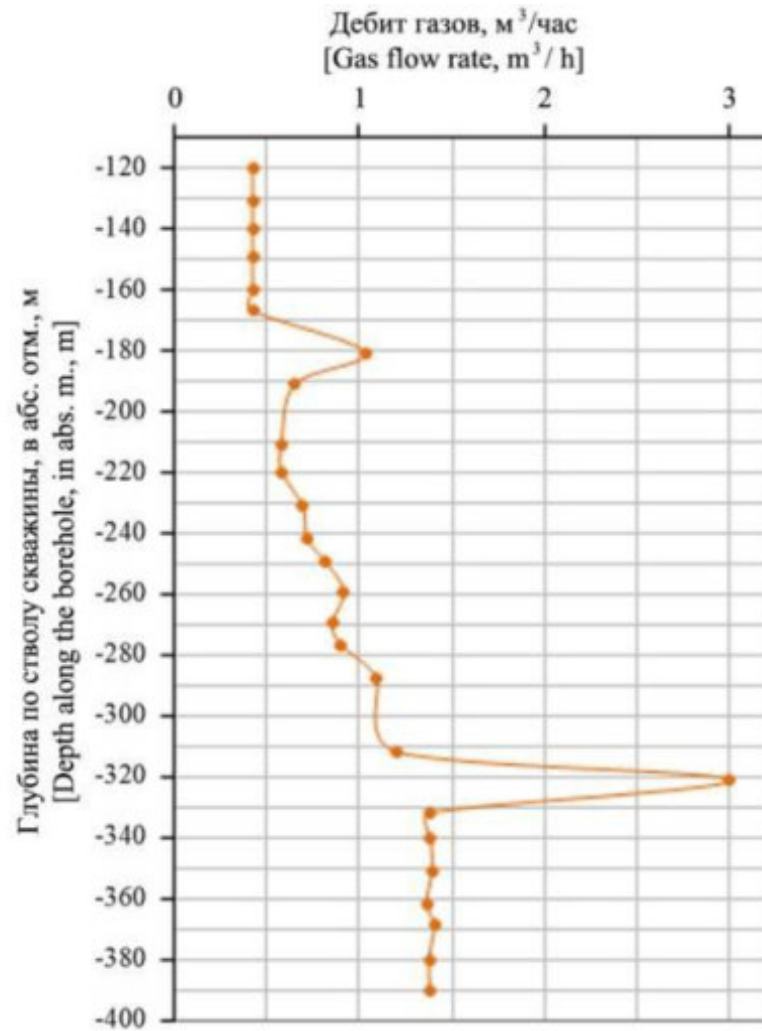
Приложение 1. Геолого-гидрогеологический разрез по талику оз. Травянистое.....	4
Приложение 2. Динамика изменения дебита пластовых газов в процессе бурения скважин. ....	5
Приложение 3. Динамика изменения дебита газа и рассола в разрезе верхнекембрийского водоносного комплекса .....	6
Приложение 4. Динамика изменения дебитов газа и рассолов на заданных глубинах коллекторов среднекембрийского водоносного комплекса.....	7
Приложение 5. Коллекторы толбачанской свиты, сгруппированные по величине пластового давления в неразгруженном массиве .....	8
Приложение 6. Динамика изменения дебита пластовых газов и природных рассолов по сети скважин, пробуренных на гор. -790 рудника тр. Интернациональная.....	9
Приложение 7. Химический состав водорастворенных газов .....	10
Приложение 8. Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса в пределах шахтного поля тр. Интернациональная.....	13
Приложение 9. Коэффициент водопроницаемости, рассчитанный по скважинам режимной сети в пределах шахтного поля тр. Интернациональная .....	15
Приложение 10. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте..	16
Приложение 11. Модельное распределение уровня подземных вод подозерных таликов оз. Травянистое и оз. Проточное на конец 2022 года.....	17
Приложение 12. Расчетное распределение уровня подземных вод нижнеордовикского водоносного комплекса в пределах карьерного поля тр. Юбилейная .....	19
Приложение 13. Расчетное распределение уровня подземных вод верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса на конец 2022 года в пределах карьерного поля тр. Юбилейная.....	20
Приложение 14. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте в пределах карьерного поля тр. Юбилейная г. ....	21
Приложение 15. Прогнозное распределение уровня подземных вод в метегеро-ичерском водоносном комплексе в пределах Мирнинского кимберлитового поля.....	22

Приложение 16. Модельное распределение уровня подземных вод межмерзлотного и подмерзлотного верхнекембрийских водоносных комплексов в пределах карьерного поля тр. Нюрбинская (состояние на сентябрь 2022 г.).....	24
Приложение 17. Прогнозное положение уровней водоносных комплексов на участках закачки дренажных вод Далдынского кимберлитового поля .....	26
Приложение 18. Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при одновременной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» .....	30
Приложение 19. Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при эксплуатации скважин участка «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный».....	31
Приложение 20. Криогидрогеологический разрез участков Ноябрьский и Ботубинский.....	33
Приложение 21. Осреднённые кривые изменения температуры по стволам закачных скважин в пределах участков второй группы.....	35
Приложение 22. Криогидрогеологический разрез участков Левобережный и Киенгский.....	36
Приложение 23. Характеристические осреднённые кривые изменения температуры по стволам наблюдательных скважин в пределах участков четвертой группы .....	38
Приложение 24. Профили по накопителю Тымтайдах.....	41
Приложение 25. Ресурсный потенциал дренажных вод кимберлитовых трубок Западной Якутии .....	44

## Геолого-гидрогеологический разрез по талику оз. Травянистое [406]

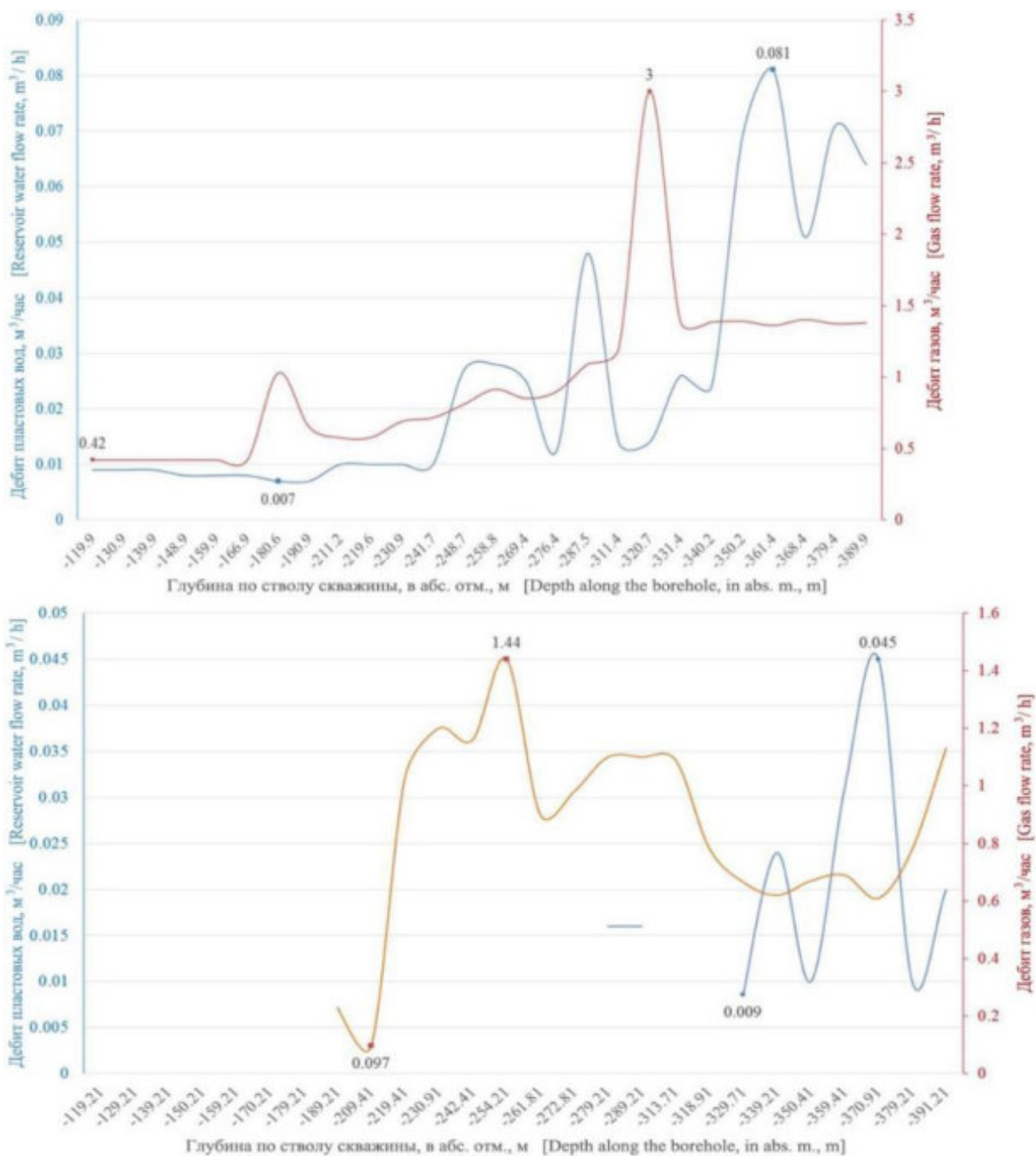


Динамика изменения дебита пластовых газов в процессе бурения скважин [389]

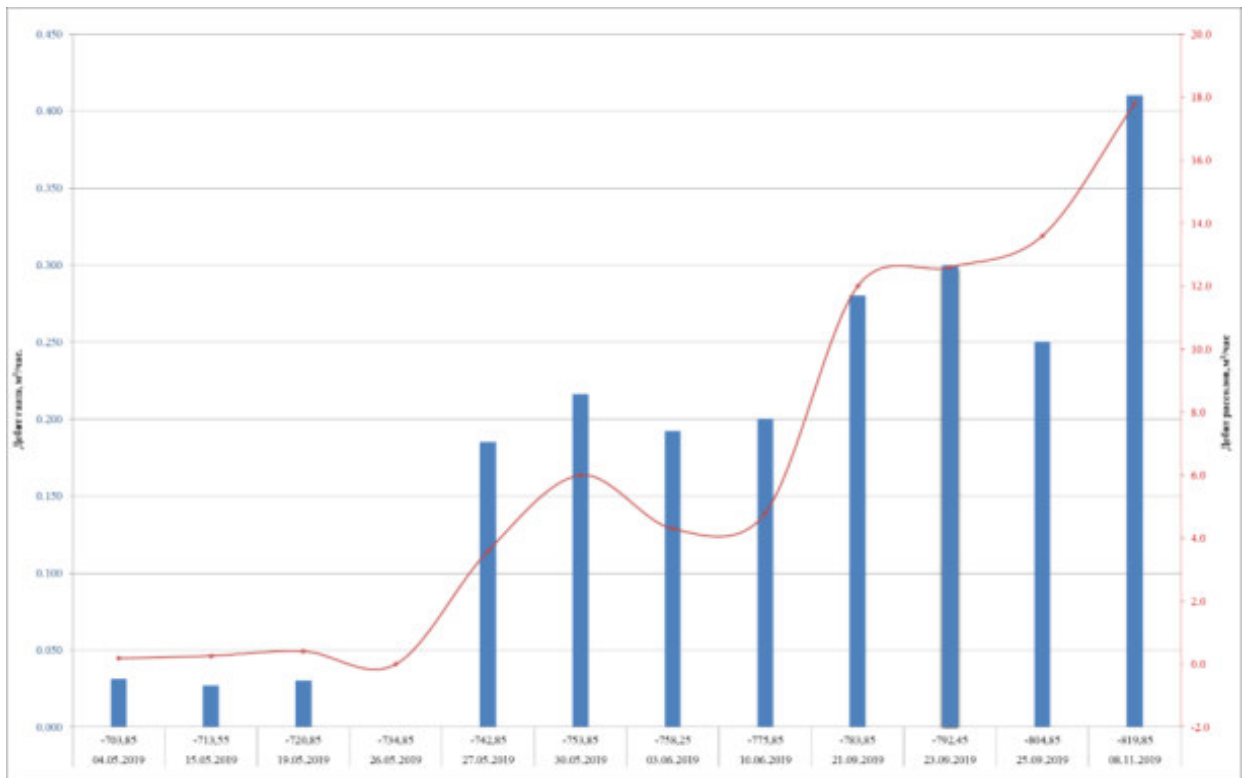
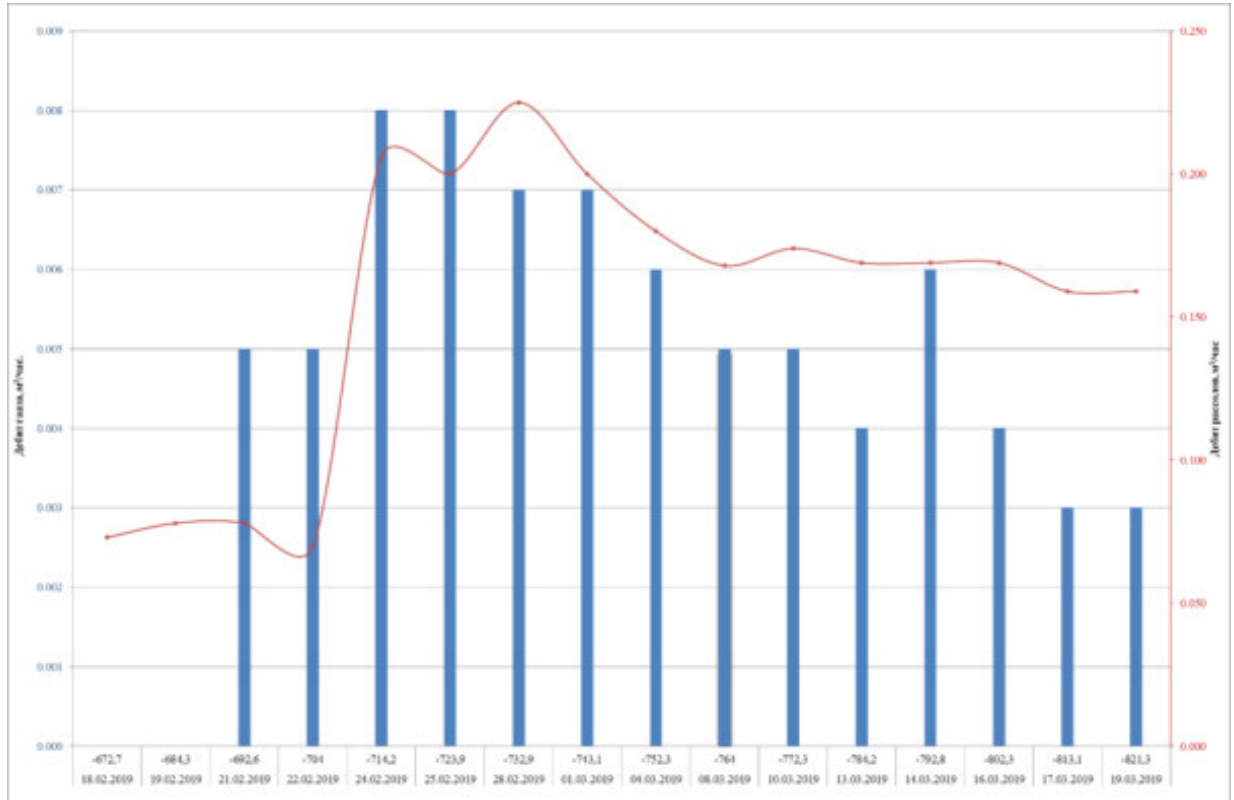


Примечание: (слева – 2гр, справа – 3гр)

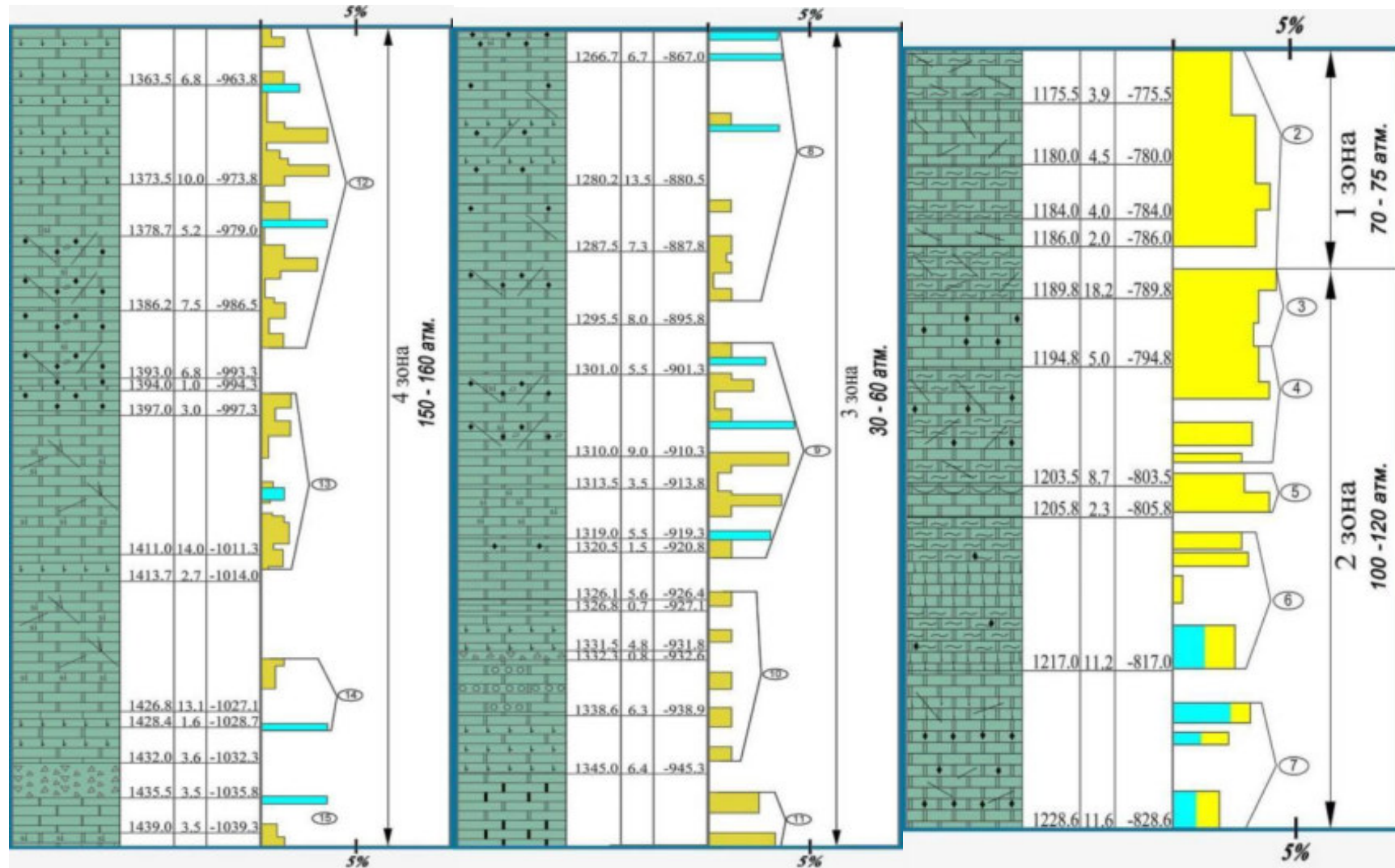
Динамика изменения дебита газа и рассола в разрезе верхнекембрийского водоносного комплекса [389]



Динамика изменения дебитов газа и рассолов на заданных глубинах коллекторов  
среднекембрийского водоносного комплекса [406]

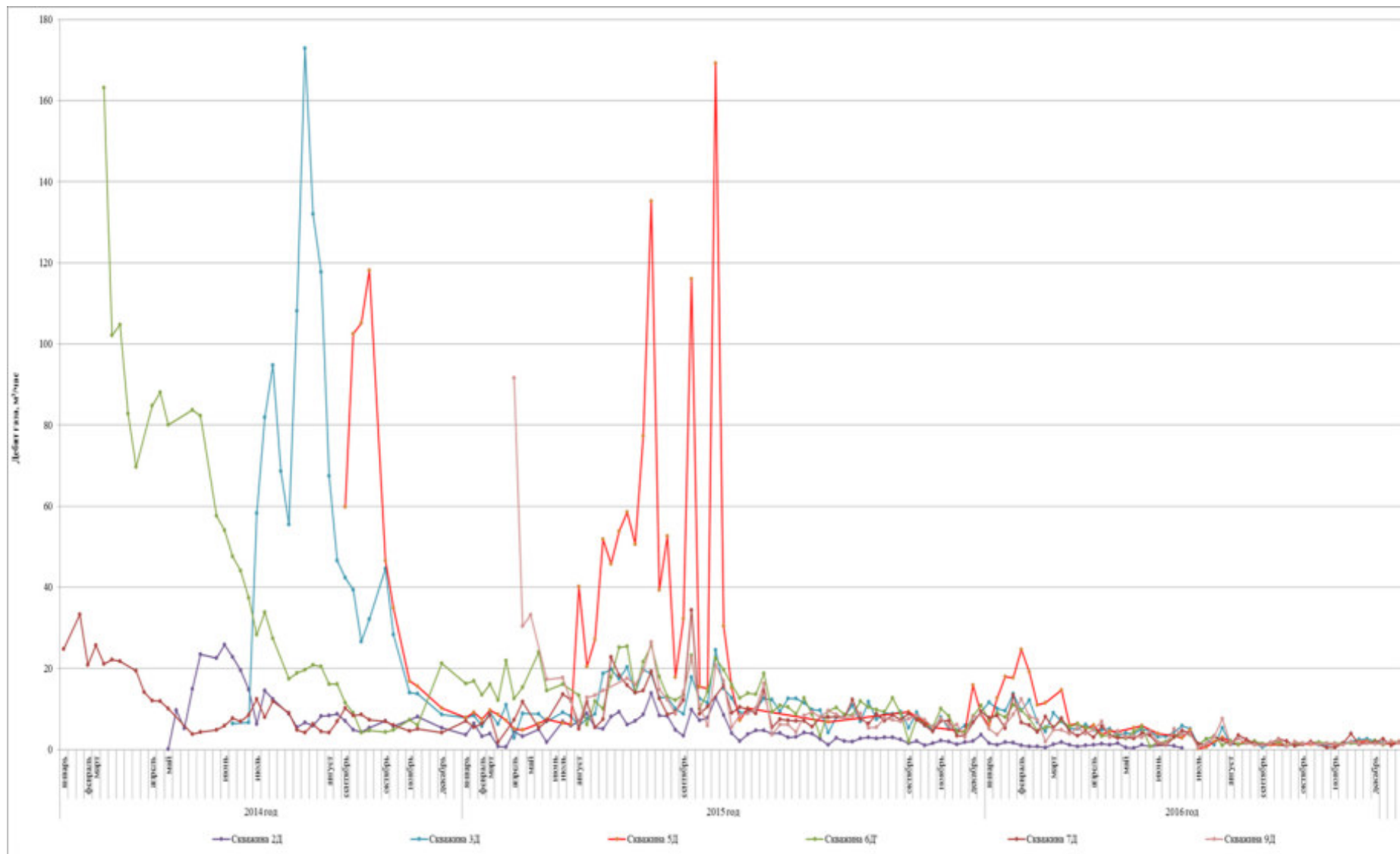


Коллекторы толбачанской свиты, сгруппированные по величине пластового давления в неразгруженном массиве [393]



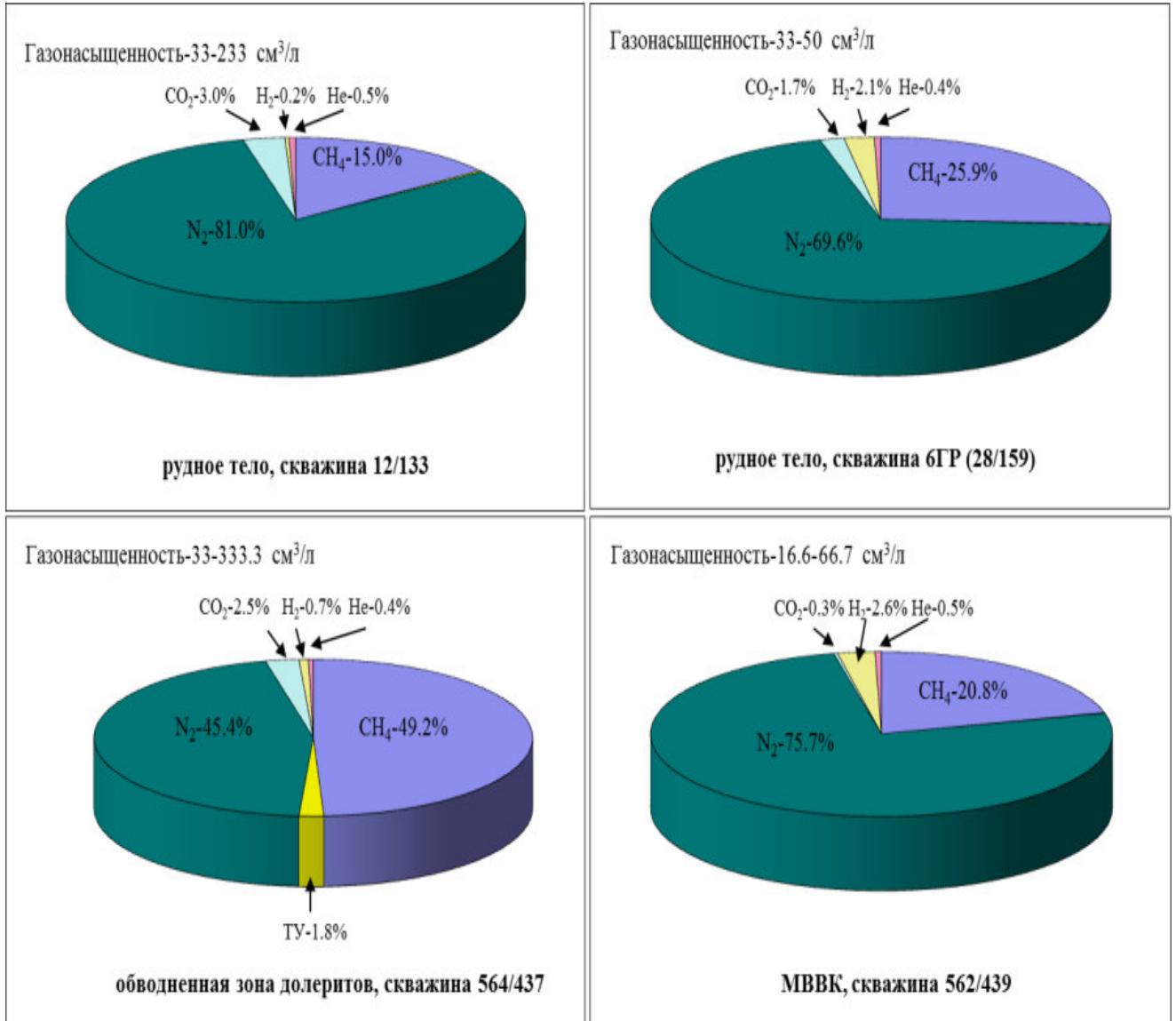
Динамика изменения дебита пластовых газов и природных рассолов по сети скважин, пробуренных на гор. -790 рудника тр.

Интернациональная (сост. А.М. Янников)



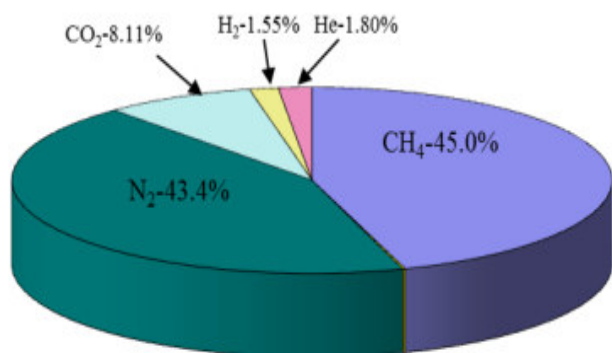
## Химический состав водорастворенных газов

*Химический состав водорастворенных газов межмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (по [166] с дополнениями)*



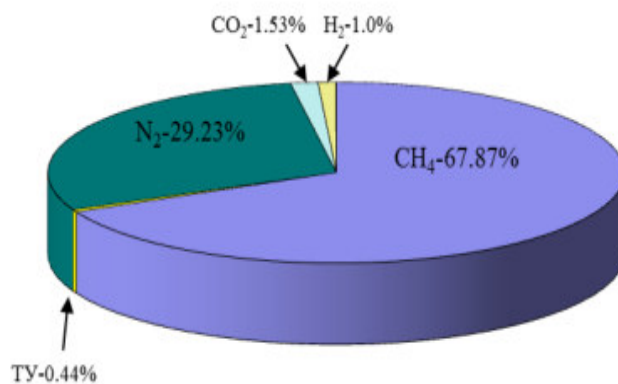
*Химический состав водорастворенных газов подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса (по [166] с дополнениями)*

Газонасыщенность -133-150 см<sup>3</sup>/л



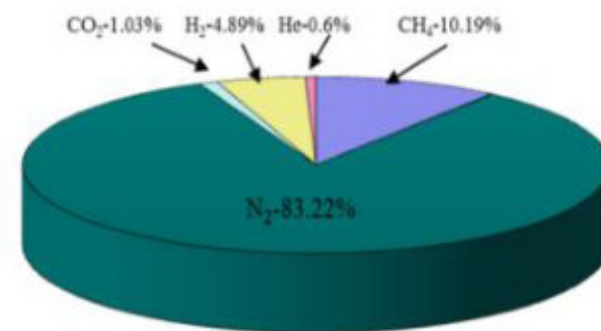
скважина 1 СМ

Газонасыщенность -133-233 см<sup>3</sup>/л



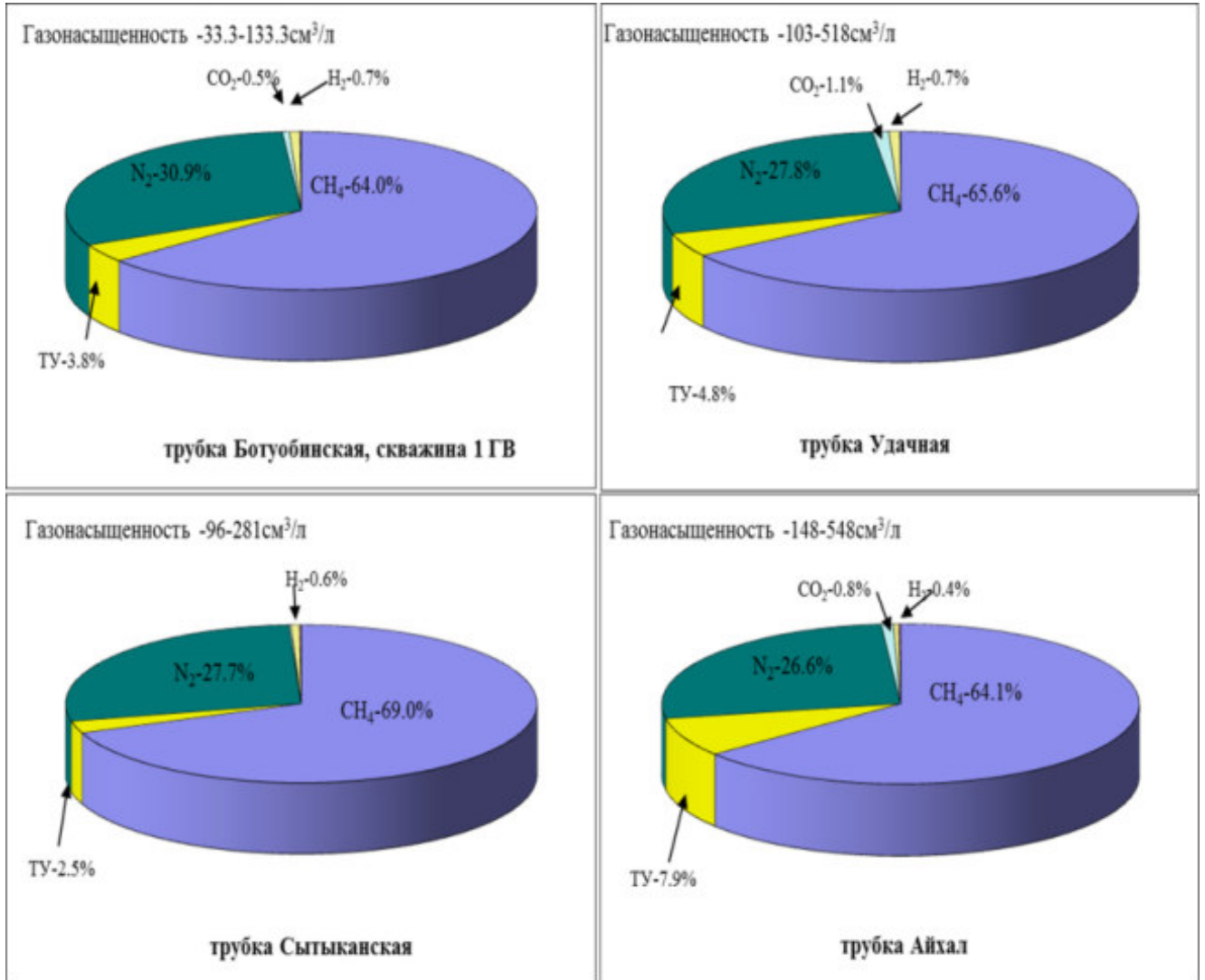
рудное тело, скважина 3 ГР (20/8), трубка Ботубинская

Газонасыщенность -50-67 см<sup>3</sup>/л



скважина 5 ГВ, трубка Нюрбинская

*Химический состав водорастворенных газов подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса в пределах Алакит-Мархинского (тр. Айхал и Сытыканская), Далдынского (тр. Удачная) и Накынского (тр. Ботубинская) кимберлитовых полей (по [166] с дополнениями)*



Интервалы коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса в пределах шахтного поля  
тр. Интернациональная [393]

№ коллектора	Интервал, м	Мощность, м	Коэффициент водопроницаемости, м <sup>2</sup> /сут	Коэффициент пьезопроводности, м <sup>2</sup> /сут.
1	2	3	4	5
<b>Скважина № 455з</b>				
1	412,6–414,4	1,8	60	10 <sup>6</sup>
2	432,0–433,8	1,8		
3	455,4–460,2	4,8		
4	472,4–473,6	1,2		
5	478,2–479,4	1,2		
6	482,8–485,2	2,4		
7	487,0–493,6	6,6		
8	494,6–508,2	13,6		
9	512,8–513,8	1,0		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>34,4</b>		
<b>Скважина № 460з</b>				
1	382,0–383,0	1,0	7	10 <sup>6</sup>
2	407,8–409,2	1,4		
3	424,0–428,0	4,0		
4	439,6–443,9	4,3		
5	454,6–455,0	0,4		
6	459,2–461,8	2,6		
7	470,4–472,2	1,8		
8	471,2–475,4; 477,5–482,6	9,3		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>24,8</b>		
<b>Скважина № 456з</b>				
8	439,8–480	40,2	91	10 <sup>6</sup>
<b>Эффективная мощность</b>		<b>40,2</b>		
<b>Скважина № 457з</b>				
2	429–430,4	1,4	22	10 <sup>6</sup>
4	446,4–452	5,6		
6	459–460,4	1,4		
7	462–463,8	1,8		
8	466,2–481,8; 482,8–491,0; 493–495	25,8		
9	500,8–501,4	0,6		
10	503,6–504,8	1,2		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>37,6</b>		
<b>Скважина № 459з</b>				
1	379,2–379,8	0,6	45	10 <sup>6</sup>
2	388,4–390,2	1,8		
3	391,2–392,0	0,8		
4	402,4–404,8	2,4		
5	421,2–423,6	2,4		

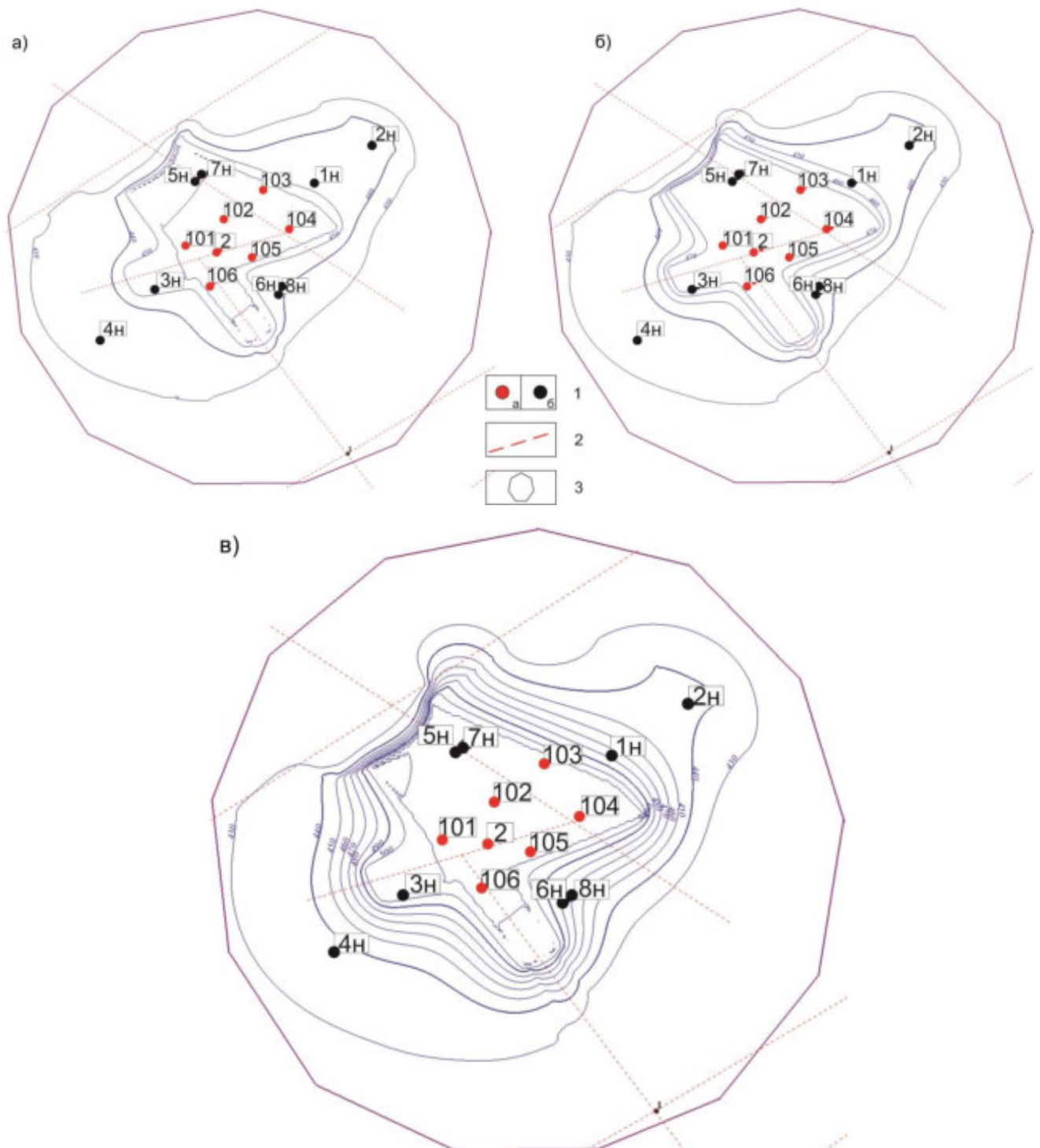
Продолжение таблицы

1	2	3	4	5
6	445,8–451,0	5,2		
7	461,0–463,8	2,8		
8	468,2–469,8; 472,0–475,0; 477,0–483,8; 485,0–491,8	18,2	45	10 <sup>6</sup>
9	496,0–499,0	3,0		
10	503,0–503,8	0,8		
<b>Эффективная мощность</b>		<b>38,0</b>		

Коэффициент водопроницаемости, рассчитанный по скважинам режимной сети в пределах шахтного поля тр. Интернациональная [394]

№ п/п	№ скважины	Глубина, м	Т (КМ), м <sup>2</sup> /сут	№ п/п	№ скважины	Глубина, м	Т (КМ), м <sup>2</sup> /сут	№ п/п	№ скважины	Глубина, м	Т (КМ), м <sup>2</sup> /сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	102	544	101,0	45	27 Н	552	1,1	89	424	570	1,9
2	107	526,3	107,0	46	28 Н	554	24,9	90	430	570	17,8
3	17	570	68,0	47	40 Н	450	14,5	91	431	500	11,9
4	М-8	610	1,7	48	41 Н	450	21,6	92	432	585	28,6
5	1рм	500	2,4	49	42 Н	450	18,2	93	433	550	11,4
6	501	430	0,9	50	2 кр	580	144,0	94	434	550	4,7
7	504	580	0,1	51	КГС-87	560	21,5	95	435	475	83,1
8	508	498,3	0,7	52	1ВН	537,2	242,1	96	438	531	17,2
9	510	542	2,5	53	2 ВН	542	181,3	97	439	531	277,8
10	513 "	560	0,9	54	3 ВН	530	160,2	98	440	558	10,1
11	13 "	532	112,8	55	4 ВН	586	192,4	99	441	597,5	98,5
12	549	440	0,5	56	5 ВН	550	224,1	100	442	580	108,8
13	551	621	0,9	57	6 ВН	525	208,9	101	443	620	0,9
14	553	555	0,7	58	7 ВН	535	127,9	102	444	530	23,8
15	556	589,5	0,5	59	8 ВН	550	111,4	103	445	528	7,9
16	557	401	0,6	60	10ВН	540	109,9	104	446	530	45,3
17	559	360	3,5	61	9ВН	526,2	125,7	105	418	487	11,8
18	306	520	40,8	62	11ВН	530,4	192,6	106	437	470	15,9
19	1Н	570	28,7	63	16 ВП	498,2	85,4	107	450з	562,6	472,1
20	2Н	571,5	380,2	64	5 НВ	528	60,2	108	451Н	550	11,9
21	4Н	561	95,1	65	3 НЗ	517	71,4	109	452Н	540	501,5
22	5Н	546	290,1	66	111	550	245,4	110	451з	560	153,1
23	6Н	554	48,2	67	110/1	550	191,0	111	452з	560	232,9
24	7Н	578	88,0	68	109	550	88,8	112	453з	560	225,7
25	8Н	563	50,9	69	108	550	300,0	113	454з	705	136,8
26	9Н	547	93,2	70	1кр	541	47,0	114	454Н	540	60,8
27	10 Н	570	19,8	71	2кр	540	12,3	115	455з	560	60,0
28	11 Н	514,3	129,3	72	3кр	540	220,1	116	456з	560	91,0
29	12 Н	525	126,4	73	5кр	540	24,7	117	457з	560	22,0
30	14 Н	483	13,9	74	403	530	28,6	118	458з	560	12,9
31	15 Н	521	15,8	75	404	606,5	12,7	119	459з	560	45,0
32	16 Н	582	11,1	76	405	610	31,9	120	460з	560	7,9
33	17 Н	552	110,4	77	405'	550	23,8	121	461з	560	86,7
34	16с	620	16,2	78	406	586	24,2	122	402	550	39,4
35	17с	610	9,3	79	407	605,5	15,9	123	104	550	64,0
36	18с	577	18,4	80	408	594	24,1	124	105	550	17,0
37	19с	610	13,3	81	409	600	115,6	125	424ВН	550	1,8
38	17 Н"	560	1,2	82	410	600	37,9	126	25Н'	550	14,3
39	19 Н	525	135,0	83	412	600,4	11,2	127	503	550	8,5
40	20 Н	562	23,0	84	414	600	22,1	128	513	560	84,0
41	22 Н	550	28,7	85	415	550	19,3	129	4кр	540	70,0
42	23 Н	520	29,1	86	416	550	22,6	130	301	550	50,1
43	25 Н	584	27,3	87	417	580	31,2	131	23з	550	130,4
44	26 Н	520	21,9	88	423-В3	545	11,9				

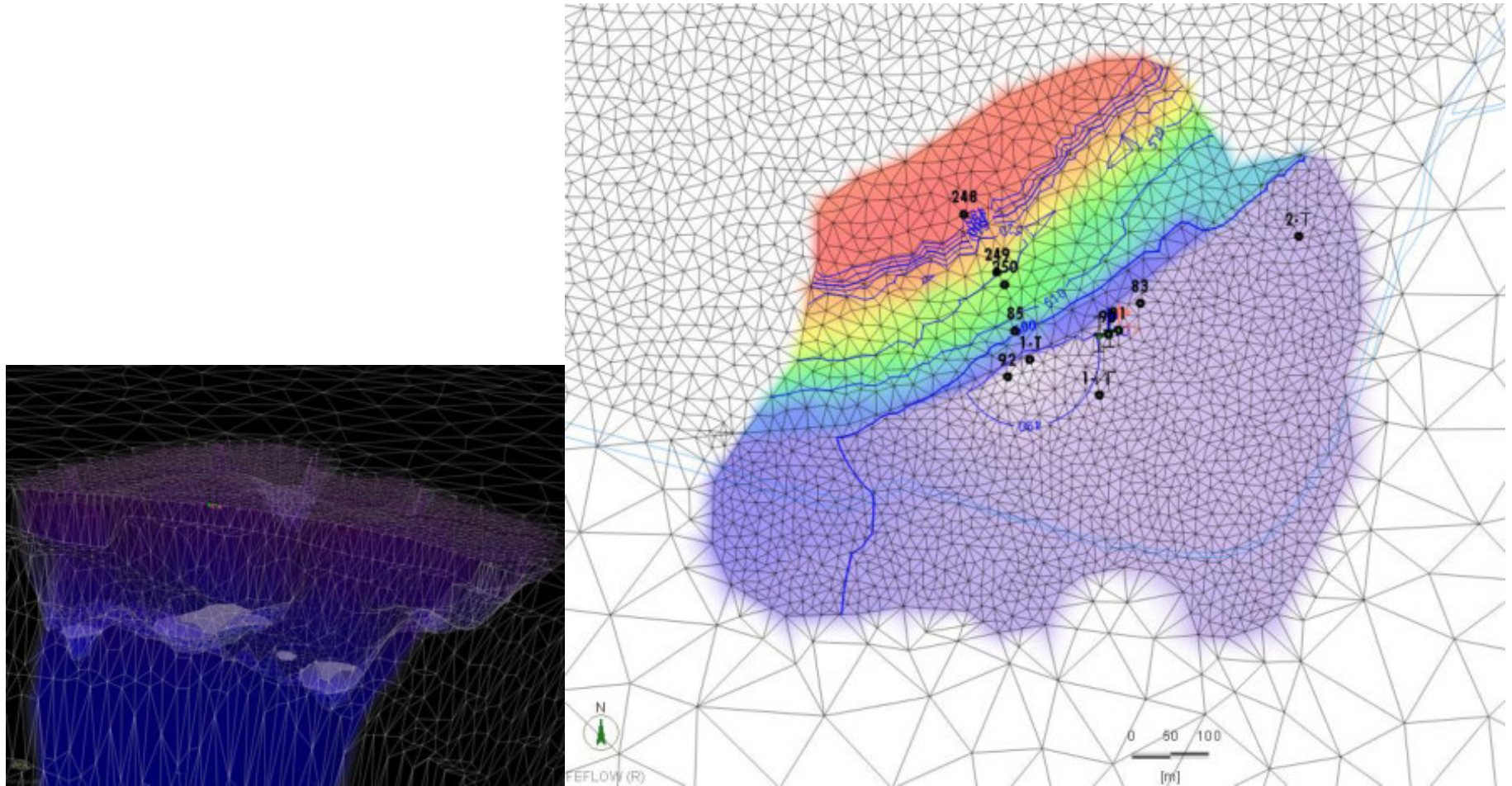
Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте (сост. А.М. Янников).



Примечание: а) через 5 лет (2027 г.), б) через 10 лет (2032 г.), в) на конец отработки (2044 г.) [410]. Условные обозначения: 1: а) – Наблюдательные скважины; б) Закачные скважины; 2 –Разрывные нарушения; 3 – Горный отвод участка Ноябрьский.

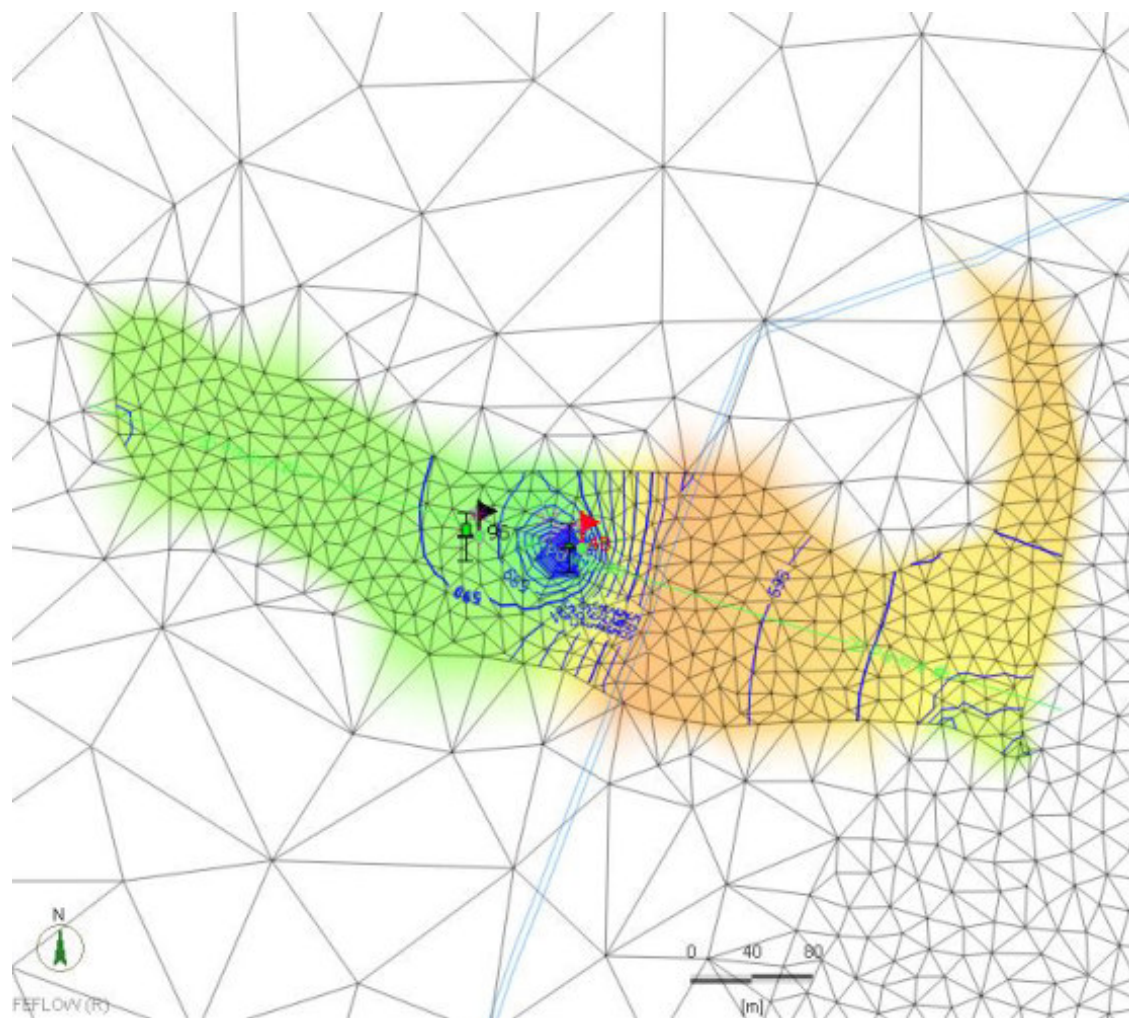
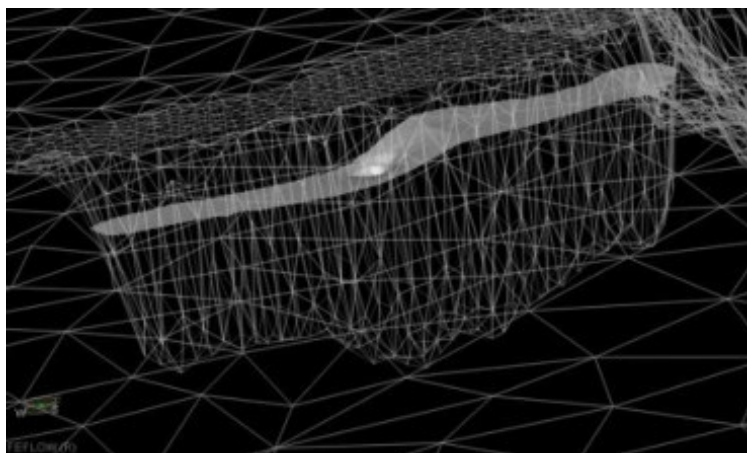
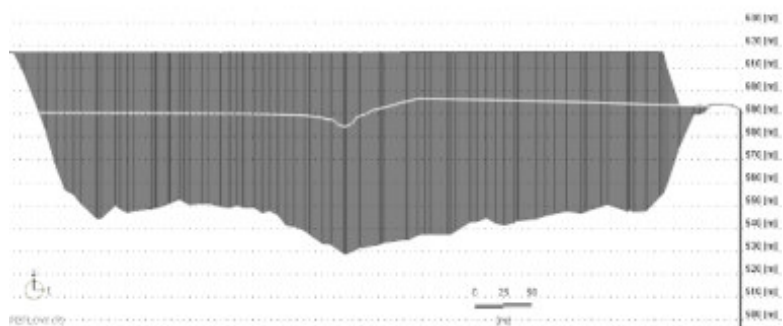
Модельное распределение уровня подземных вод подозерных таликов оз. Травянистое и оз. Проточное на конец 2022 года<sup>1</sup>.

*Талик оз. Травянистое*

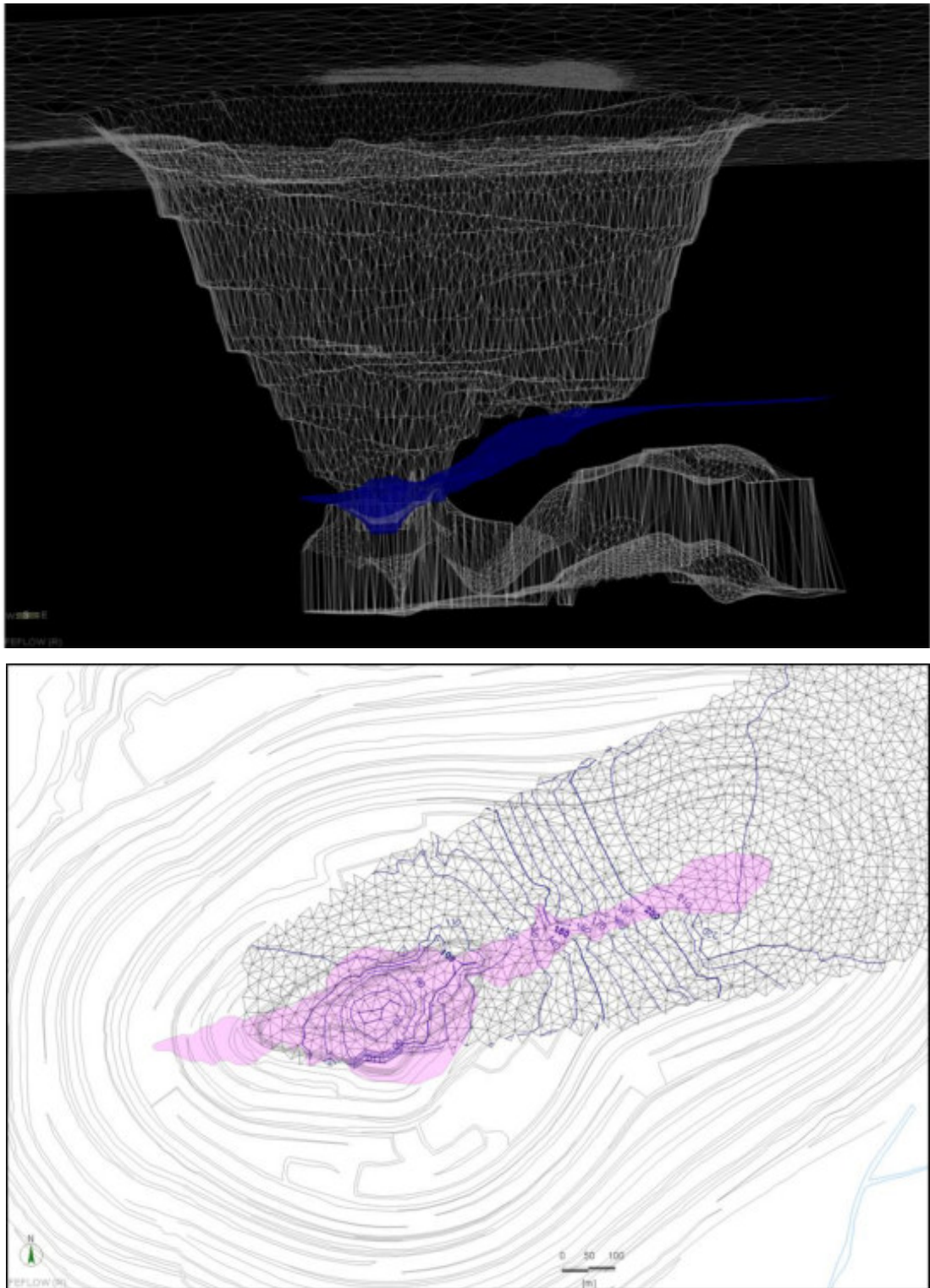


<sup>1</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Талик оз. Проточное



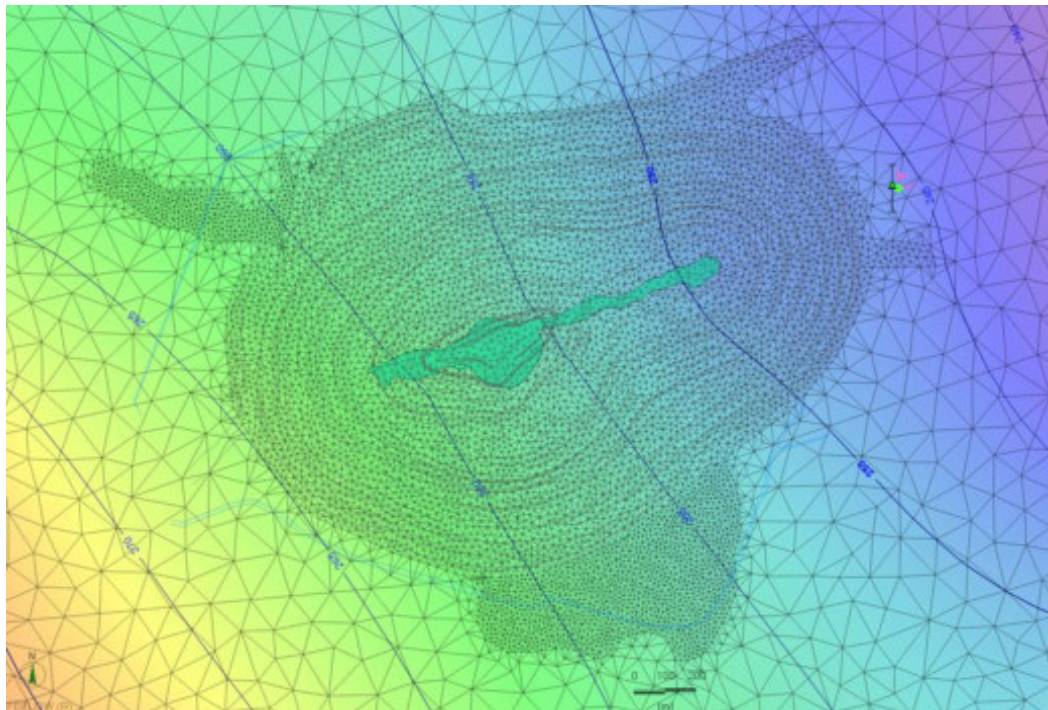
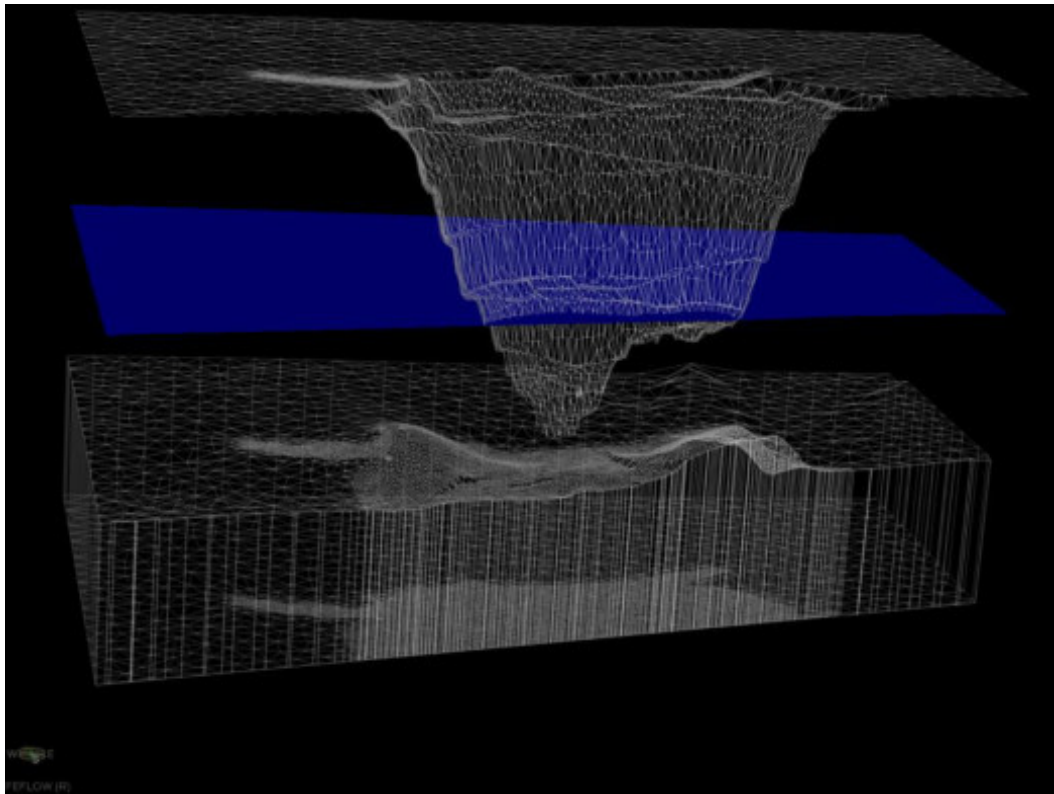
Расчетное распределение уровня подземных вод нижнеордовикского водоносного комплекса в пределах карьерного поля тр. Юбилейная<sup>2</sup>



<sup>2</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

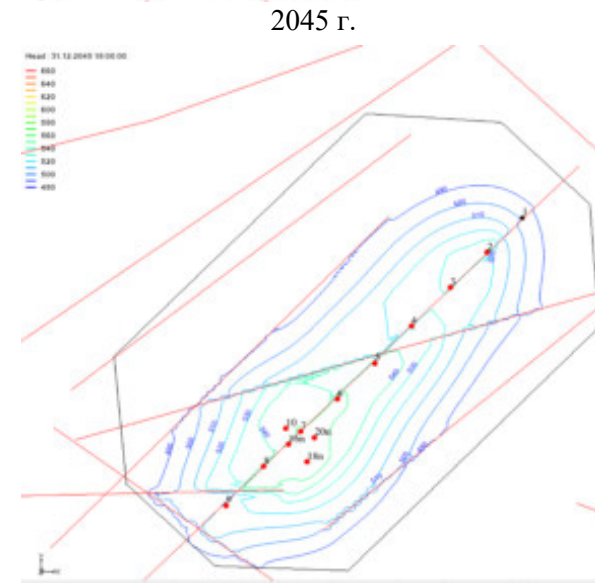
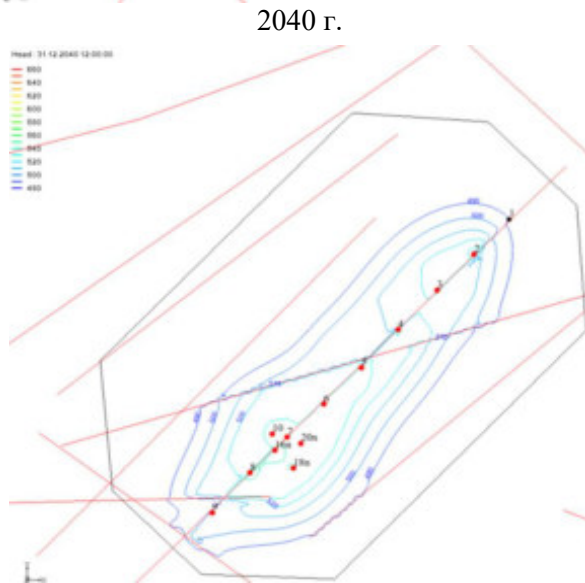
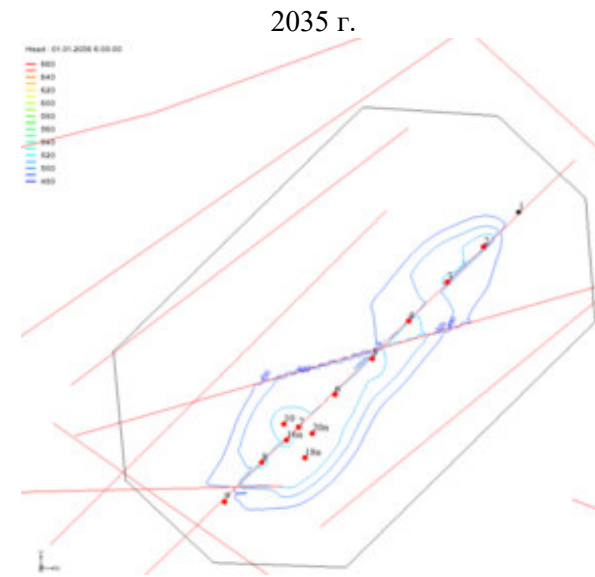
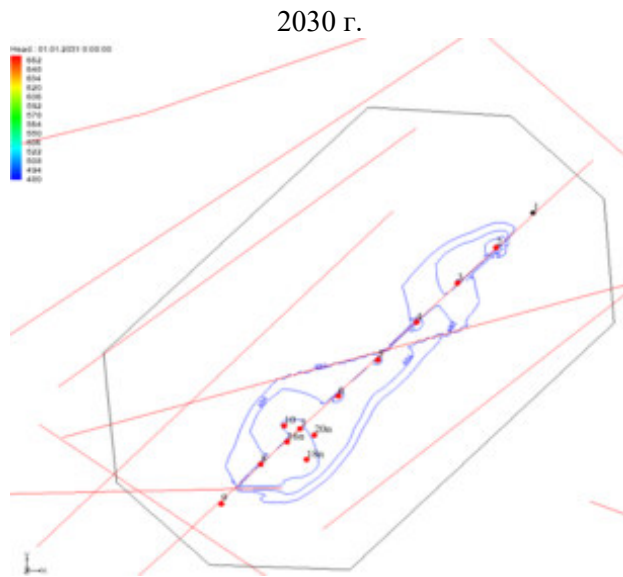
## Приложение 13.

Расчетное распределение уровня подземных вод верхнекембрийского подмерзлотного водоносного комплекса на конец 2022 года в пределах карьерного поля тр. Юбилейная<sup>3</sup>

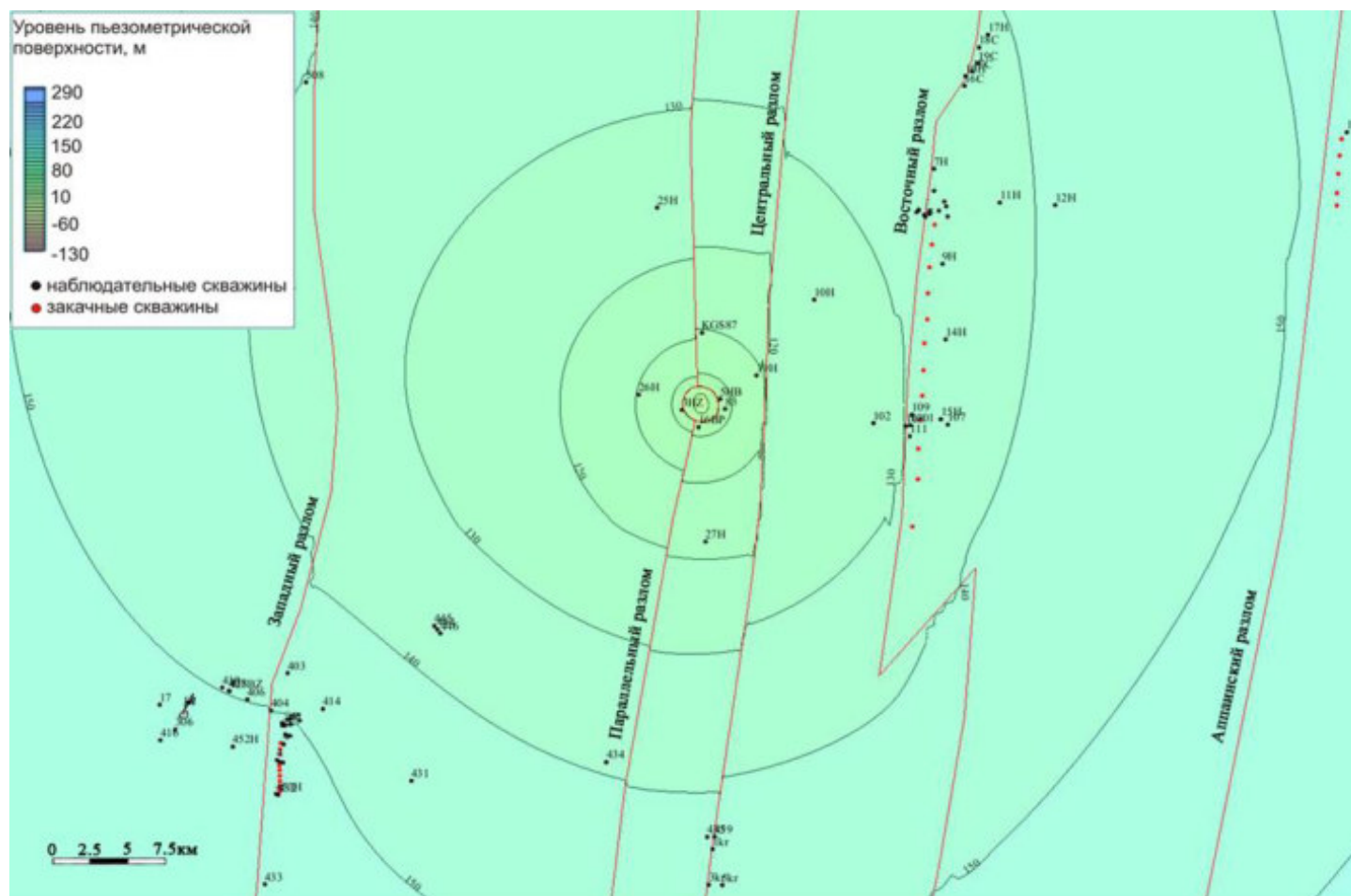


<sup>3</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Юбилейная» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте в пределах карьерного поля тр. Юбилейная (сост. А.М. Янников)

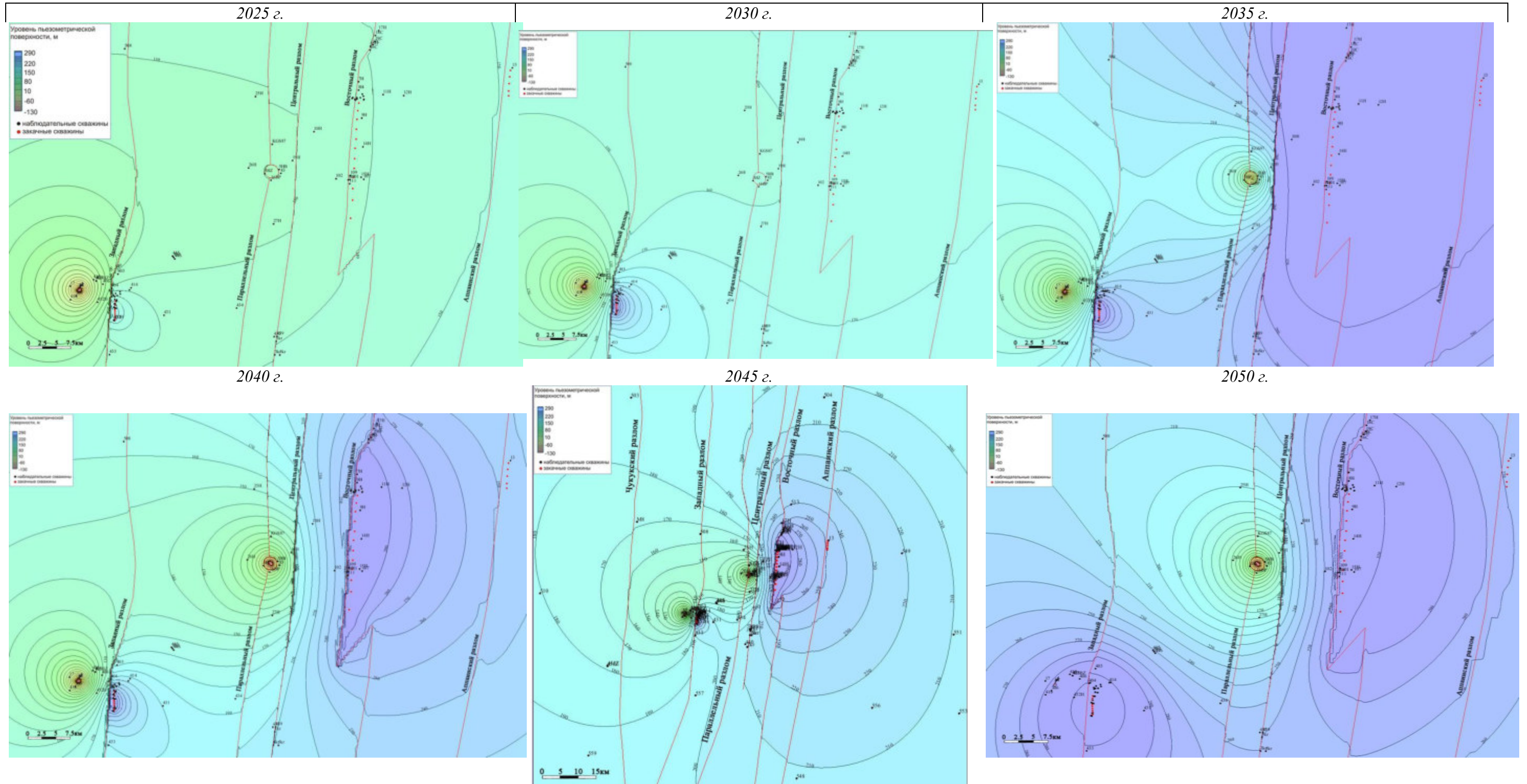


Прогнозное распределение уровня подземных вод в метегеро-ичерском водоносном комплексе в пределах Мирнинского кимберлитового поля<sup>4</sup>  
*На конец 2022 года*



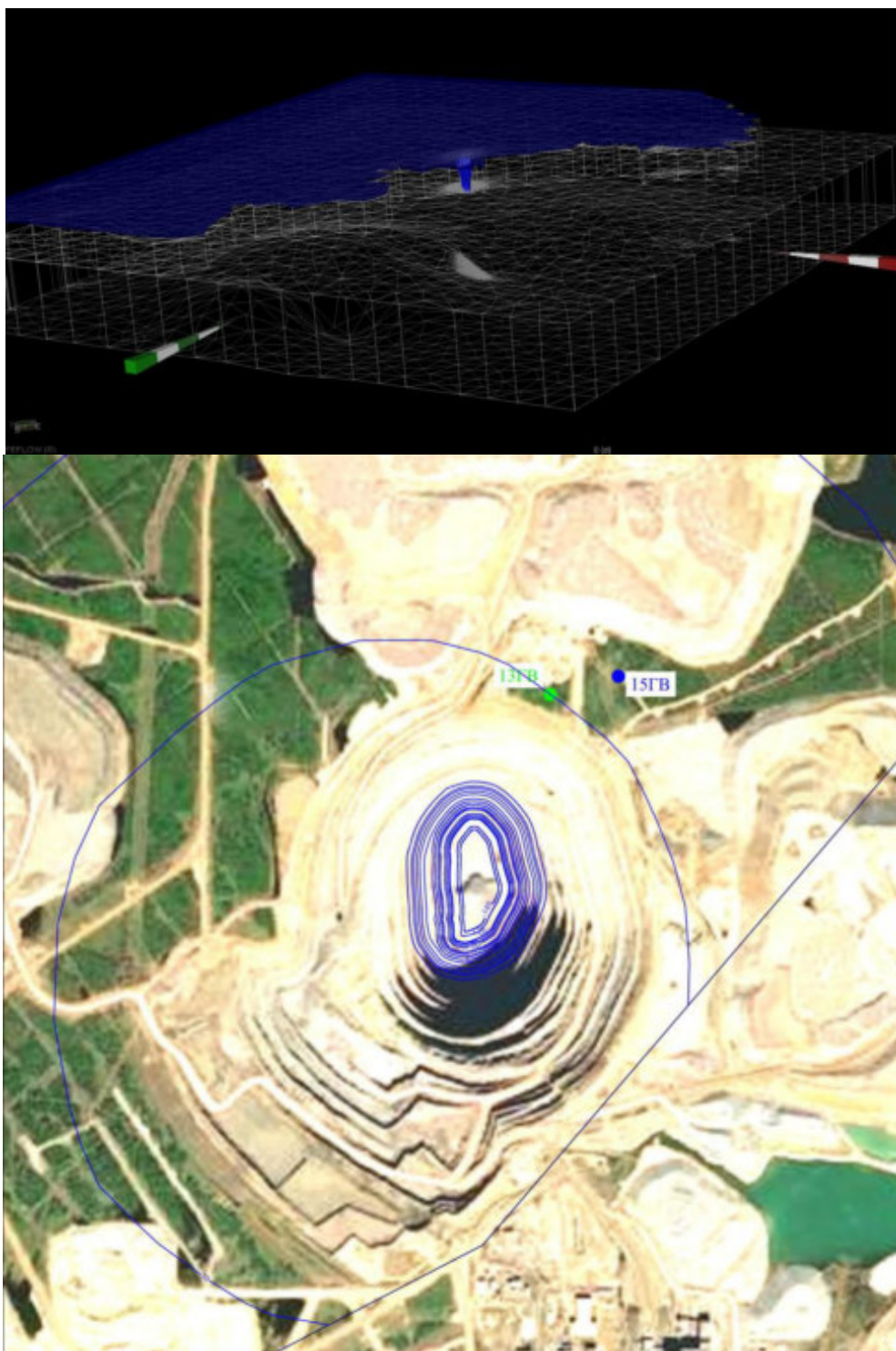
<sup>4</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Мир» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

Прогнозное распределение уровня подземных вод в метеоро-ичерском водоносном комплексе



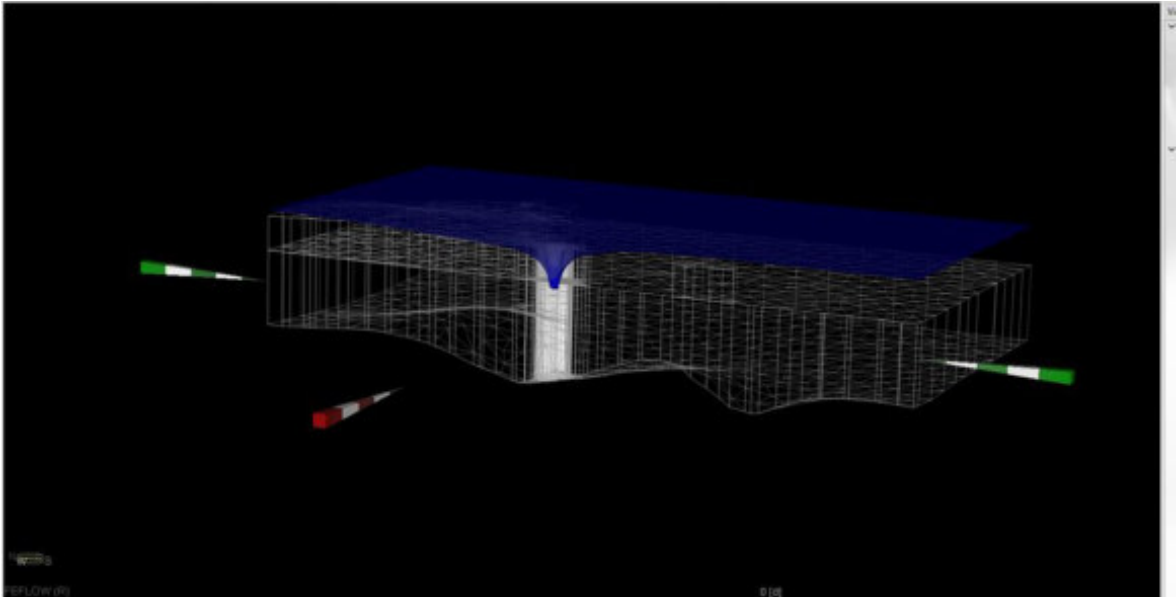
Модельное распределение уровня подземных вод межмерзлотного и подмерзлотного верхнекембрийских водоносных комплексов в пределах карьерного поля тр. Нюрбинская (состояние на сентябрь 2022 г.)<sup>5</sup>

*Межмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс*



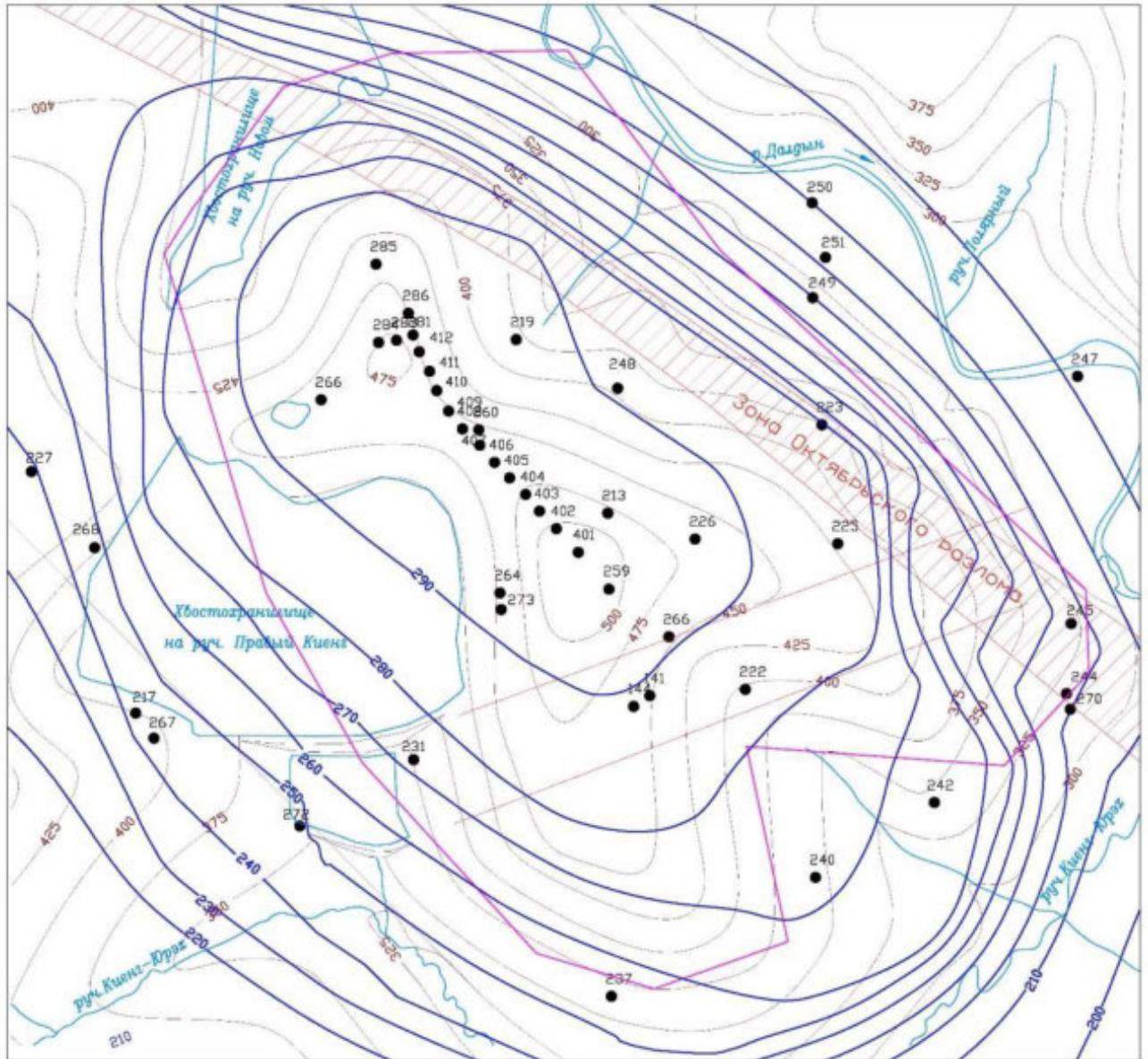
<sup>5</sup> Янников А. М. Отчёт «Прогнозирование и управление водопритоками на месторождении трубки «Нюрбинская» на основе постоянно-действующей гидродинамической модели». Фонды Института «Якутнипроалмаз». Мирный, 2021.

*Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс*

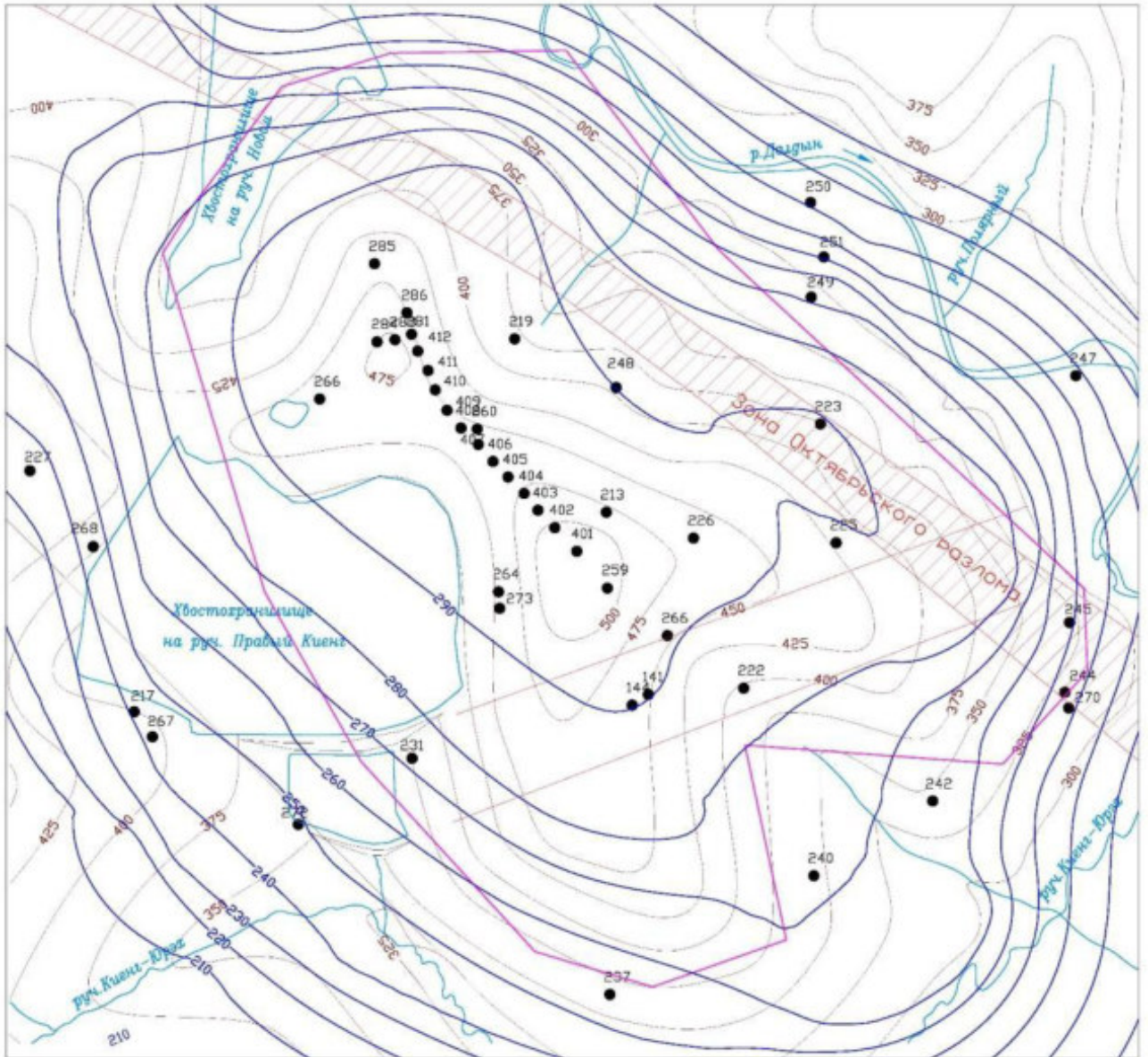


Прогнозное положение уровней водоносных комплексов на участках закачки дренажных вод  
Далдынского кимберлитового поля (сост. А.М. Янников)

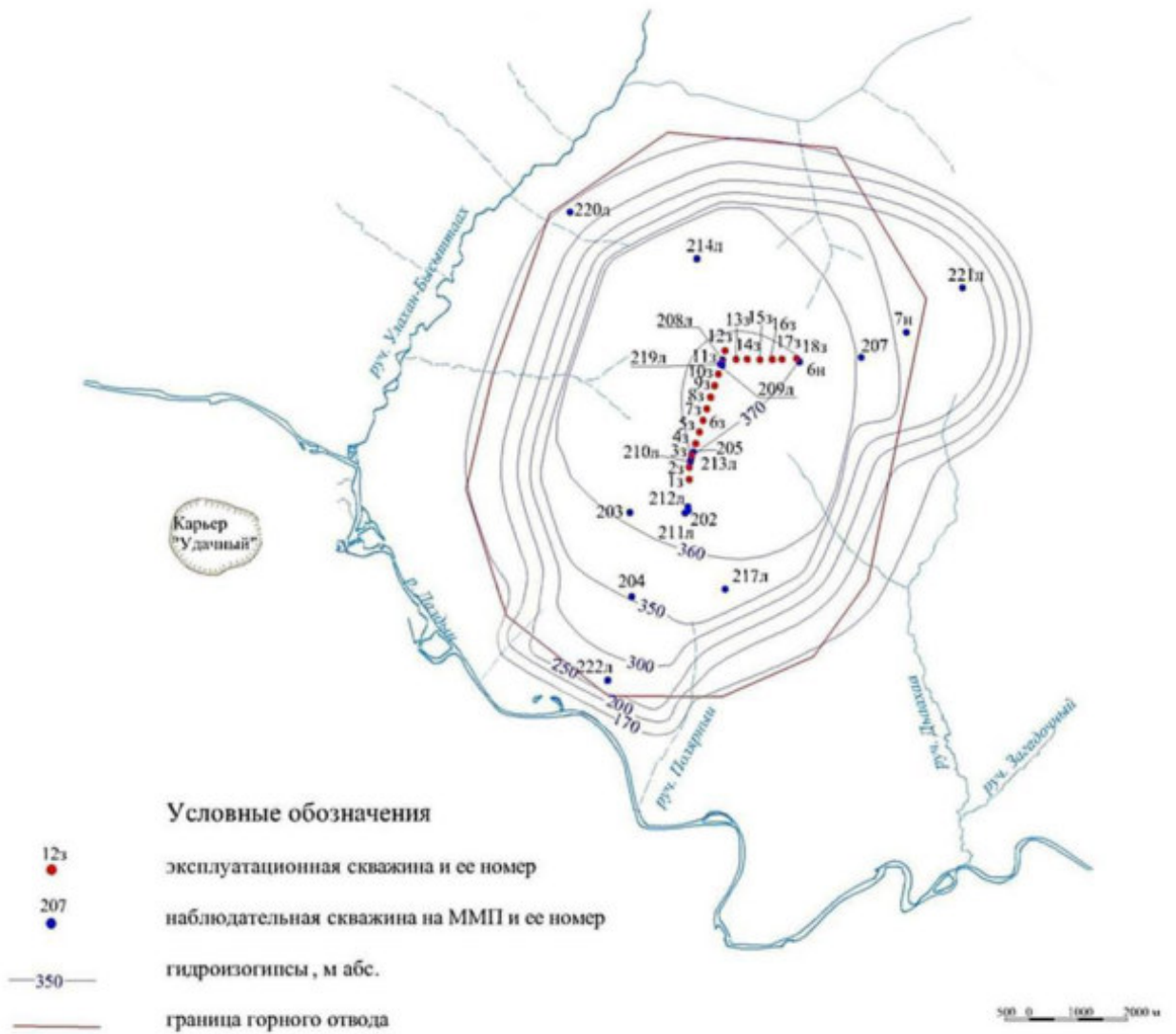
*Прогнозное положение уровней верхнекембрийского водоносного комплекса на участке закачки  
дренажных вод «Киенгский» на 31.12.2033 г. [408]*



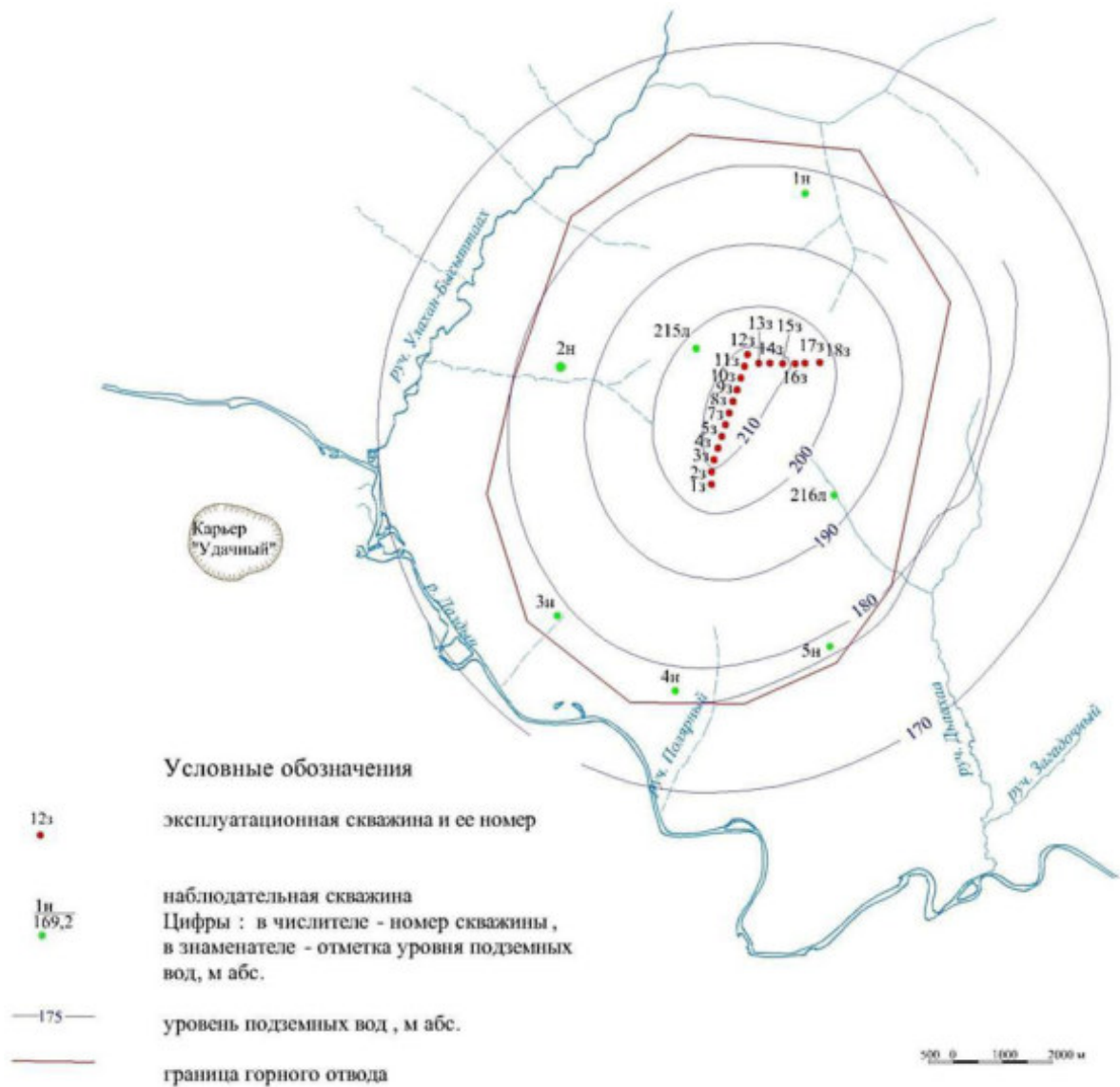
Прогнозное положение уровней техногенного водоносного горизонта на участке закачки дренажных вод «Киенгский» на 31.12.2033 г. [408]



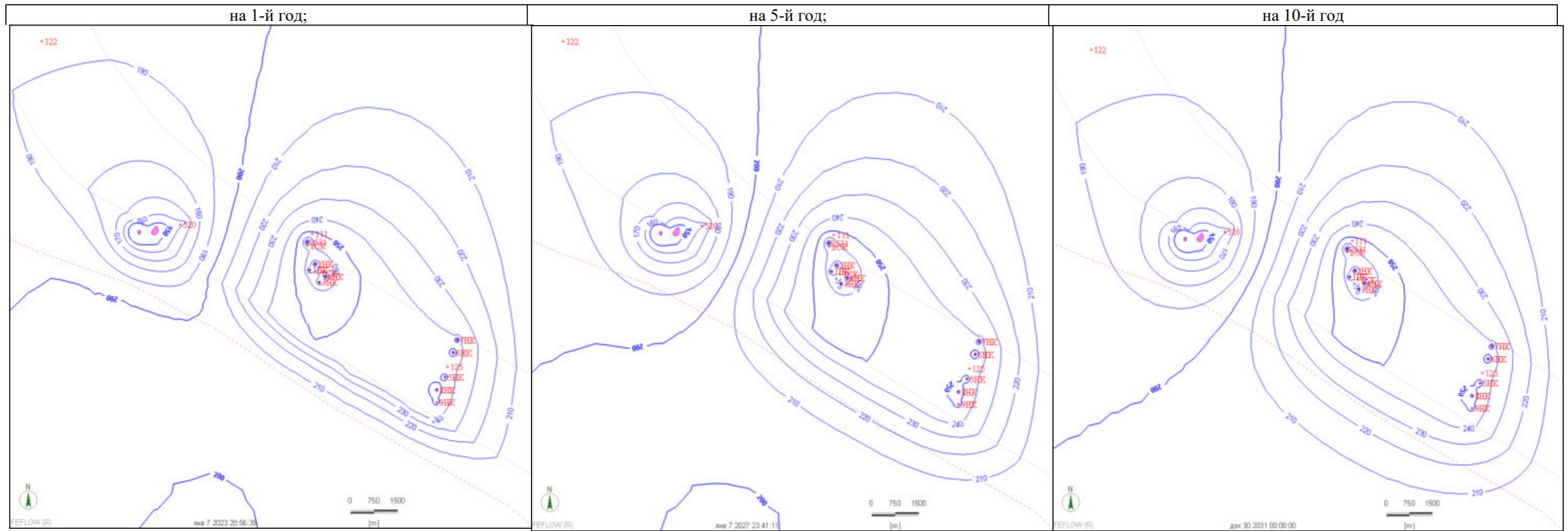
Прогнозное положение уровней техногенного водоносного горизонта на узле закачки дренажных вод участка «Левобережный» на конец 2023 г. (сост. А.М. Янников)



Прогнозное положение уровней верхнекембрийского водоносного комплекса на узле закачки дренажных вод участка «Левобережный» на конец 2023 г (сост. А.М. Янников).

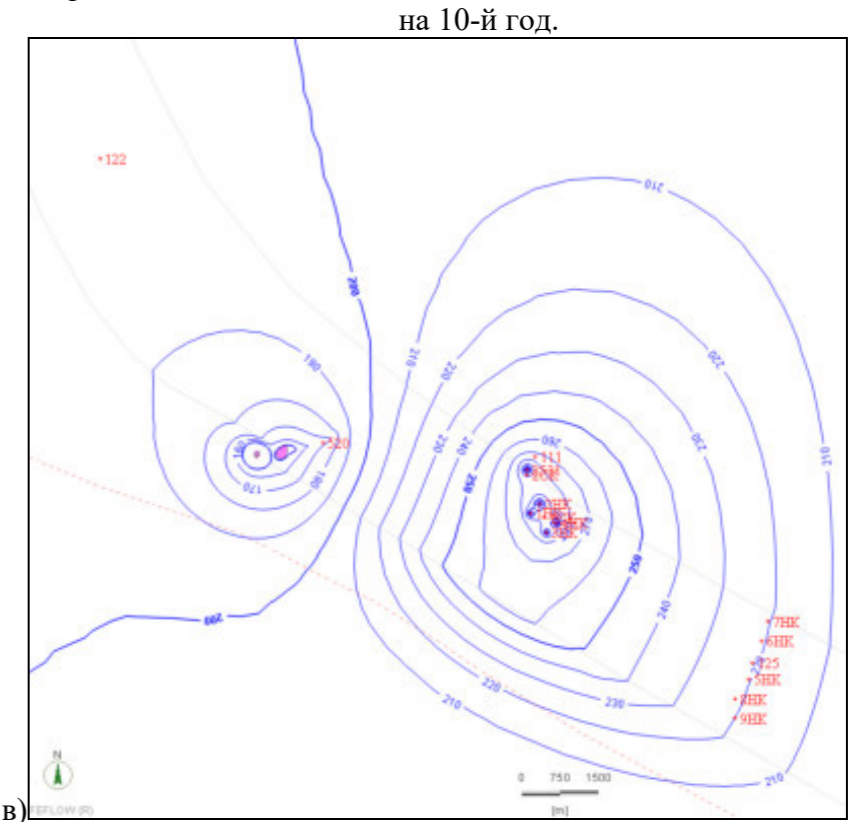
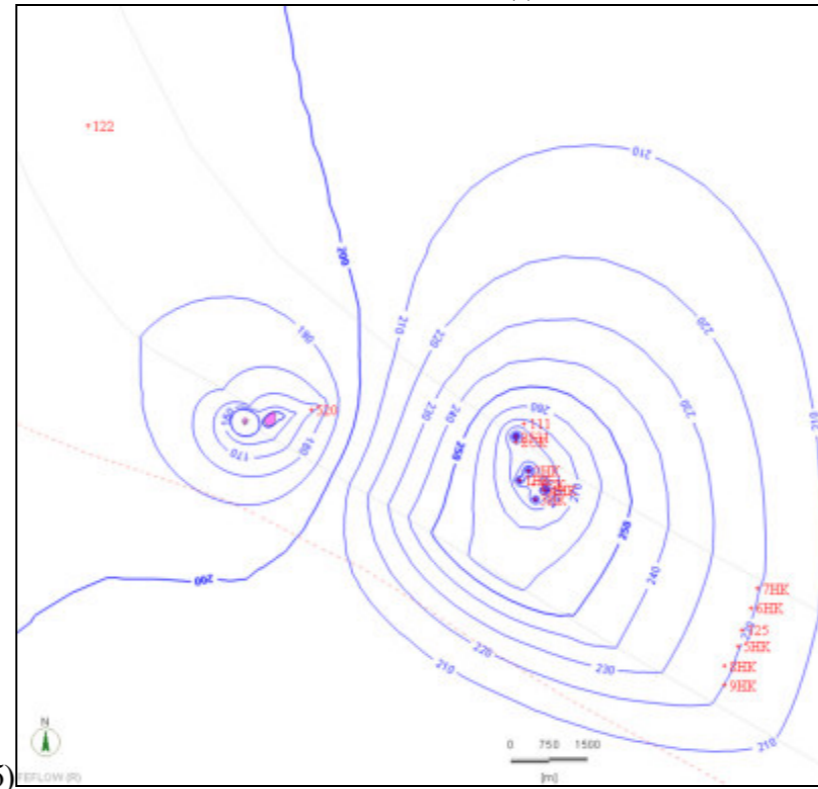
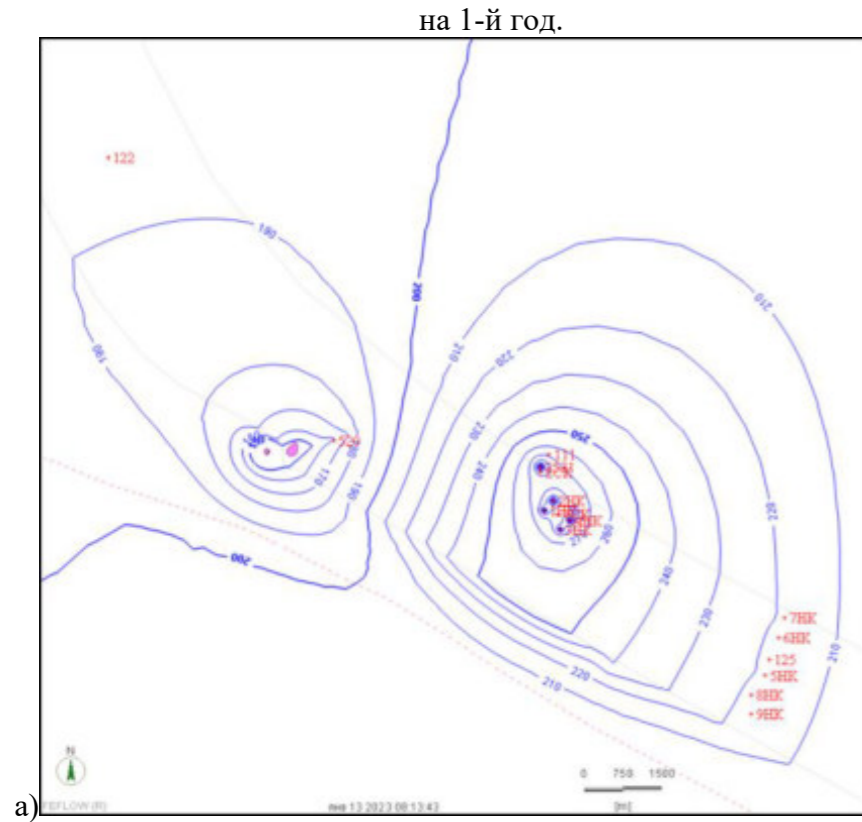


## Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при одновременной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» [404]

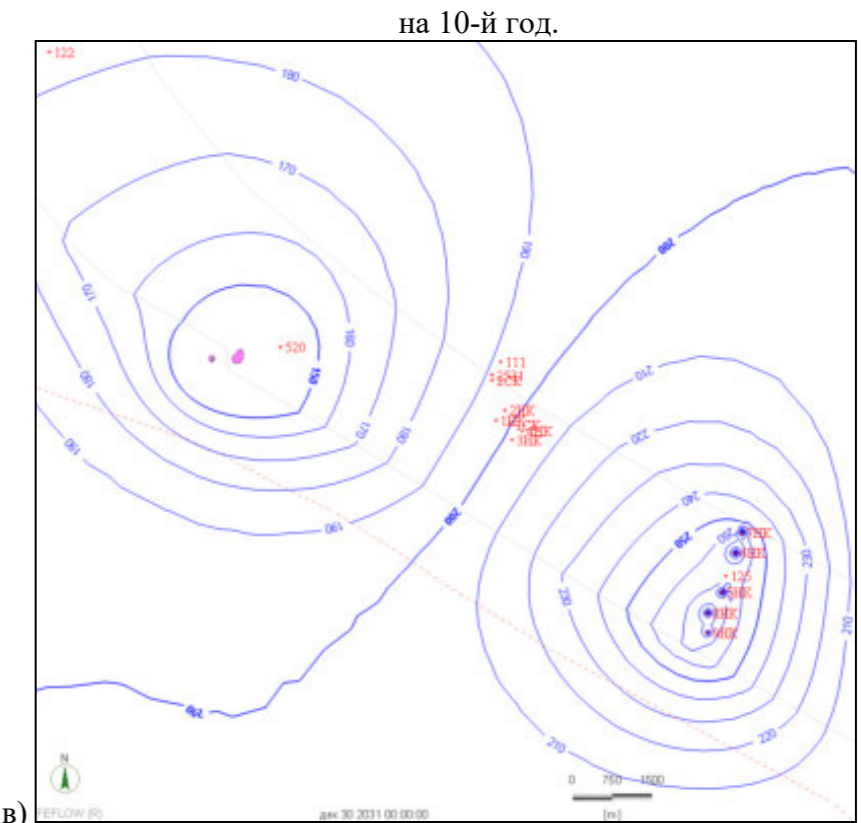
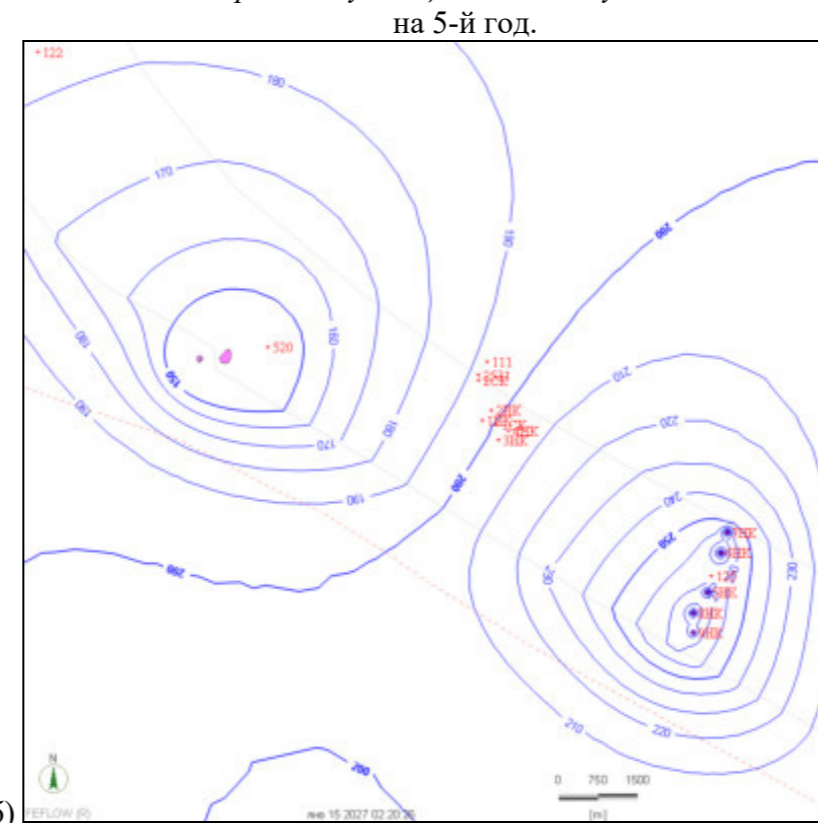
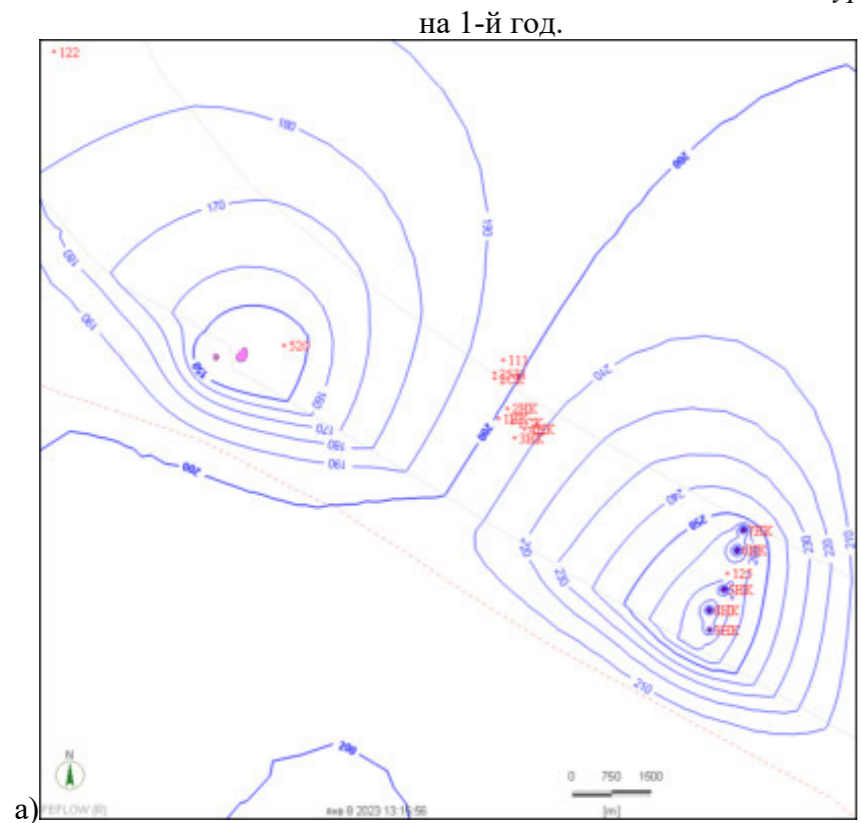


Положение уровня подземных вод нижнекембрийского водоносного комплекса при эксплуатации скважин участка «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» [404]

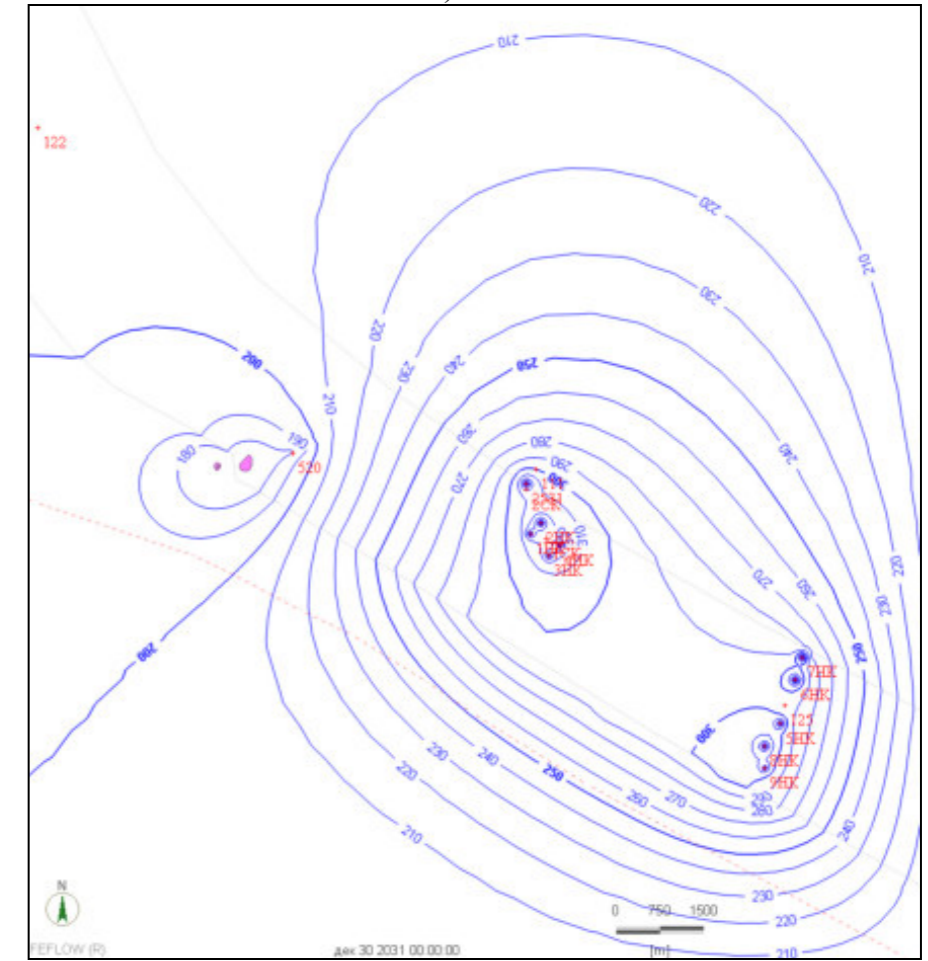
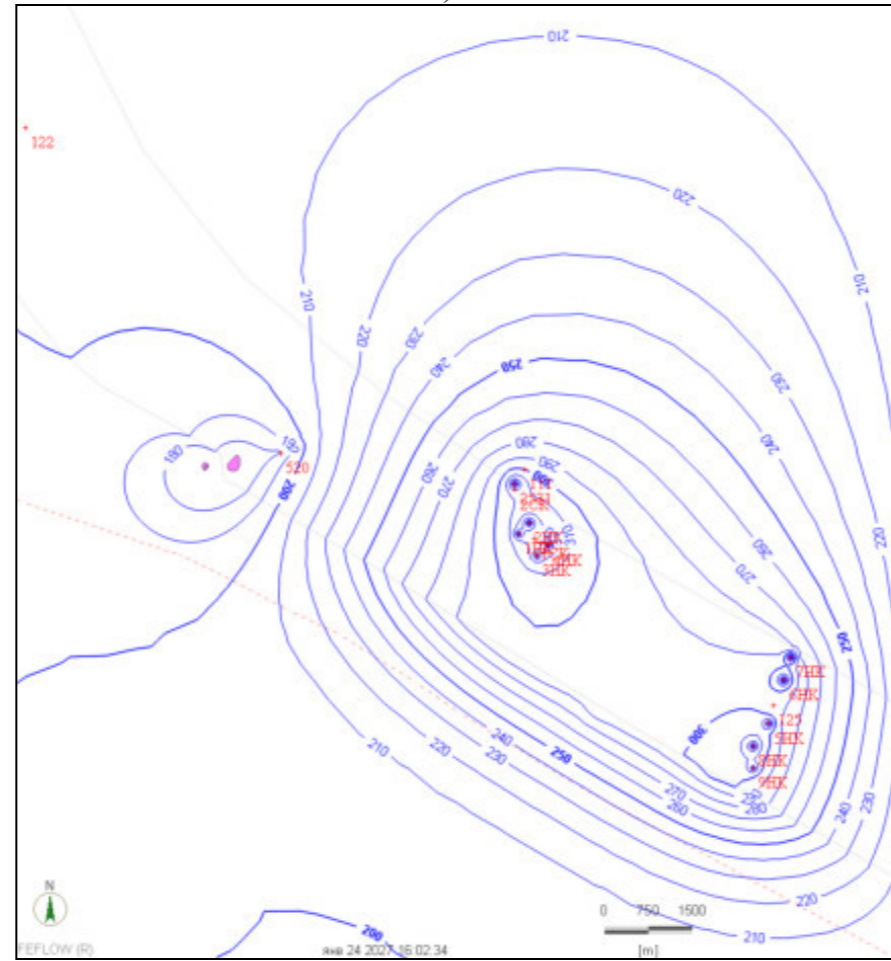
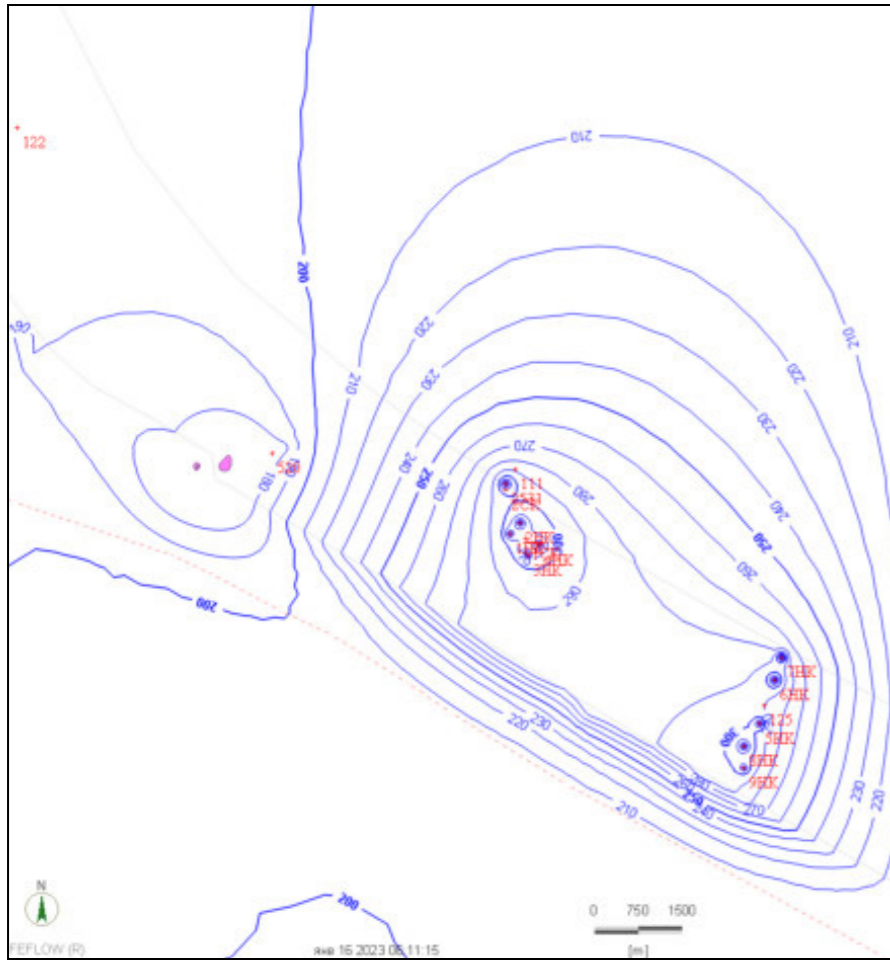
Положение уровня подземных вод НВК при эксплуатации скважин участка «Среднекембрийский»  
на 1-й год. на 5-й год. на 10-й год.



Положение уровня подземных вод НВК при эксплуатации скважин участка «Нижнекембрийский юго-восточный»

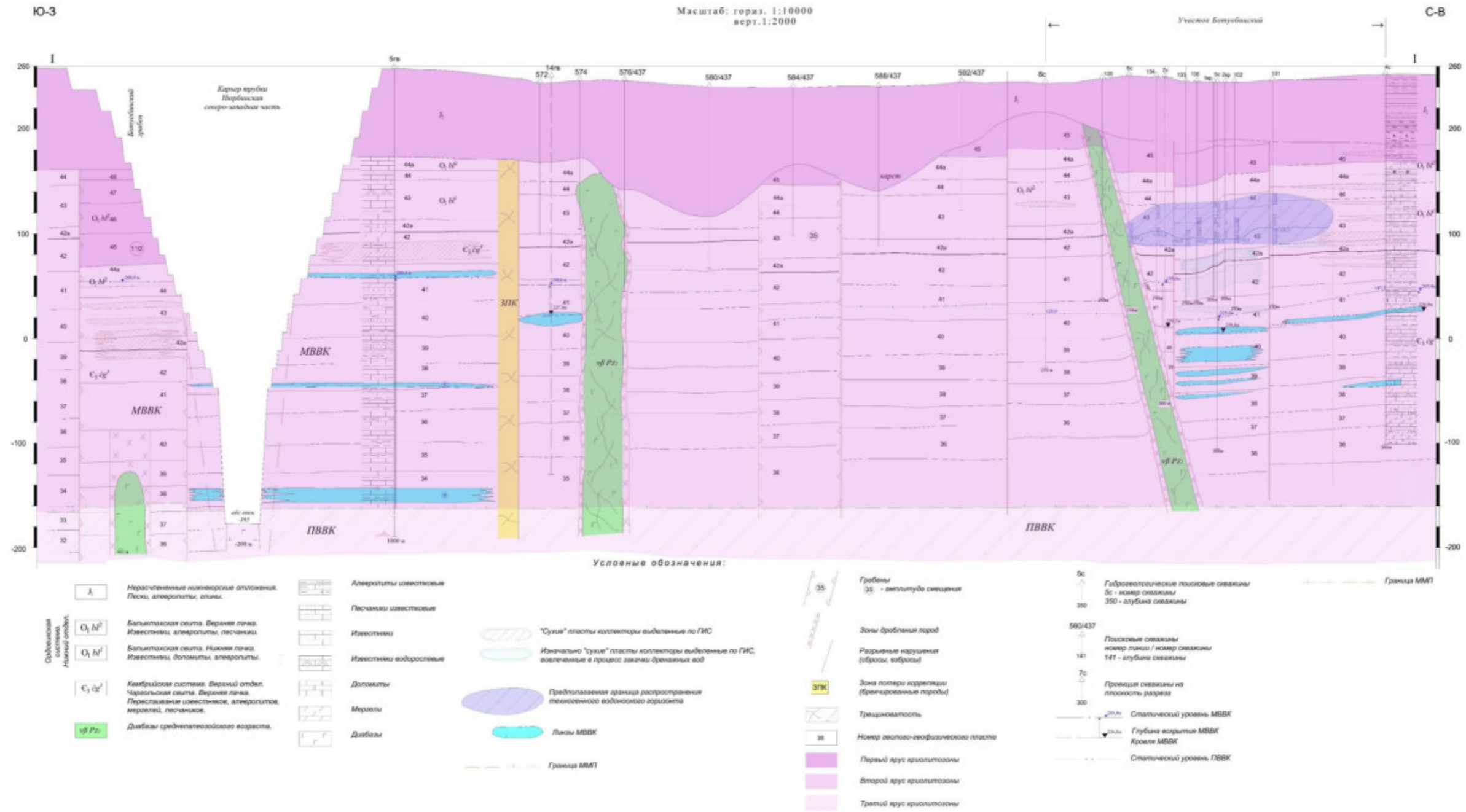


Положение уровня подземных вод НВК при совместной эксплуатации участков «Среднекембрийский» и «Нижнекембрийский юго-восточный» (расход  $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ )  
на 1-й г. б) на 5-й г. в) на 10-й г.



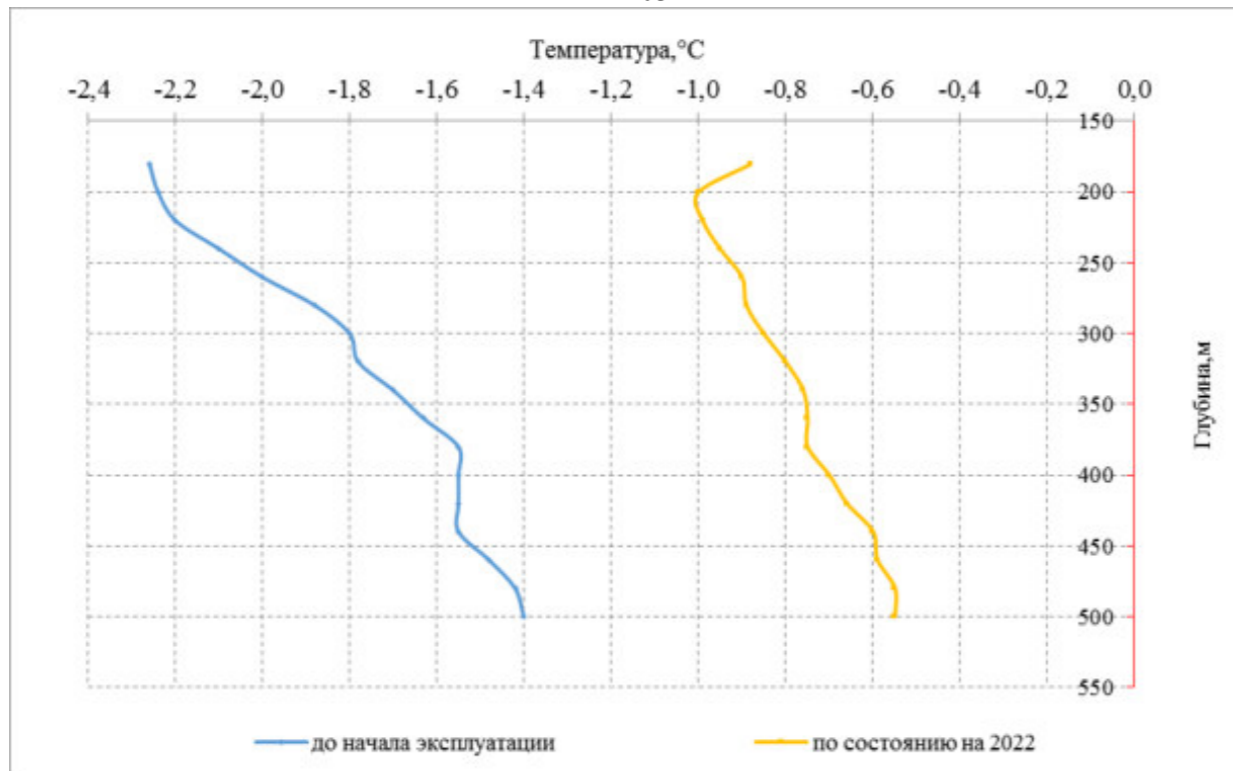


Участок закачки Ботубинский (сост. А.М. Янников)

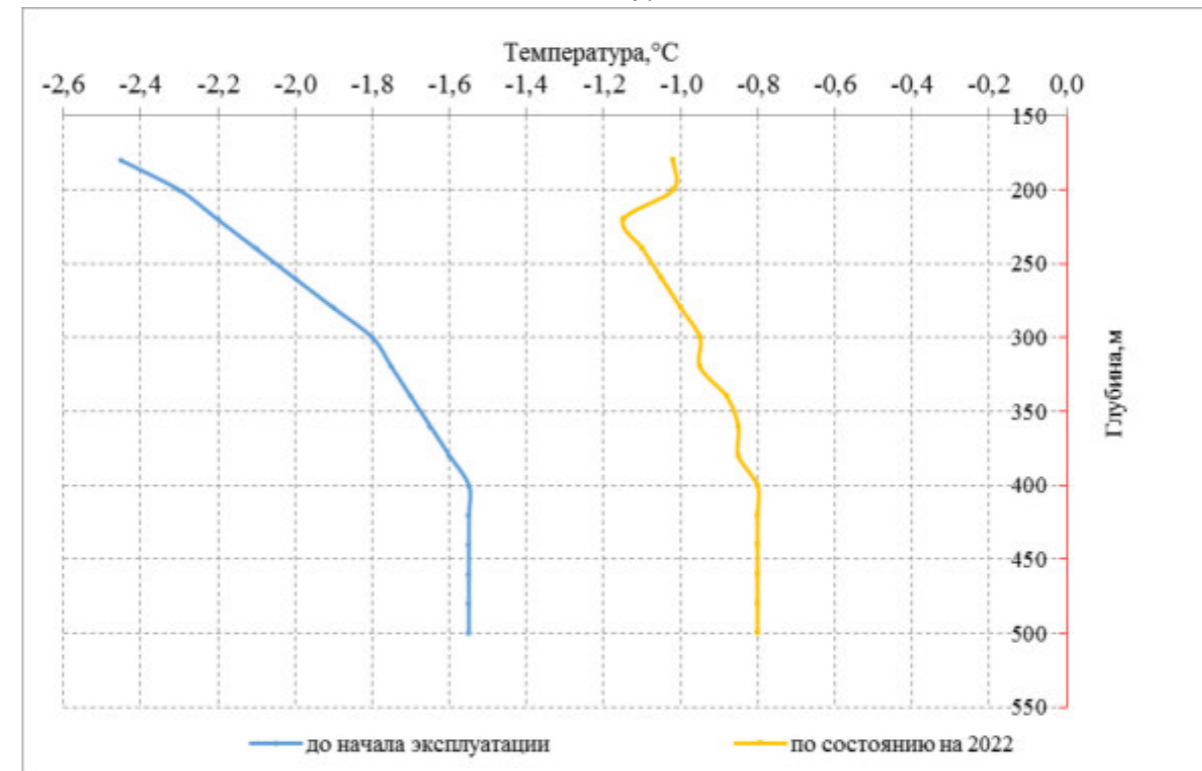


Осреднённые кривые изменения температуры по стволам закачных скважин в пределах участков второй группы (сост. А.М. Янников)

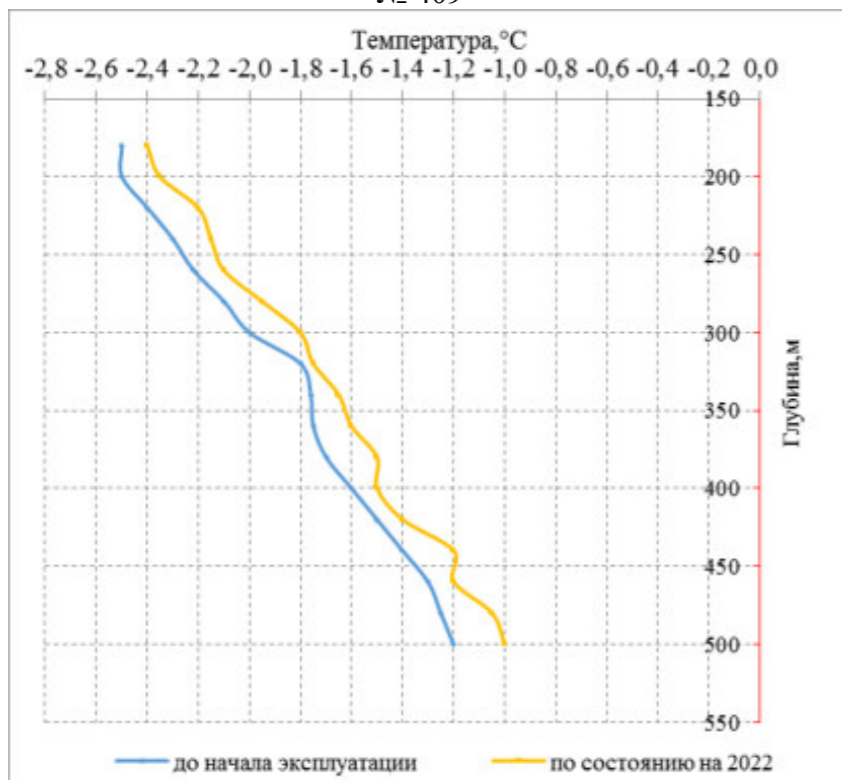
№ 403



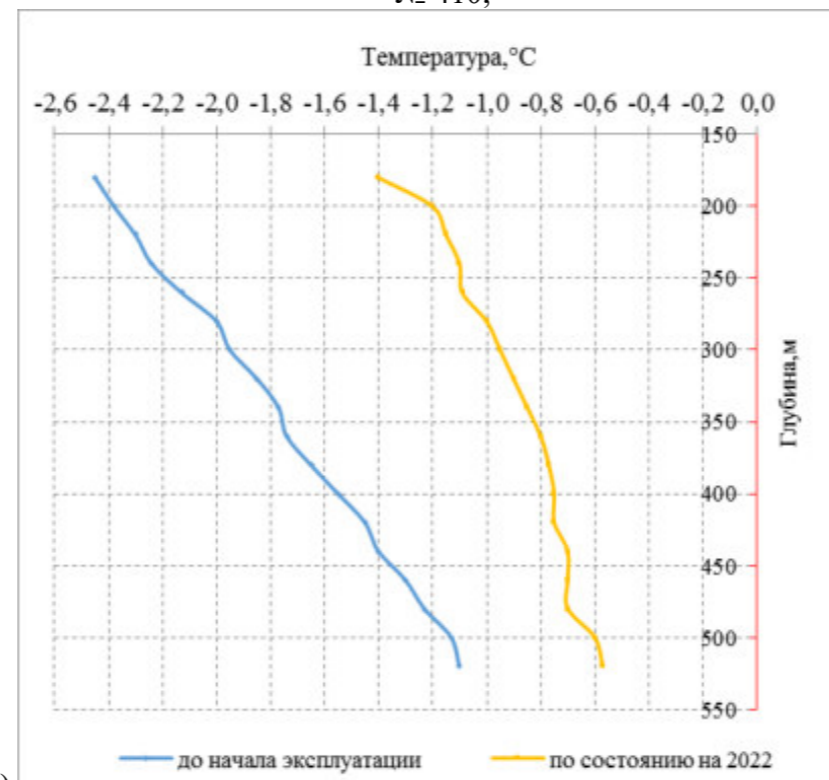
№ 407



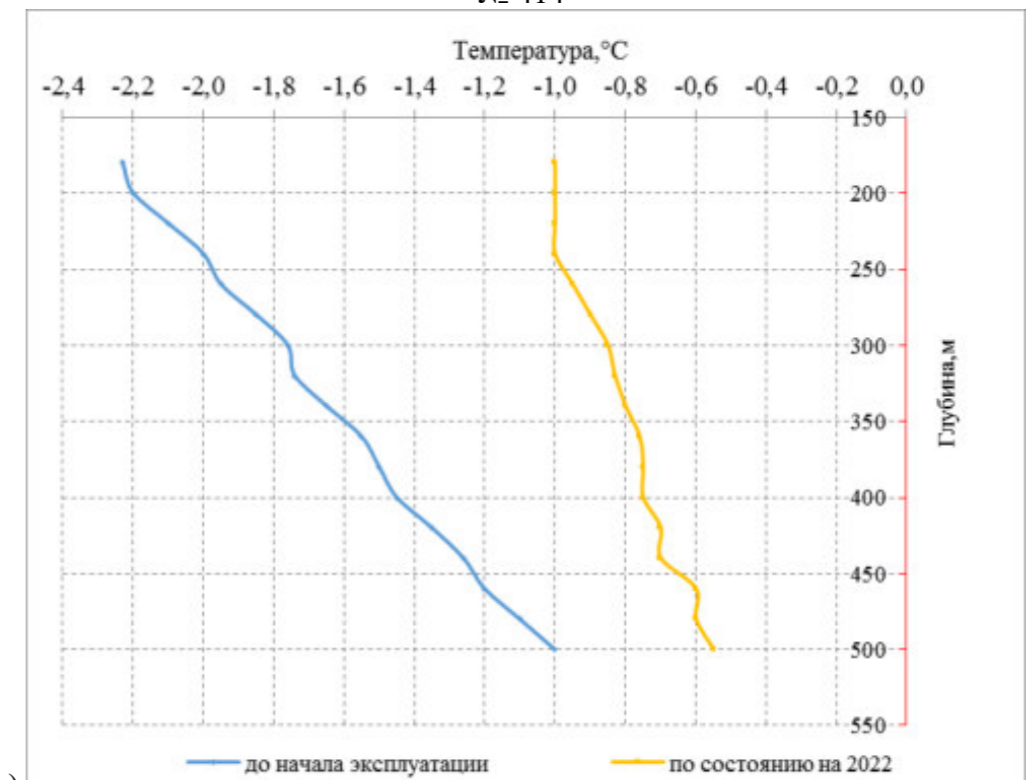
№ 409



№ 410;



№ 414

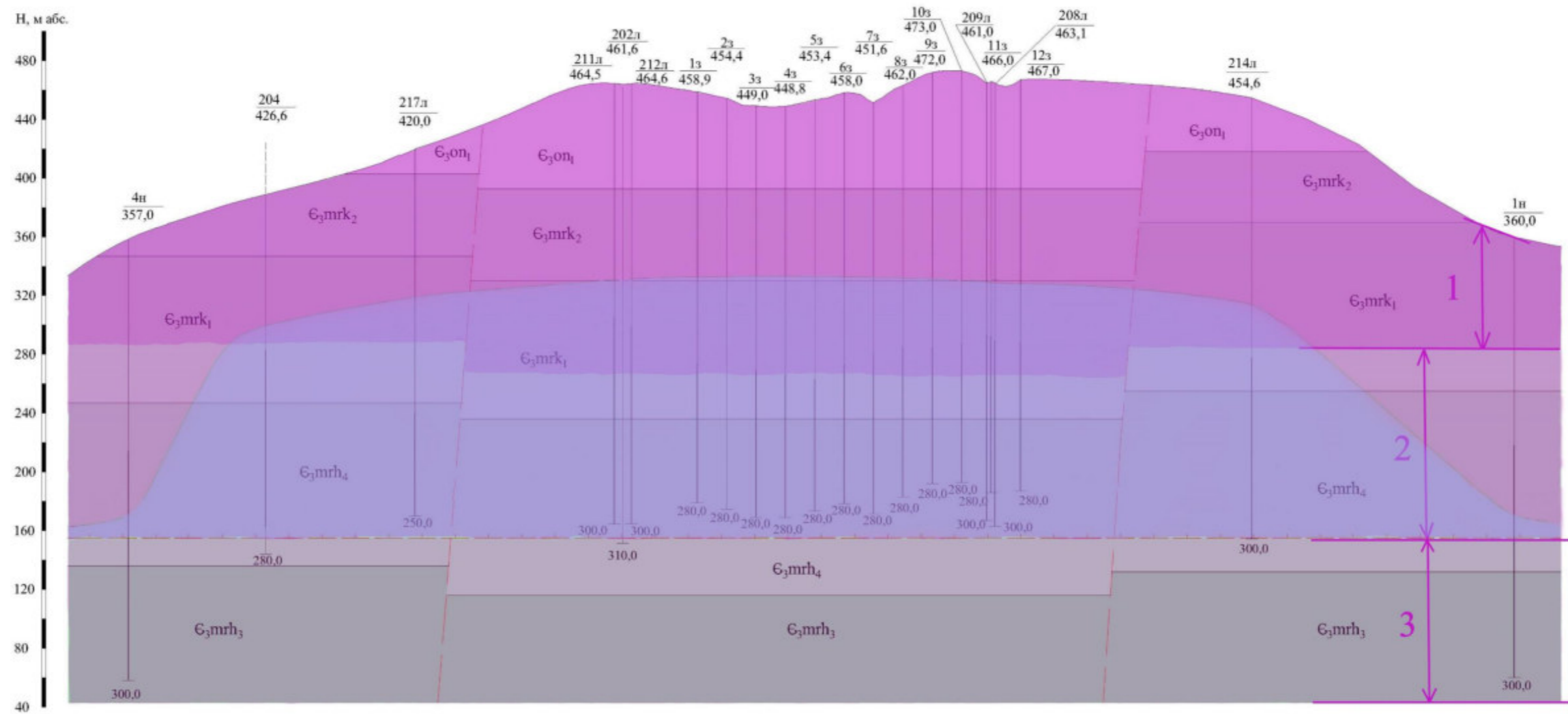


в)

г)

д)

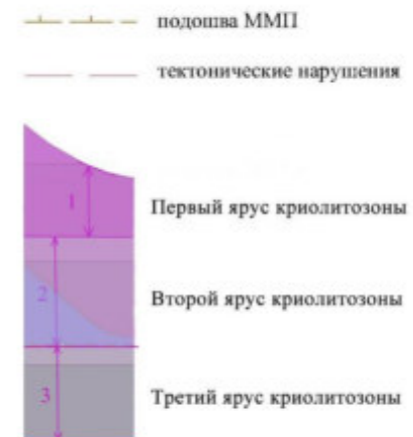
Криогидрогеологический разрез участков Левобережный и Киенгский [423]  
 Участок Левобережный



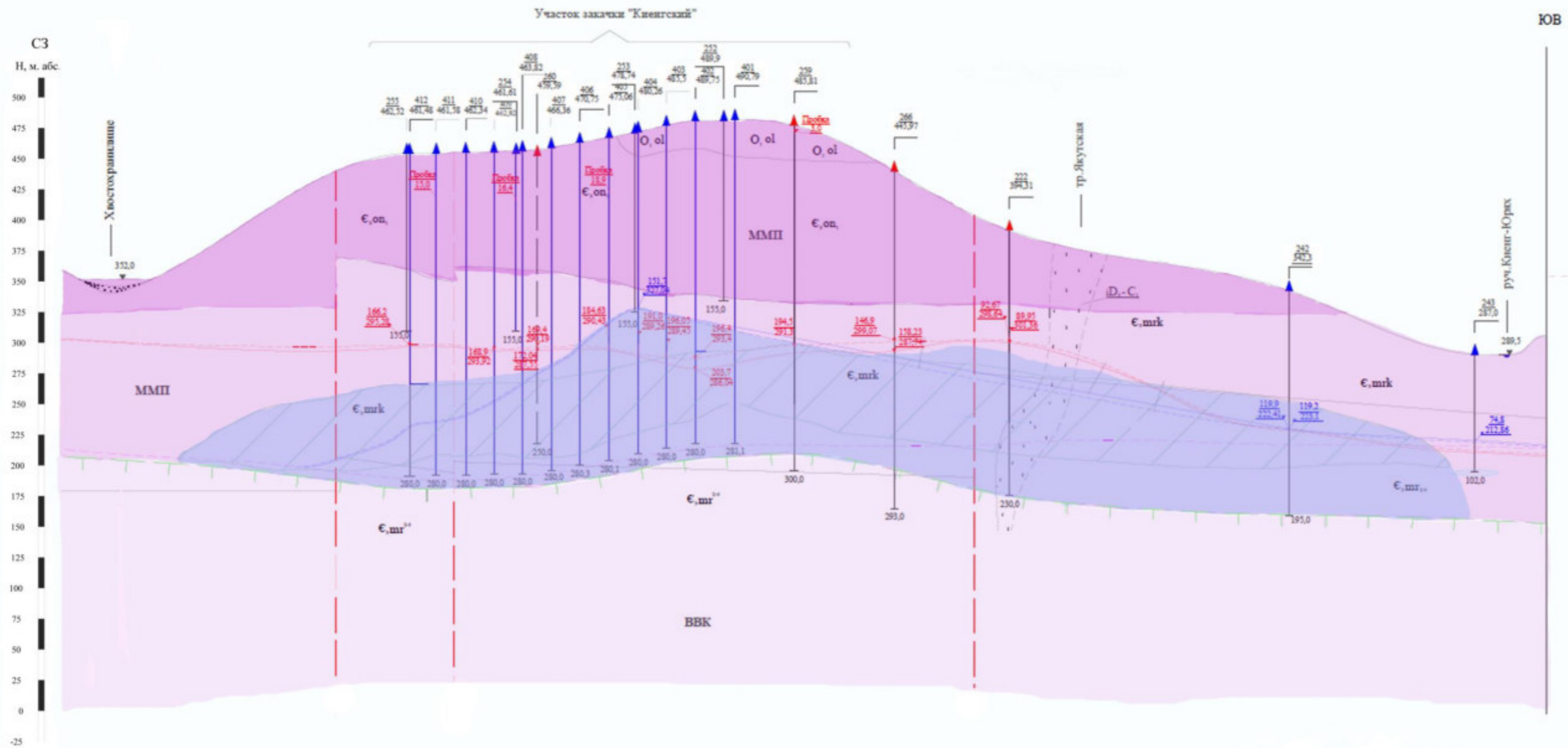
- Ойхойюряхская свита**
- E<sub>3on1</sub>** Нижняя пачка. Красновато-бурые и зеленовато-серые доломитовые мергели, доломитистые известняки и глинистые доломиты
- Моркокинская свита**
- E<sub>3mrk2</sub>** Верхняя подсвита. Плотные часто огипсованные желтовато- и зеленовато-серые доломиты, местами алевритистые. Прослои терригенных пород - кварцевые алевриты, песчаники, мергели
  - E<sub>3mrk1</sub>** Нижняя подсвита. Глинистые и алевритистые известняки, доломиты, известковистые конгломераты, линзы песчаников
  - Техногенный водоносный горизонт

- Мархинская свита**
- E<sub>3mrh4</sub>** Четвертая пачка. Ритмичное чередование битуминозных известняков и мергелей, аргиллитов, редкие прослои глинистых известняков
  - E<sub>3mrh3</sub>** Третья пачка. Известняки, известняки глинистые, оолитовые, мергели, редкие прослои известняков строматолитовых и обломочных, конгломерато-брекчий, известняковых песчаников
- Гидрогеологическая скважина
- вверху в числителе - номер скважины, в знаменателе - абс. отм. устья, м;
- фильтровая колонна
- внизу - глубина скважины, м

500 0 500 1000 1500 2000 м  
 Линия разреза на рисунке 3.6



Участок Куенгский (сост. А.М. Янников)



- Ойхойюряхская свита**
- Є<sub>3</sub>on<sub>1</sub> Нижняя пачка. Красно-бурые и зеленовато-серые доломитовые мергели, доломитистые известняки и глинистые доломиты
- Мархинская свита**
- Є<sub>3</sub>mrk<sub>2</sub> Верхняя подсвита. Плотные часто огипсованные желтовато- и зеленовато-серые доломиты, местами алевритистые. Прослои терригенных пород - кварцевые алевриты, песчаники, мергели
  - Є<sub>3</sub>mrk<sub>1</sub> Нижняя подсвита. Глинистые и алевритистые известняки, доломиты, известковистые конгломераты, линзы песчаников
- Первый ярус криолитозоны
  - Второй ярус криолитозоны
  - Третий ярус криолитозоны

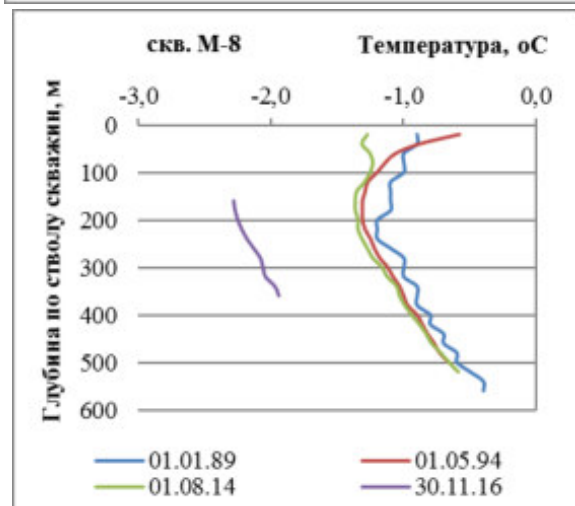
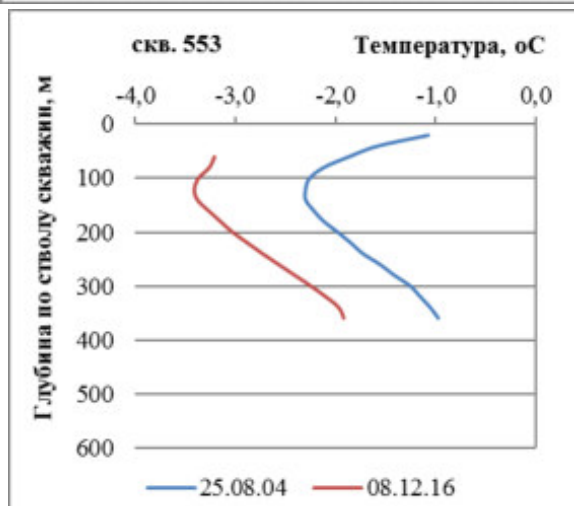
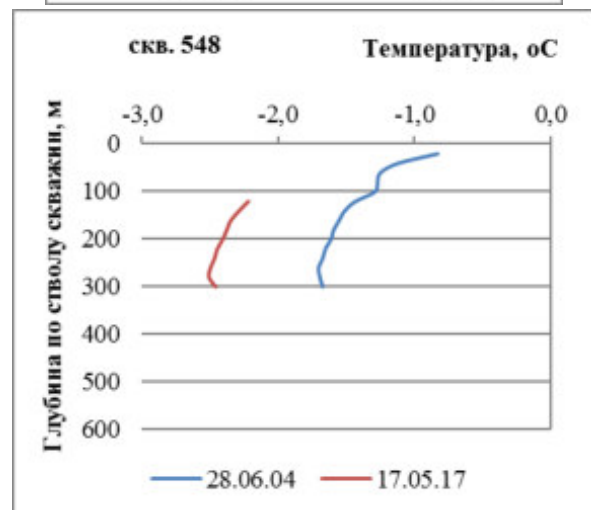
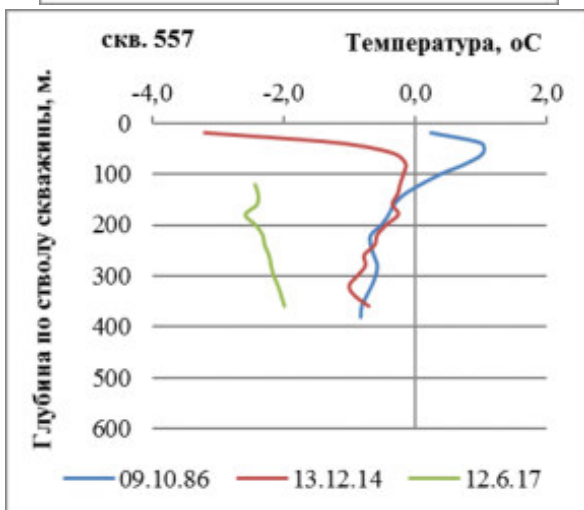
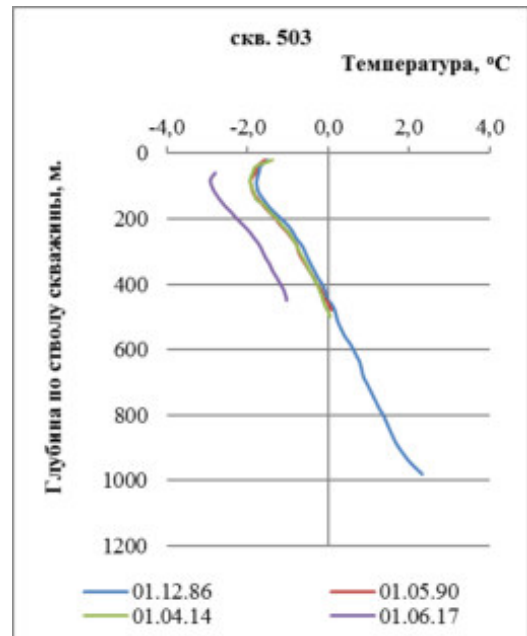
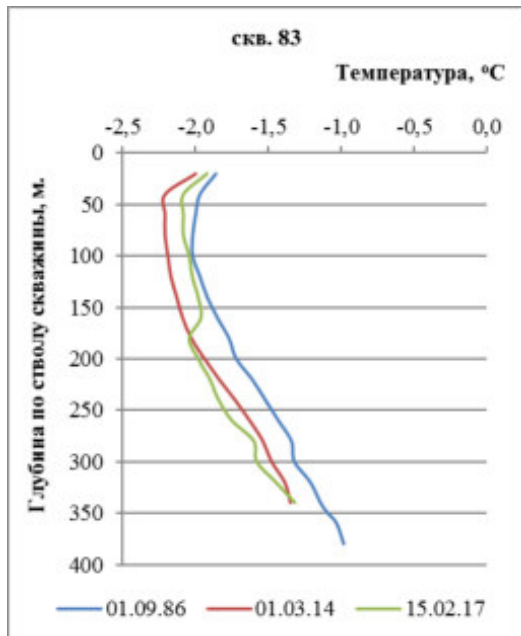
- Мархинская свита**
- Є<sub>3</sub>mrh<sub>4</sub> Четвертая пачка. Ритмичное чередование битуминозных известняков и мергелей, аргиллитов, редкие прослои глинистых известняков
  - Є<sub>3</sub>mrh<sub>3</sub> Третья пачка. Известняки, известняки глинистые, оолитовые, мергели, редкие прослои известняков строматолитовых и обломочных, конгломерато-брекчий, известняковых песчаников
- Гидрогеологическая скважина
- 212л / 464,6  
 —————  
 300,0
- вверху в числителе - номер скважины, в знаменателе - абс. отм. устья, м;
- фильтровая колонна
- внизу - глубина скважины, м
- Техногенный водоносный горизонт

Масштаб: горизонтальный - 1:25 000  
 вертикальный - 1:2 500

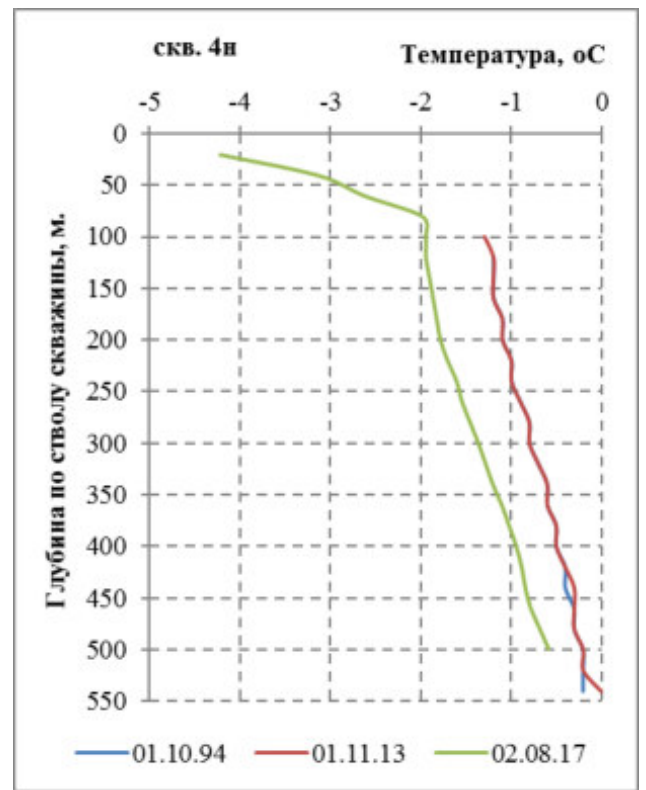
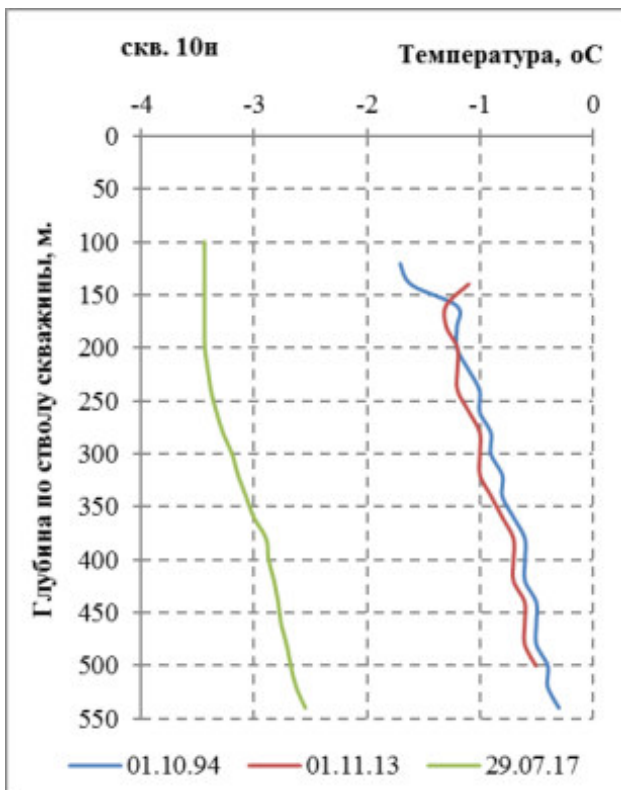
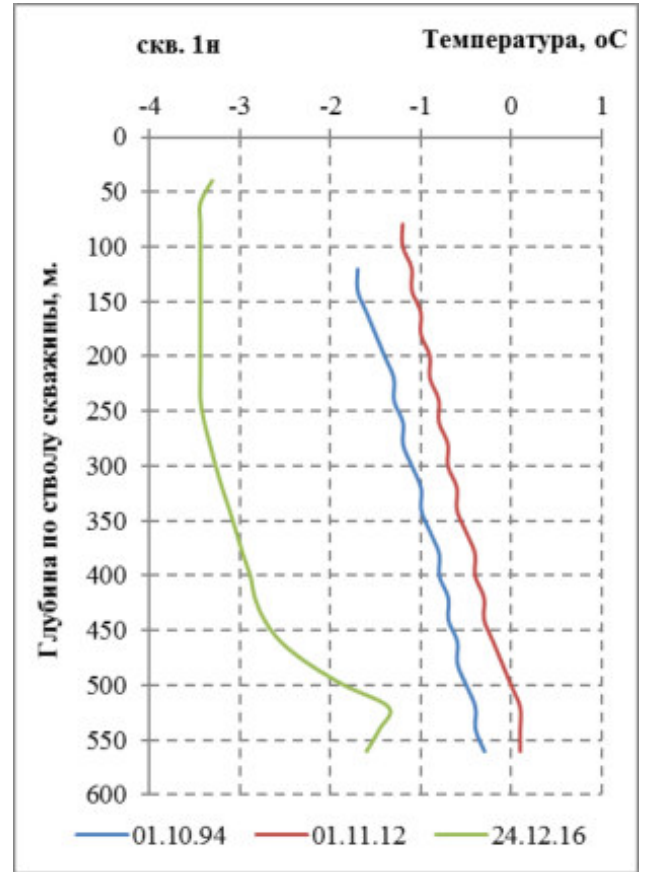
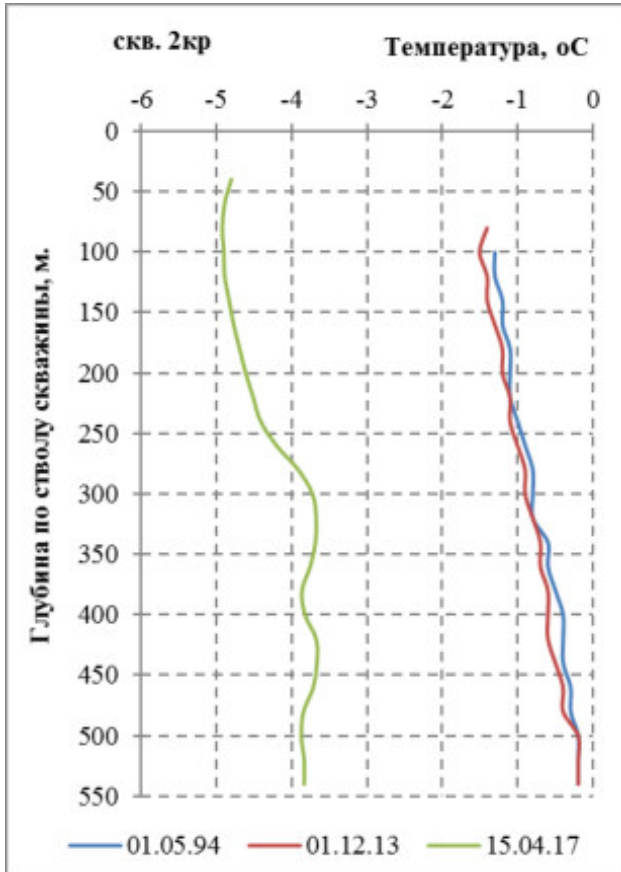
— — — — — подошва ММП  
 — — — — — тектонические нарушения

Характеристические осреднённые кривые изменения температуры по стволам наблюдательных скважин в пределах участков четвертой группы (сост. А.М. Янников)

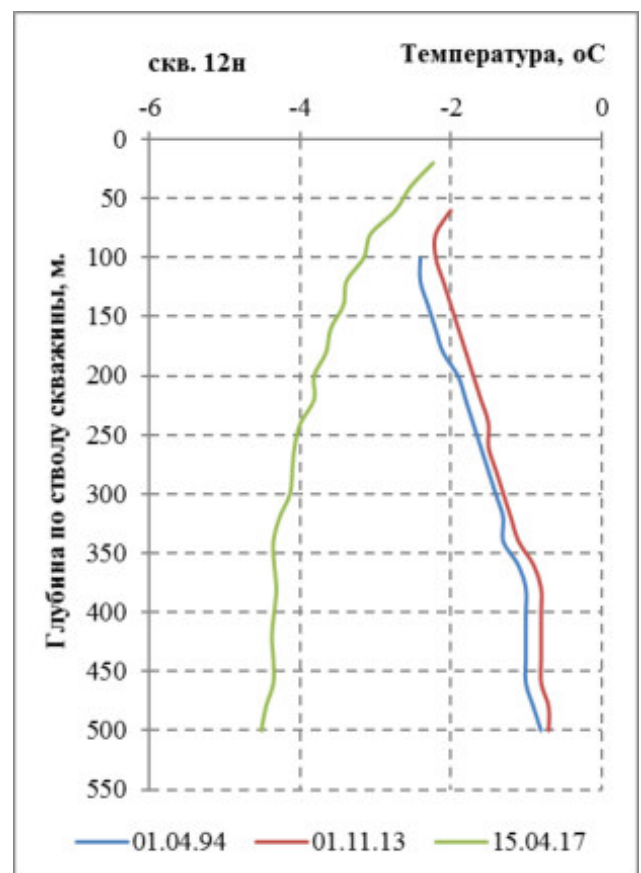
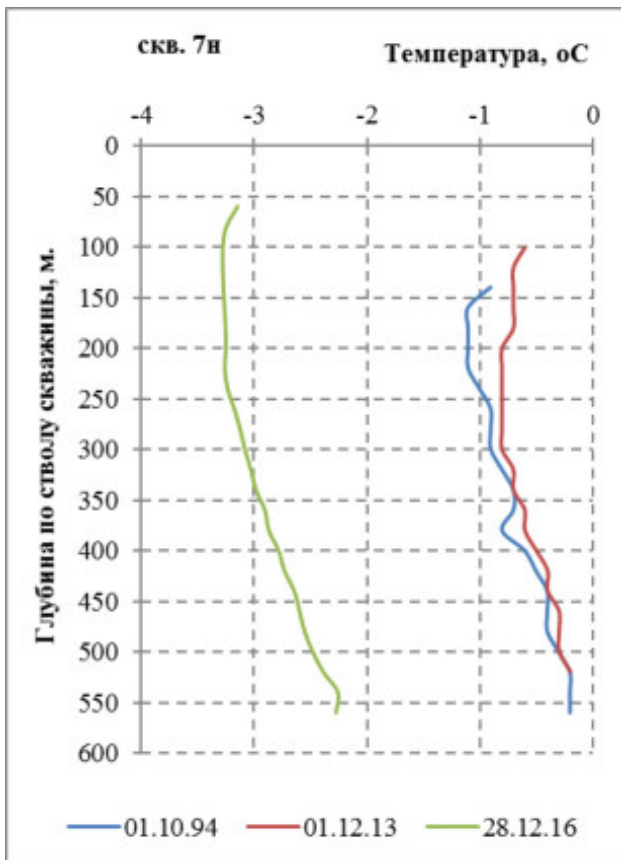
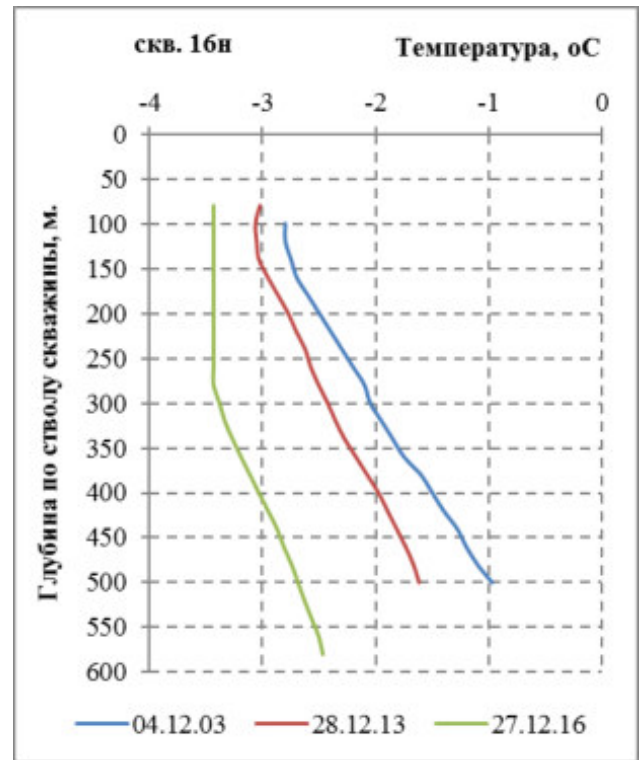
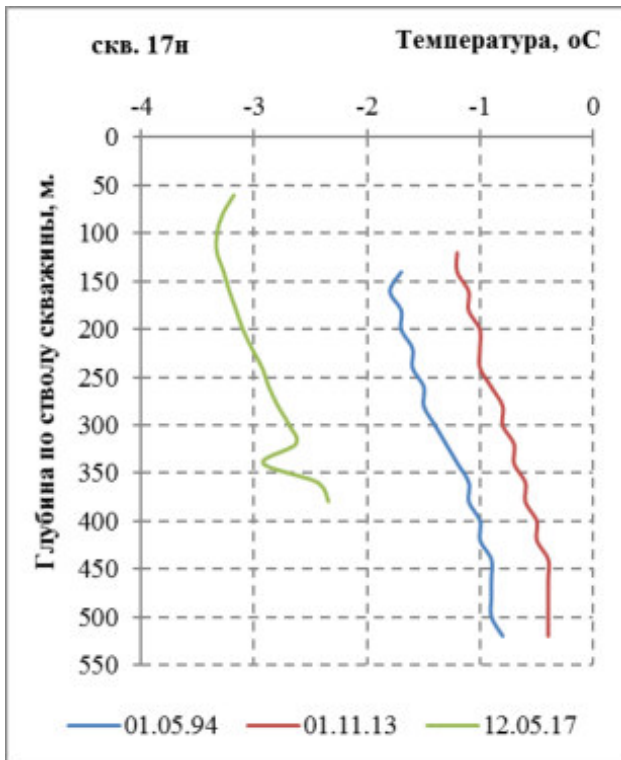
*Динамика изменения температуры в скважинах региональной режимной сети*



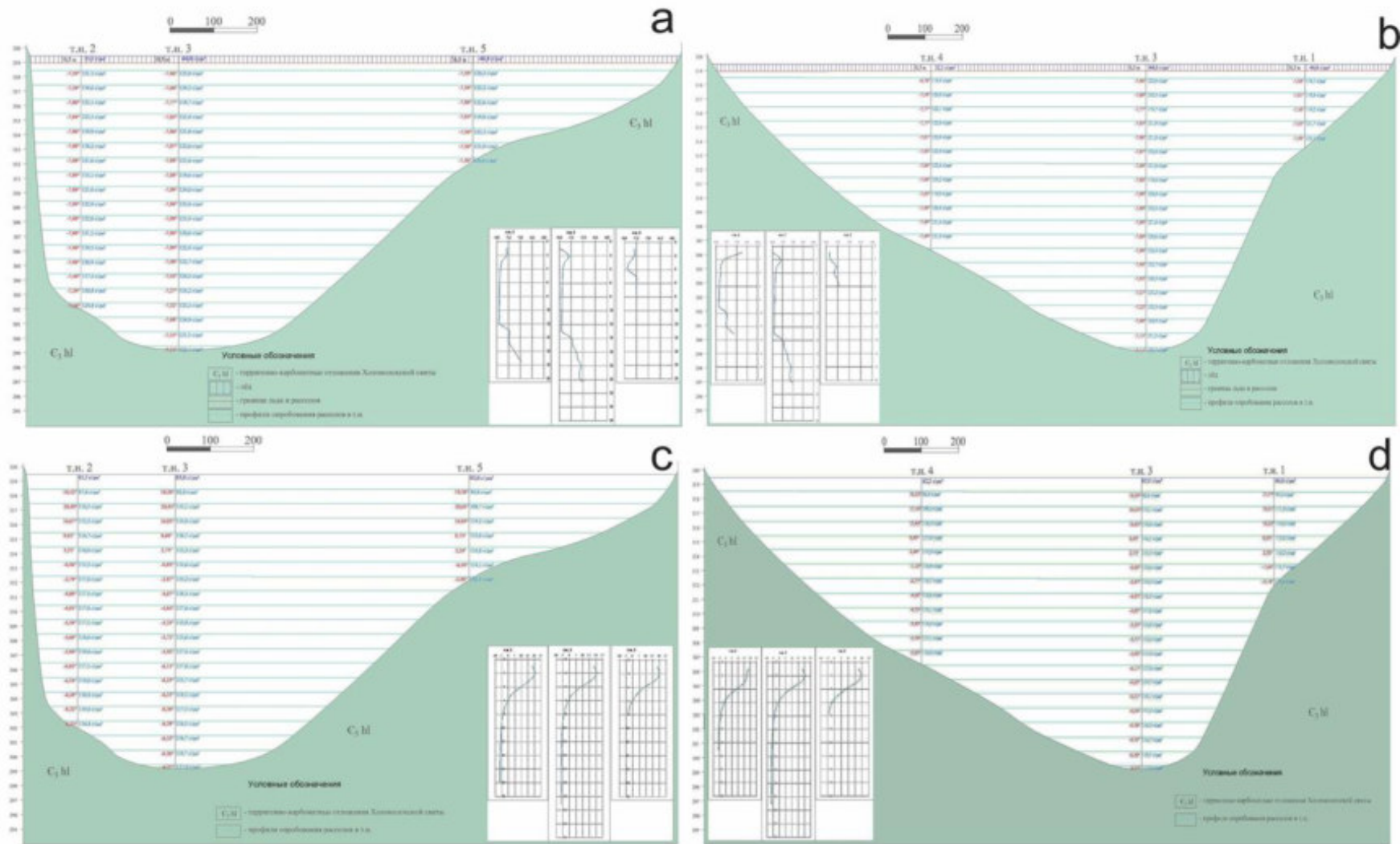
Динамика изменения температуры по стволу скважин, расположенных в эпицентре закачки



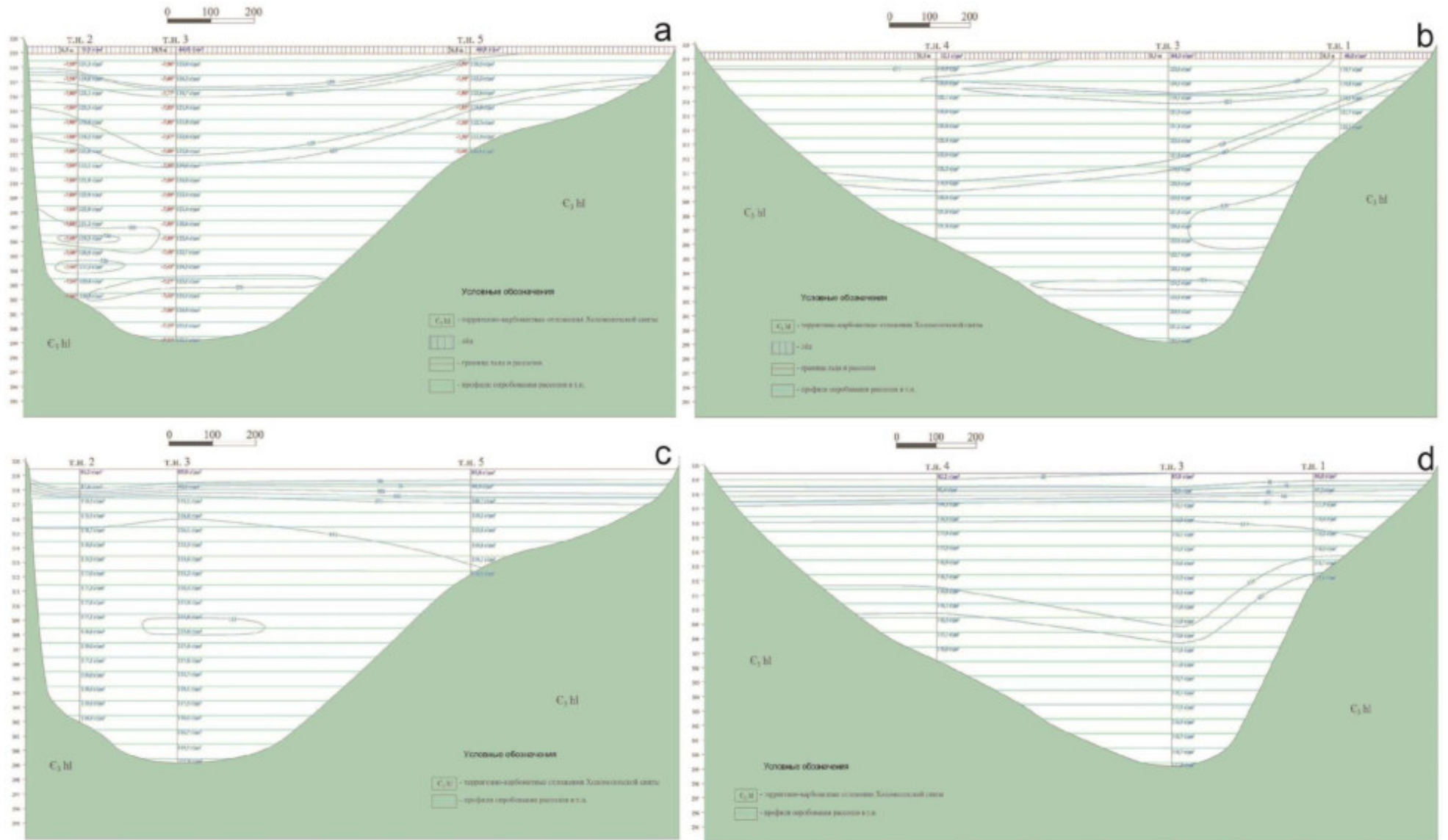
Динамика изменения температуры по стволу скважин, расположенных в зоне Восточного разлома (севернее закачных скважин) и в межразломном блоке



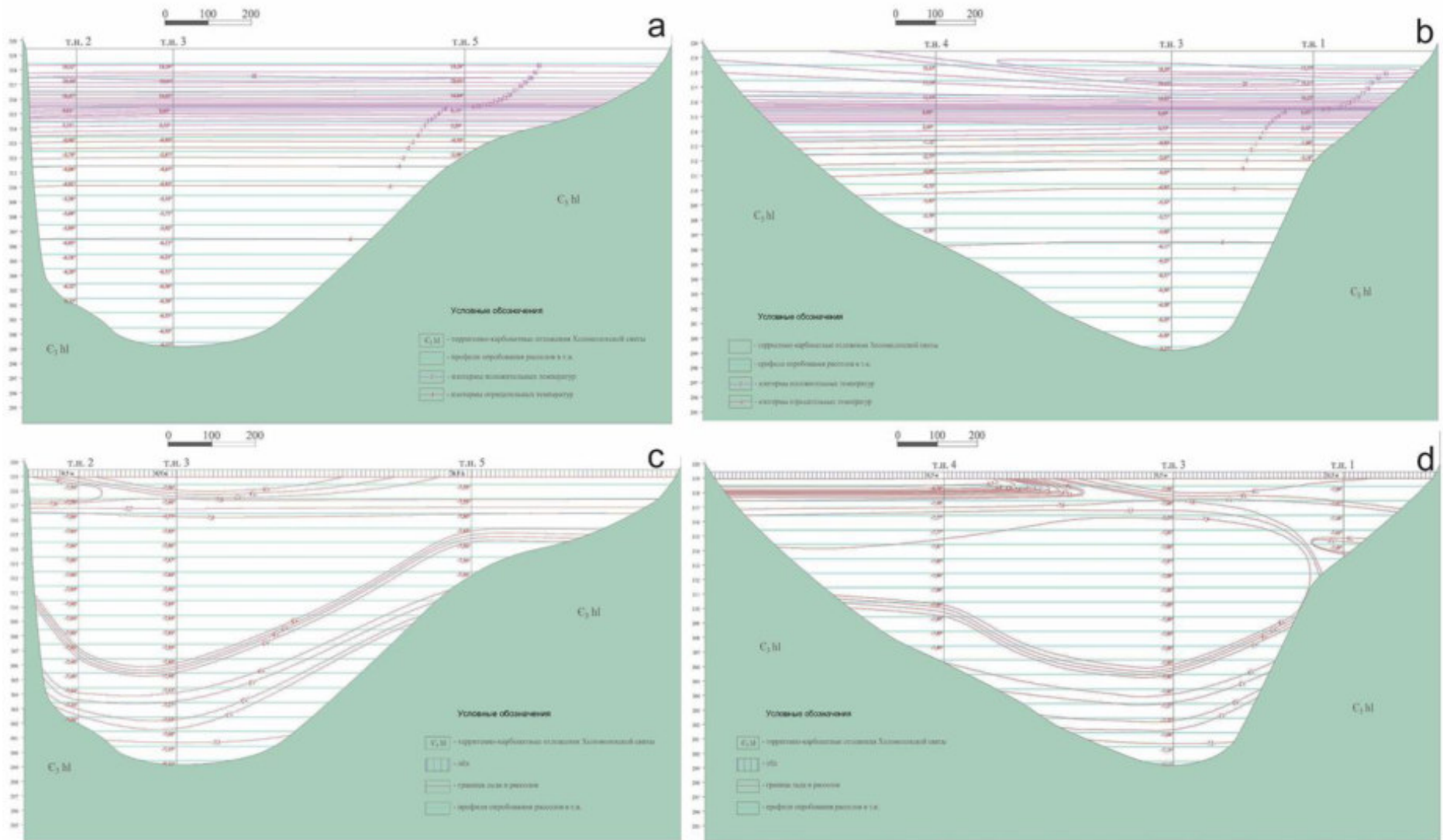
## Профили по накопителю Тымтайдах (сост. А.М. Янников)



Примечание: а) т.н.2-т.н.5, зимний период; б) т.н.4-т.н.1, зимний период; в) т.н.2-т.н.5, летний период; д) т.н.4-т.н.1, летний период



Примечание: Изомины по накопителю Тымтайдах: а) т.н.2-т.н.5, зимний период; б) т.н.4-т.н.1, зимний период; в) т.н.2-т.н.5, летний период; д) т.н.4-т.н.1, летний период



Примечание: Изотермы по накопителю Тымтайдах: а) т.н.2-т.н.5, зимний период; б) т.н.4-т.н.1, зимний период; с) т.н.2-т.н.5, летний период; д) т.н.4-т.н.1, летний период

Ресурсный потенциал дренажных вод кимберлитовых трубок Западной Якутии (сост. А.М.

Янников)

*Ресурсный потенциал дренажных вод трубок*

*Алакит-Мархинского кимберлитового поля*

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут		Объём рассолов, м <sup>3</sup>		Суммарное количество Li, тонн
	Айхал	Юбилейная	Айхал	Юбилейная	
1	2	3	4	5	6
2023	310	17	113 150	6 205	1,8
2024	310	17	113 460	6 222	1,8
2025	310	17	113 150	6 205	1,8
2026	310	17	113 150	6 205	1,8
2027	310	17	113 150	6 205	1,8
2028	310	17	113 460	6 222	1,8
2029	410	17	149 650	6 205	2,3
2030	410	17	149 650	6 205	2,3
2031	410	420	149 650	153 300	4,5
2032	410	420	150 060	153 720	4,6
2033	410	420	149 650	153 300	4,5
2034	410	580	149 650	211 700	5,4
2035	410	580	149 650	211 700	5,4
2036	410	580	150 060	212 280	5,4
2037	410	580	149 650	211 700	5,4
2038	410	580	149 650	211 700	5,4
2039	430	580	156 950	211 700	5,5
2040	430	560	157 380	204 960	5,4
2041	430	560	156 950	204 400	5,4
2042	430	560	156 950	204 400	5,4
2043	430	560	156 950	204 400	5,4
2044	430	560	157 380	204 960	5,4
2045	-	560	0	204 400	3,1
2046	-	980	0	357 700	5,4
2047	-	980	0	357 700	5,4
2048	-	980	0	358 680	5,4
2049	-	980	0	357 700	5,4
2050	-	980	0	357 700	5,4
2051	-	980	0	357 700	5,4
2052	-	980	0	358 680	5,4
2053	-	980	0	357 700	5,4
2054	-	980	0	357 700	5,4
<b>ИТОГО</b>					<b>140,2</b>

*Ресурсный потенциал дренажных вод трубок Мирнинского кимберлитового поля,  
образующихся при осушении коллекторов олекминской, толбачанской и эльгянской свит*

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут		Объём рассолов, м <sup>3</sup>		Суммарное количество Li, тонн
	Интернациональная	Мир	Интернациональная	Мир	
1	2	3	4	5	6
2023	20	-	7 300	0	1,8
2024	20	-	7 320	0	1,8
2025	20	-	7 300	0	1,8
2026	20	-	7 300	0	1,8
2027	40	-	14 600	0	3,7
2028	40	200	14 640	73 200	22,0
2029	40	200	14 600	73 000	21,9
2030	40	200	14 600	73 000	21,9
2031	40	200	14 600	73 000	21,9
2032	40	100	14 640	36 600	12,8
2033	40	100	14 600	36 500	12,8
2034	40	100	14 600	36 500	12,8
2035	40	150	14 600	54 750	17,3
2036	40	150	14 640	54 900	17,4
2037	40	150	14 600	54 750	17,3
2038	40	150	14 600	54 750	17,3
2039	40	150	14 600	54 750	17,3
2040	40	150	14 640	54 900	17,4
2041	40	150	14 600	54 750	17,3
2042	40	150	14 600	54 750	17,3
2043	-	150	0	54 750	13,7
2044	-	150	0	54 900	13,7
2045	-	150	0	54 750	13,7
2046	-	150	0	54 750	13,7
2047	-	150	0	54 750	13,7
2048	-	150	0	54 900	13,7
2049	-	150	0	54 750	13,7
2050	-	150	0	54 750	13,7
2051	-	150	0	54 750	13,7
2052	-	150	0	54 900	13,7
2053	-	150	0	54 750	13,7
2054	-	150	0	54 750	13,7
<b>ИТОГО</b>					<b>440,1</b>

*Ресурсный потенциал дренажных вод трубок Мирнинского кимберлитового поля,  
образующихся при осушении метегеро-ичерского водоносного комплекса*

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут		Объём рассолов, м <sup>3</sup>		Суммарное количество Li, тонн
	Интернациональная	Мир	Интернациональная	Мир	
1	2	3	4	5	6
2023	30	-	10 950	0	0,0
2024	30	-	10 980	0	0,0
2025	500	-	182 500	0	0,1
2026	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2027	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2028	24 000	-	8 784 000	0	5,3
2029	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2030	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2031	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2032	24 000	-	8 784 000	0	5,3
2033	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2034	24 000	-	8 760 000	0	5,3
2035	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2036	24 000	48 000	8 784 000	17 568 000	15,8
2037	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2038	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2039	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2040	24 000	48 000	8 784 000	17 568 000	15,8
2041	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2042	24 000	48 000	8 760 000	17 520 000	15,8
2043	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2044	-	48 000	0	17 568 000	10,5
2045	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2046	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2047	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2048	-	48 000	0	17 568 000	10,5
2049	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2050	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2051	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2052	-	48 000	0	17 568 000	10,5
2053	-	48 000	0	17 520 000	10,5
2054	-	48 000	0	17 520 000	10,5
<b>ИТОГО</b>					<b>300,0</b>

## Ресурсный потенциал дренажных вод Накынского кимберлитового поля

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут		Объём рассолов, м <sup>3</sup>		Суммарное количество Li, тонн
	Нюрбинская	Ботуобинская	Нюрбинская	Ботуобинская	
1	2	3	4	5	6
2023	107	0	39 055	0	0,8
2024	103	0	37 698	0	0,8
2025	102	0	37 230	0	0,7
2026	101	0	36 865	0	0,7
2027	100	0	36 500	0	0,7
2028	100	0	36 600	0	0,7
2029	99	51	36 135	18 615	1,1
2030	99	67,2	36 135	24 528	1,2
2031	101	64	36 865	23 360	1,2
2032	101	71,8	36 966	26 278,8	1,3
2033	101	72,9	36 865	26 608,5	1,3
2034	101	77,2	36 865	28 178	1,3
2035	103	85,4	37 595	31 171	1,4
2036	102	89,7	37 332	32 830,2	1,4
2037	102	97,5	37 230	35 587,5	1,5
2038	104	105,1	37 960	38 361,5	1,5
2039	105	138,1	38 325	50 406,5	1,8
2040	107	59	39 162	21 594	1,2
2041	109	61	39 785	22 265	1,2
2042	108	63	39 420	22 995	1,2
2043	108	64	39 420	23 360	1,3
2044	108	64	39 528	23 424	1,3
<b>ИТОГО</b>					<b>25,6</b>

## Ресурсный потенциал Верхне-Мунского кимберлитового поля

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут		Объём рассолов, м <sup>3</sup>		Суммарное количество Li, тонн
	Заполярный	Магнитный	Заполярный	Магнитный	
1	2	3	4	5	6
2031	577		210 500		3,6
2032	1 560		570 900		9,7
2033	2 205		804 900		13,7
2034	2 855		1 041 900		17,7
2035	3 702		1 351 200		23,0
2036	4 514	3684	1 652 000	1 348 200	51,0
2037	4 888	4641	1 784 100	1 694 100	59,1
2038		4975		1 815 800	30,9
<b>ИТОГО</b>					<b>208,7</b>

## Ресурсный потенциал дренажных вод трубки Удачная

Год	Приток, м <sup>3</sup> /сут	Объём рассолов, м <sup>3</sup>	Суммарное количество Li, тонн
2023	6 480	2 365 200	331,1
2024	6 480	2 371 680	332,0
2025	7 200	2 628 000	367,9
2026	7 728	2 820 720	394,9
2027	7 728	2 820 720	394,9
2028	8 400	3 074 400	430,4
2029	8 400	3 066 000	429,2
2030	8 400	3 066 000	429,2
2031	8 400	3 066 000	429,2
2032	9 600	3 513 600	491,9
2033	9 600	3 504 000	490,6
2034	9 600	3 504 000	490,6
2035	10 800	3 942 000	551,9
2036	10 800	3 952 800	553,4
2037	11 400	4 161 000	582,5
2038	12 000	4 380 000	613,2
2039	12 600	4 599 000	643,9
2040	13 200	4 831 200	676,4
2041	13 200	4 818 000	674,5
2042	13 680	4 993 200	699,0
2043	13 848	5 054 520	707,6
2044	13 920	5 094 720	713,3
2045	13 920	5 080 800	711,3
2046	13 920	5 080 800	711,3
2047	14 040	5 124 600	717,4
2048	14 040	5 138 640	719,4
2049	14 040	5 124 600	717,4
2050	14 400	5 256 000	735,8
2051	15 600	5 694 000	797,2
2052	15 600	5 709 600	799,3
2053	16 800	6 132 000	858,5
2054	16 800	6 132 000	858,5
2055	18 000	6 570 000	919,8
2056	18 000	6 588 000	922,3
2057	21 600	7 884 000	1 103,8
2058	21 600	7 884 000	1 103,8
2059	28 800	10 512 000	1 471,7
2060	28 800	10 540 800	1 475,7
2061	36 000	13 140 000	1 839,6
2062	40 800	14 892 000	2 084,9
2063	40 800	14 892 000	2 084,9
2064	40 800	14 932 800	2 090,6
2065	40 800	14 892 000	2 084,9
2066	40 800	14 892 000	2 084,9
2067	40 800	14 892 000	2 084,9
2068	40 800	14 932 800	2 090,6
2069	40 800	14 892 000	2 084,9
2070	40 800	14 892 000	2 084,9
<b>ИТОГО</b>			<b>46 665,9</b>