*ГЕОЭКОЛОГИЯ. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ГИДРОГЕОЛОГИЯ. ГЕОКРИОЛОГИЯ, 2023, № 2, с. 43–55*

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*УДК 556.388*

# ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ДАЛДЫНСКОГО КИМБЕРЛИТОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ТРУБОК ЗАРНИЦА И УДАЧНАЯ

**© 2023 г. А. М. Янников[1,*]**

*[1]Институт "Якутнипроалмаз" АК АЛРОСА (ПАО), ул. Ленина, 39, Мирный, Республика Саха (Якутия), 678174 Россия*

**E-mail: yannikov90@mail.ru*

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.
После доработки 11.02.2023 г.
Принята к публикации 27.02.2023 г.

Проблема экологически безопасной утилизации дренажных вод, возникающих при отработке коренных месторождений алмазов, на настоящий момент приобретает все большую значимость в связи с необходимостью снижения техногенной нагрузки на окружающую среду и с введением новых экологически безопасных методик и технических решений. Дренажные воды Далдынского кимберлитового поля в разные периоды отработки закачивались в участки Октябрьский (1985–2002 гг.), Киенгский (2003–2012 гг.), Левобережный (2012–2023 гг.), в настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2. Вследствие исчерпания полезной емкости существующих участков закачки были поставлены задачи – определить возможности дальнейшего использования коллекторов толщи многолетнемерзлых пород на площади работ, выделить и оценить наиболее перспективные для будущей закачки участки. В качестве объектов исследования выступают толщи верхнекембрийских отложений, залегающие в подошвенной части толщи многолетнемерзлых пород, ниже главных базисов эрозии территории исследований. С учетом анализа имеющейся информации по криогидрогеологическому, литолого-фациальному и структурно-геологическому строению изучаемой территории была составлена прогнозная карта участков, перспективных для геологического изучения и дальнейшей опытной эксплуатации, с оценкой их полезных объемов. При прогнозируемых притоках дренажных вод строительство выделенных участков позволит дополнительно закачать ~40 млн м$^3$, что обеспечит дальнейшую экологически безопасную отработку месторождений Далдынского кимберлитового поля до середины 30-х годов XXI в. Рассматриваемый способ закачки дренажных вод может быть использован в смежных областях горной промышленности при отработке не только кимберлитовых трубок, но и других твердых полезных ископаемых в условиях криолитозоны.

**Ключевые слова:** *Далдынское кимберлитовое поле*, *трубка Зарница*, *трубка Удачная*, *природные рассолы*, *участки закачки*

**DOI:** 10.31857/S0869780923020108, **EDN:** TWUQDS

## ВВЕДЕНИЕ

В пределах Далдынского кимберлитового поля в настоящее время статус месторождений имеют трубки Зарница и Удачная. Трубка Зарница – это первое коренное месторождение алмазов, открытое на территории нашей страны 21 августа 1954 г. Л.А. Попугаевой. Месторождение в настоящее время отрабатывается карьером, в конце 2026 г. предполагается вскрытие подмерзлотных рассолов. Ресурсный потенциал месторождения позволяет рассматривать его отработку как минимум до 2032 г. В 1955 г. советским геологом Амакинской ГРЭ В.Н. Щукиным было открыто крупнейшее в нашей стране коренное месторождение алмазов – трубка Удачная. Уникальный ресурсный потенциал месторождения предопределил двухэтапность его отработки: верхняя часть до глубины 640 м отработана карьером в период 1971–2014 гг., с 2015 г. отработка подкарьерных запасов продолжена подземным способом. Ресурсный потенциал месторождения позволяет вести добычу подземным способом до глубин свыше 1600 м от дневной поверхности, т.е. как минимум до 2070 г.

При строительстве карьера Удачный в начале 1980-х годов были вскрыты высокоминерализованные природные рассолы, что потребовало разработки методов и технологий обращения с ними. В результате комплекса работ, проведенного специалистами Амакинской ГРЭ, Мирнинской ГРЭ, ИЗК СО РАН и Института Якутнипроалмаз, было обосновано и доказано, что наиболее пер-

спективный способ утилизации дренажных рассолов – их закачка в недра, причем для этого было предложено использовать толщу многолетнемерзлых пород (ММП) [2, 4, 8–10].

Данный метод успешно опробован на участке Октябрьский, и в последующем тиражирован на участках Киенгский, Левобережный и Левобережный-2. По той причине, что месторождения Далдынского кимберлитового поля на своем "жизненном цикле" будут и дальше формировать дренажные воды, подлежащие закачке, а полезная емкость участков, использующих толщу ММП, является конечной, был выполнен прогноз возможности дальнейшего использования коллекторов толщи ММП, выделены и оценены наиболее перспективные площади. Для выделения подходящих зон необходимо проанализировать опыт эксплуатации существующих участков закачки, оценить поведение сформированного техногенного водоносного горизонта, выделить поисковые критерии структур, пригодных для закачки дренажных вод, определить их полезную емкость.

## Геологические условия Далдынского кимберлитового поля

В пределах Далдынского кимберлитового поля геологические условия в разрезе существенно различаются. Осадочный чехол сложен преимущественно карбонатными породами венда и кембрия, терригенно-карбонатные породы находятся в подчиненном положении, галогенные практически полностью отсутствуют (не более 0.1%). Общая мощность осадочной толщи поля изменяется от 2420 до 2478 м [14].

Вмещающие породы непосредственно в интервалах отработки +350/–1500 м коренных месторождений алмазов представлены породами маныкайской ($Є_1$ mn) в отм. –1400/–1500 м, эмяксинской ($Є_1$ em) в отм. –1200/–1400 м, кумахской ($Є_1$ k) в отм. –1070/–1200 м, удачнинской ($Є_{1-2}$ ud) в отм. –570/–1070 м, нерасчлененной известняково-доломитовой толщи ($Є_2$ id) в отм. –170/–570 м, мархинской ($Є_3$ mr) в отм. +230/–170 м и моркокинской ($Є_3$ 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 [12].

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 невыходящими на поверхность силлами и дайками долеритов, выполняющими региональные разломы [12].

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 СЗ на ЮВ (по азимуту 165°) протягивается Силигиро-Мархинский разлом, выделенный в кристаллическом фундаменте по результатам геофизических исследований. Разлом прослеживается в фундаменте и нижней части осадочного чехла по штокообразным интрузиям основного состава. Моноклиналь осадочных пород осложнена крупной Далдынской флексурой, протягивающейся с СЗ на ЮВ. Северо-восточное ее крыло приподнято, а юго-западное опущено; залегание пород на крыльях субгоризонтальное. Непосредственно трубка Удачная расположена в опущенном крыле Далдынской флексуры. Через территорию исследования протягивается крупный Октябрьский разлом, прослеживающийся через всю площадь по азимуту 300°–315°, в отметках нижнекембрийских отложений он представлен серией сближенных сбросов, суммарная амплитуда которых колеблется в пределах 50–150 м. Так же выделяются более мелкие региональные и кимберлитконтролирующие разломы.

## Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля

Гидрогеологические условия Далдынского кимберлитового поля определяются его принадлежностью к сочленению Оленекского и Верхневилюйского артезианских бассейнов [1, 6]. 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 выделяют следующие водоносные комплексы [11, 17]:

1. Первый от поверхности подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс (ВВК) является наименее водообильным комплексом в пределах изучаемой территории. От дневной поверхности он отделен толщей (150–250 м) ММП олдонинской, 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, 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$^2$/сут. Минерализация рассолов до 300 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании формирует притоки к карьеру рудника Удачный 10 м$^3$/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах карьерного поля существенно сдренирован, в момент вскрытия притоки достигали 1000 м$^3$/сут. Приток из верхнекембрийского комплекса в карьер трубки Зарница будет составлять не более 50 м$^3$/сут.

2. Второй от поверхности – среднекембрийский водоносный комплекс (СВК), состоящий из двух водоносных горизонтов СВГ-1 и СВГ-2. Абсолютная отметка кровли комплекса составляет –200/–240 м. Подошвой комплекса служит нижняя часть разреза удачнинской свиты, находящаяся на абсолютных отметках –1000/–1050 м. Общая мощность СВК достигает 600–650 м, эффективная мощность коллекторов составляет 200–250 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты нерасчлененной известняково-доломитовой толщи и удачнинской свиты.

СВГ-1 приурочен к карбонатным отложениям известняково-доломитовой толщи максимальной мощностью около 480 м. Граница между нижним горизонтом ВВК и первым водоносным горизонтом СВК проходит по подошве первой пачки мархинской свиты. Подошвой горизонта служат плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачнинской пачки нижнего и среднего кембрия.

СВГ-2 приурочен к удачнинской свите, представленной рифовыми кавернозно-трещиноватыми известняками и доломитами (мощностью до 450–500 м). Кровлей горизонта служат глинистые пачки карбонатных пород. Подошвой являются плотные, практически водоупорные эпифитоновые и органогенно-обломочные известняки удачнинской свиты.

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$^2$/сут. Минерализация рассолов до 400 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 14000 м$^3$/сут. В настоящее время водоносный комплекс в пределах шахтного поля существенно осушен только в интервале СВГ-1 (гор. –465 м), приуроченного известняково-доломитовой пачке, приток к подземным горным выработкам рудника составляет до 9000 м$^3$/сут. Прогнозный приток из СВГ в карьер трубки Зарница будет составлять не более 600 м$^3$/сут.

3. Третий от поверхности – нижнекембрийский водоносный комплекс (НВГ), приуроченный преимущественно к окремненным пористо-кавернозным доломитам кумахской свиты ($Є_1$ k) и водорослевым известнякам эмяксинской ($Є_1$ em) свиты. Кровлей водоносного горизонта являются органогенно-обломочные известняки удачнинской 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 НВГ достигает 300–350 м, эффективная мощность коллекторов 100–150 м. Водовмещающими породами являются трещиноватые и кавернозные известняки и доломиты кумахской и эмяксинской свит. Водоносный комплекс напорный. Напоры над кровлей в естественных условиях ~1000–1200 м. Коэффициент проводимости (Т) составляет от 15 до 100 (редко до 150–200) м$^2$/сут. Минерализация рассолов до 420 г/л. Водоносный комплекс при полном дренировании будет формировать притоки к подземным горным выработкам рудника Удачный (радиусом 1000 м) 40000 м$^3$/сут. В настоящее время водоносный комплекс не вскрыт. Планируемая дата вскрытия – конец 30-х годов XXI в.

Криогенное строение осадочных толщ и кимберлитов изучено в районе трубки Удачная при детальном описании керна скважин, пробуренных в долинах рек Далдын, Сытыкан и на водоразделах. В породах с ненарушенным залеганием до глубины 15–30 м выделяется наиболее льдонасыщенный горизонт. Породам свойственны трещинные и пластово-трещинные незакономерно-сетчатые полновыраженные криогенные текстуры. Объемная льдистость составляет 20–30%. На глубине свыше 25 м основной фон трещиноватости определяется наличием трещин напластования. Ледяные включения типичны для контактов пород различного литолого-петрографического состава, а именно глинистых и доломитизированных известняков, известняков и мергелей и т.п.

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 2.0 см. Мерзлые породы имеют трещинные, пластово-трещинные и пластово-трещинно-карстовые криогенные текстуры. Лед в

**Таблица 1.** Комплекс поисковых признаков (критериев) структур пригодных для закачки дренажных вод в ММП

| Поисковый признак | Характеристика признака (критерия) |
|---|---|
| Тектонический | Региональные тектонические нарушения и оперяющая трещиноватость |
| Структурный | Отрицательные, неравномерно опущенные структуры в мерзлой толще верхнекембрийских отложений |
| Геофизический | Отрицательные гравитационные аномалии; линейные аномалии электрического сопротивления; локальные магнитные аномалии трубочного и даечного типов |
| Газодинамические | Разнонаправленные движения воздуха в стволах скважин |
| Геоморфологический | Возвышенные площади и водораздельные участки с максимальной толщей мерзлых пород |
| Гидрогеологические | Повышенные фильтрационно-емкостные показатели подмерзлотного горизонта |
| Температурные | Существование аномальных температурных зон внутри мерзлого яруса криолитосферы |

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 визуально видны 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 150–260 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. В интервале глубин 30–180 м породы также отличаются значительной нарушенностью и льдистостью, значения которой составляют 10–35%. В интервале 180–200 м трещиноватость заметно уменьшается. Величина объемной 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, как правило, отмечается монолитная морозная толща, в которой включения льда не фиксируются. Подошва этого слоя соответствует кровле первого от поверхности водоносного комплекса.

По результатам решения обратной задачи, для ММП выделены зоны повышенной проницаемости вдоль ряда эксплуатационных скважин, а также в проницаемых зонах (зон разломов) в северном, северо-восточном и юго-западном направлениях, расчетные коэффициенты фильтрации составляют в пределах от 0.03 до 2.6 м/сут. Для периферийных зон коэффициенты фильтрации достигают до 0.01 м/сут. Для придолинных участков и оснований склонов значения коэффициентов фильтрации составляют 0.001 м/сут.

## МЕТОДИКА ВЫБОРА БЛАГОПРИЯТНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАКАЧКИ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ В ММП КРИОЛИТОЗОНЫ

Поиск и выбор участков, пригодных для закачки дренажных вод, обусловлены определенными затратами, непосредственно связанными со строительно-монтажными и эксплуатационными работами. При этом их объемы должны быть оптимальными. Поэтому разработке методов обнаружения перспективных подземных структур с использованием целенаправленного комплекса поисковых признаков придается особое значение.

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 криогеологической среды (табл. 1) [2–4, 7–10 и др.].

Выбору участков предшествуют комплекс изучения гидрогеологических условий и годы научно-методических исследований [5]. Гидрогеоло-

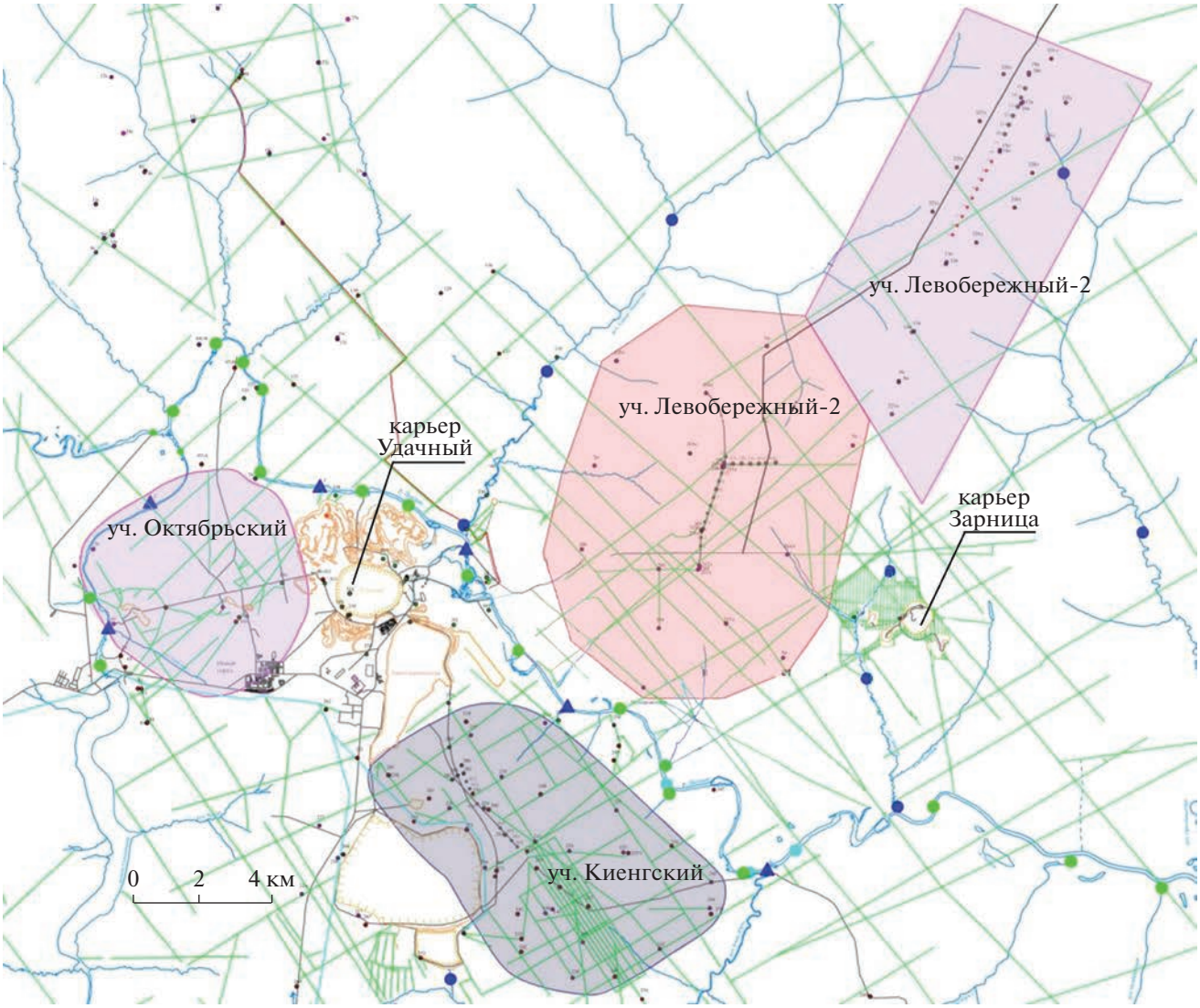


**Рис. 1.** Ситуационный план расположения существующих участков закачки в ММП Далдынского кимберлитового поля.

гические условия Далдынского кимберлитового поля, а именно наличие высокопроницаемых коллекторов, пригодных для обратной закачки на глубинах более 1200 м от дневной поверхности, предопределили на первоначальном этапе тип участков, используемых для возврата в недра дренажных рассолов. Исследования, проведенные коллективом ученых ИЗК СО РАН (под руководством С.В. Алексеева и Л.П. Алексеевой), с последующей адаптацией применительно к участкам Октябрьский и Киенгский (А.В. Дроздов, В.В. Лобанов, Н.А. Иост и др.) позволили обосновать первоначальное использование толщи многолетнемерзлых пород для закачки высоко минеральных вод.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экологическая надежность применяемого на участках способа закачки в ММП испытана уже в течение более чем 35-летнего периода промышленной эксплуатации на Удачнинском ГОКе [13]. Дренажные воды трубки Удачная в разные периоды отработки закачивались в участки Октябрьский (1985–2002 гг.), Киенгский (2003–2012 гг.), Левобережный (2012–2023 гг.) [4, 10]. В настоящее время эксплуатируется участок Левобережный-2 с оцененным объемом ~17 млн м$^3$ (рис. 1). Всего за весь период эксплуатации во внутримерзлотные коллекторы криолитозоны по состоянию на 01.01.2023 г. закачано порядка 45 млн м$^3$ дренажных рассолов.

В процессе использования данного метода утилизации рассолов производился эколого-геохимический мониторинг наземных экосистем. Рассмотрим природное состояние экосистем на примере Киенгского участка до начала (с 1993 по 2000 г.) а также в периоды эксплуатации за период с 2001 по 2013 г. и последующей “релаксации”

**Таблица 2.** Химический состав воды руч. Киенг-Юрях

| Показатель | ПДК, мг/л | Фоновые содержания | Содержание в руч. Киенг-Юрях |
|---|---|---|---|
| Катионы | | | |
| $Ca^{2+}$ | 180 | 55.34 | 51.67 |
| $Mg^{2+}$ | 40 | 25.96 | 42.36 |
| $Na^{+}$ | 200 | 6.26 | 5.64 |
| $K^{+}$ | 2 | 1.46 | 0.3 |
| Анионы | | | |
| $HCO_3^-$ | – | 238.9 | 91.4 |
| $SO_4^{2+}$ | 500 | 3.85 | 0.25 |
| $Cl^-$ | 350 | 7.8 | 3.03 |
| $NO_2^-$ | 3.3 | 0.058 | 0.04 |
| Микроэлементы | | | |
| Be | 0.2 | <0.2 | <0.2 |
| J | 1.0 | <0.42 | <0.42 |
| F | 1.5 | <0.19 | <0.19 |
| Zn | 1.0 | 0.012 | 0.012 |
| Mn | 0.1 | 0.03 | 0.011 |
| Sr | 7.0 | 0.216 | 0.073 |
| Li | 0.03 | 0.037 | 0.011 |
| Pb | 0.03 | <0.03 | 0.03 |
| Минерализация | 1000 | 434 | 357 |

с 2014 по 2020 г. Участок расположен в центральной части Далдынского горнопромышленного узла, охватывает территорию водораздела рек Сытыкан и Далдын в пределах правобережных притоков последнего от руч. Новый до устья руч. Киенг-Юрях.

Необходимо отметить, что уже по итогам первого этапа мониторинговых работ, проведенных в 1994 г., содержания химических элементов в воде руч. Киенг-Юрях отличались от фоновых значений (табл. 2).

В период интенсивной эксплуатации участка 2000–2013 гг. минерализация воды в руч. Киенг-Юрях от дамбы маневровой емкости хвостохранилища до впадения в р. Далдын составляла 182–460 мг/л. Диапазон разброса контролируемых показателей зависел от многих факторов (сезона, климатических изменений и т.п.). Общее состояние природных вод ручья, учитывая значения основных показателей относительно уровня ПДК, можно признать удовлетворительным. Следует отметить и отсутствие выраженных аномалий элементов-токсикантов (Sr, Li, Zn, Pb). Последующие наблюдения с 2014 по 2020 г. не выявили резких изменений состава вод. Выполненный геоэкологический мониторинг показал, что качество воды на участках р. Далдын достигает нормативных параметров по многим показателям (pH, главные ионы солевого состава: кальций, магний, натрий, калий, хлориды, сульфаты). Кислородный режим водотоков удовлетворительный. На территории Удачнинского ГОКа значительного влияния производственной деятельности на качество поверхностных водотоков не отмечено.

Закачка такого объема рассолов в толщи ММП привела к формированию межмерзлотных техногенных горизонтов, приуроченных к перечисленным участкам. Причем в результате растворения льдистой составляющей были сформированы вертикальные зоны массопереноса в нижезалегающий подмерзлотный ВВК, дренируемый в настоящее время карьерами трубок Удачная и Зарница. Ввиду невысоких фильтрационных параметров, возврат закачиваемых вод к карьерным полям 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 $м^3$/сут; а на участке Левобережный – 4570 $м^3$/сут, что

обеспечивает образование зоны техногенного питания для частично сдренированного ВВК.

Залегающий ниже СВК в настоящее время формирует 99% дренажных вод рудника Удачный. В пределах СВК формируется обширная депрессионная воронка, не компенсированная процессом закачки всего объема дренажных вод в зону коллекторов ММП или НВК [15].

Альтернативой методу закачки в ММП являются очистка и складирование дренажных рассолов в гидротехнические сооружения (ГТС) и закачка в подмерзлотные коллекторы. Преимуществами выбранного метода являются: экологическая безопасность, относительно неглубокие закачные скважины, составляющие 250–280 м; главным недостатком – ограниченность объемов таких участков.

Для оценки потенциальной емкости участков закачки целесообразно ориентироваться на установленный на начальном этапе закачки характер развития депрессионной воронки в плане и разрезе [16, 17]. Радиус распространения рассолов в толще мерзлых пород также можно определить, исходя из решения задачи о радиальной фильтрации в сухой грунт. Контроль площадного распространения выполняется геофизическими методами (электротомография и др.).

Дополнительным методом контроля выступает гидрогеологическое моделирование. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, причем слои могут быть горизонтальными или ограничиваться некоторой произвольной поверхностью, отражающей особенности строения водоносного горизонта. Полученная оценка потенциальной емкости участка закачки позволяет сделать вывод о возможности его экологически безопасной эксплуатации на период отработки месторождения.

Одним из способов увеличения емкости участков закачки является соляно-кислотная обработка, в результате которой происходит частичное растворение карбонатных пород и повышение их проницаемости. Однако существенно увеличить емкость этим методом не представляется возможным. Кроме того, частичное высвобождение емкости может происходить при формировании зон фильтрации в нижележащие подмерзлотные водоносные горизонты, что несет определенные экологические риски и требует дополнительного внимания при выполнении опытно-фильтрационных работ.

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 их вертикального проникновения через освобождающиеся ото льда трещины и ослабленные зоны в относительно водоупорных разделяющих слоях. Распространение рассолов в ММП связано с уменьшением их минерализации 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 образуются центры кристаллизации льда, рассолы начинают смерзаться, и их плановое перемещение постепенно затухает. За счет гравитационной дифференциации подаваемые в ММП рассолы начинают практически полностью уходить через относительные водоупоры в залегающие ниже проницаемые слои. 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 [2–4].

Минерализация рассолов трубки Удачная порядка 300–380 г/л, температура ММП на глубине 250–300 м составляет –4 – –2°С. Минерализация рассолов, при которой раствор будет находиться в жидком состоянии, должна быть больше 50 г/л. Таким образом, 1 м$^3$ рассола с минерализацией 300–380 г/л при температуре –3°С может растопить около 5 м$^3$ льда.

Ограничений в закачке по нижней границе принципиально не существует, граница определяется залеганием эффективных приемистых интервалов разреза. Перетоки из зоны ММП в интервал ВВК являются дополнительной и существенной гарантией экологической безопасности технологии закачки дренажных вод в зону ММП, так как существенно снижают темп заполнения емкости ММП, положительно влияя на динамику уровня в этом интервале закачки дренажных вод. По физико-химическим характеристикам подземные и дренажные воды и горные породы совместимы.

По экологическим показателям такие участки безопасны, так как ореол растекания дренажных вод в пласте сравнительно невелик, значительная

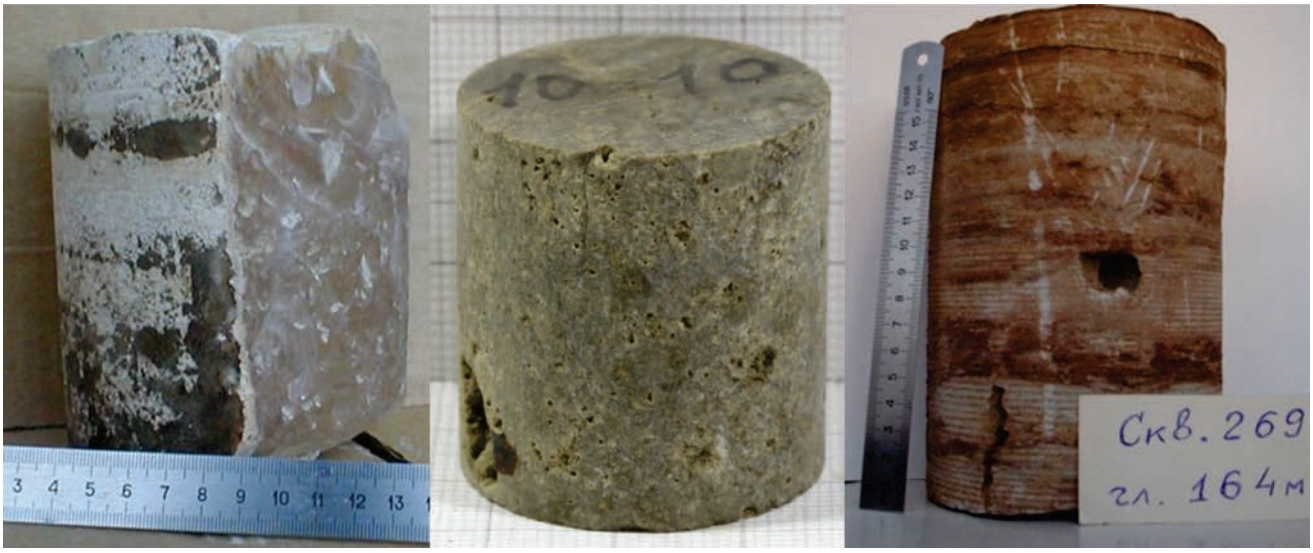


**Рис. 2.** Коллекторы криогенной толщи (доломиты $Є_3$ mr), формирующиеся в результате плавления жильных льдов.

величина подъема уровней характерна непосредственно только для зоны закачных скважин, а в рельефе не имеется значительно врезанных поверхностных водотоков и водоемов. Дополнительным положительным фактором выступает формирование упомянутых ранее зон перетока в нижележащий ВВК. Интервалы формирования коллекторов (рис. 2), как правило, приурочены к карбонатным разностям моркокинской ($Є_3$ mrk) и мархинской ($Є_3$ mr) свитам, т.е. располагаются на глубинах 150–280 м от дневной поверхности.

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 нетрещиноватых без льдистых пород ММП верхней части разреза служит региональным водоупором.

Первым участком, на котором был использован данный метод, стал ***участок Октябрьский***, эксплуатация которого производилась в период 1985–2002 гг. Всего с 1985 по 2002 г. на нем было закачано 10639.4 тыс. м$^3$ дренажных вод, из которых 733.9 тыс. м$^3$– во временный накопитель, 9905.5 тыс. м$^3$ – в скважины. При этом под закачку в разные годы использовалось 29 эксплуатационных скважин. Период эксплуатации одной скважины с среднем составляет 3–5 лет с объемом закачки 300 тыс. м$^3$. В результате закачки в толще ММП сформировалась техногенная зона, образованная закачиваемыми дренажными рассолами. Общая площадь участка закачки составляет ~45 км$^2$. В настоящее время полезная емкость участка исчерпана, закачные скважины ликвидированы, ведутся режимные наблюдения за сформированным в пределах участка техногенным горизонтом (криопэгом).

***Участок Киенгский*** расположен на водоразделе рек Сытыкан и Далдын, вблизи руч. Правый Киенг, в 8 км на ЮВ от трубки Удачная. Участок Киенгский включает 65 скважин: 8 закачных, 57 наблюдательных. Закачка дренажных вод на участке в толщу ММП осуществлялась в период 2001–2013 гг. Суммарный объем закачанных вод 12.9 млн м$^3$. С 2013 по 2021 г. закачка на участке не производилась. Результатом эксплуатации участка стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 3–5 раз), характеризующих массив ММП. Анализ полученных значений говорит о том, что в этом случае объект исследований правильнее рассматривать как техногенный водоносный горизонт, в котором уже сформирован упругий режим фильтрации, характерный для субнапорных водоносных горизонтов и комплексов. Наличие данных блоков легко объясняется не только литолого-фациальными особенностями пород, но и структурно-тектоническими факторами.

В геологическом строении мерзлого яруса в пределах участка Киенгский принимают участие карбонатные породы кембрия и ордовика, которые прорываются многочисленными секущими телами кимберлитовой ($D_3$–$C_1$) и трапповой ($P_2$–$T_1$) формаций (рис. 3). Интрузивные образования представлены кимберлитовыми трубками и жи-

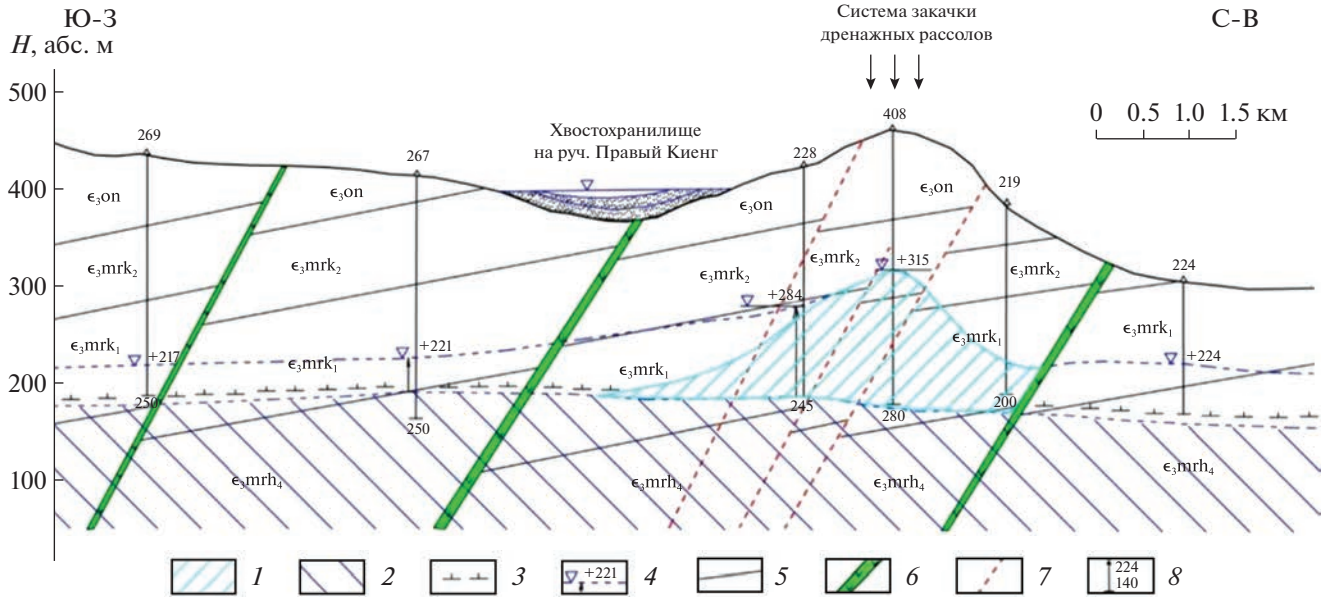


**Рис. 3.** Схематический криогидрогеологический разрез через Киенгский участок закачки. *1* – зона распространения техногенного водоносного горизонта в толще ММП; *2* – подмерзлотный водоносный горизонт; *3* – подошва ММП; *4* – пьезометрический уровень подмерзлотного горизонта, стрелка – напор, цифра – абсолютная отметка, м; *5* – стратиграфические границы свит; *6* – дайки долеритов; *7* – предполагаемые тектонические нарушения; *8* – гидрогеологическая скважина: вверху – ее номер, внизу – глубина, м.

лами, а базитовые – штокообразными интрузиями и дайками.

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 Вилюйско-Котуйской зоны, заполненной трапповыми интрузиями.

По данным геофизических исследований в пределах участка выделено несколько тектонически активных зон, которые нашли отражение в свойственных им системах разрывных нарушений яруса мерзлых 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%). Основная поглощающая толща на участке залегает в интервале глубин 214–273 м.

***Участок Левобережный*** расположен на левом берегу р. Далдын, вблизи ручья Улахан-Бысыттаах, в 10 км на СВ от трубки Удачная и включает 45 скважин: 18 закачных, 27 наблюдательных. В геолого-стратиграфическом разрезе участка принимают участие карбонатно-терригенные отложения мархинской, моркокинской и онхоюряхской 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 ($Є_3$ $mrh_4$), объединенной в геолого-геофизические пласты 24–25, нижней (пласты 22–23), верхней пачками (пласт 21) моркокинской свиты и нижней пачкой онхойюряхской свиты (пласт 20). Установлено, что:

– на участке Левобережный ММП, имеющие включения видимого льда, заполняющего поры, каверны, трещины, и слагающие верхний ярус криолитозоны, имеют мощность 260–300 м. Ниже располагается ярус охлажденных пород, содержащих рассолы с отрицательной температурой (криопэги);

– подземные воды верхнекембрийского водоносного комплекса вскрываются на глубинах от 260 до 299.5 м. Воды слабонапорные, напоры составляют от 12.9 до 29.8 м;

– по результатам опытных наливов поглощающие коллекторы располагаются в интервале 180.0–295.0 м.

Эксплуатация участка в опытно-промышленном режиме началась в 2013 г. Всего с 2013 по 2022 г. на участке Левобережный закачано ~21 млн м$^3$ дренажных вод, характеризующихся как хлоридно-

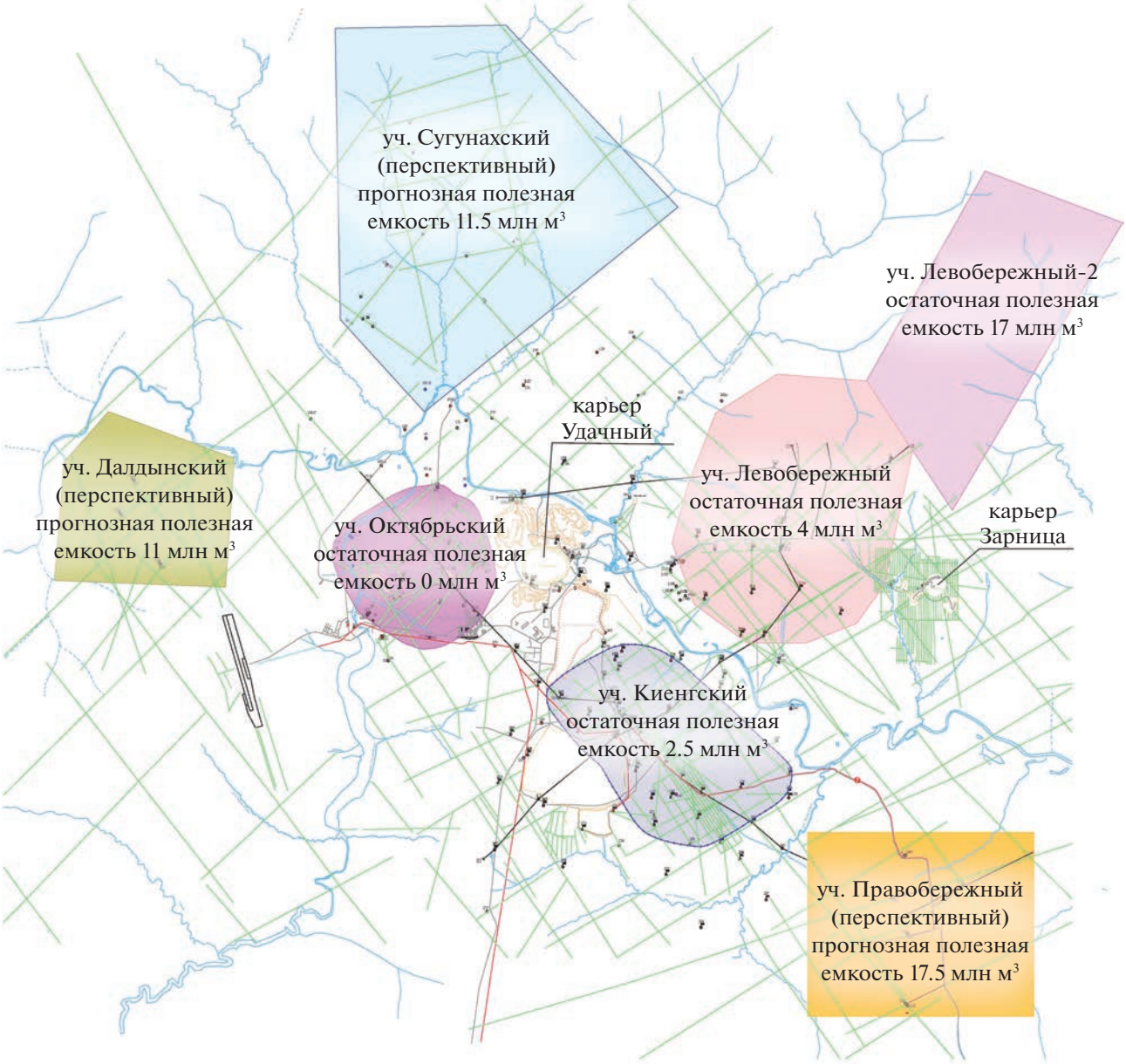


**Рис. 4.** Ситуационный план расположения существующих участков закачки и перспективных площадей Далдынского кимберлитового поля.

кальциевые рассолы с минерализацией от 250 до 350 г/л.

Результатом эксплуатации участка Левобережный стало существенное увеличение фильтрационных параметров (в 5 раз) массива ММП. Полученные результаты расчета коэффициентов водопроводимости и приемистости однозначно позволяют говорить о том, что максимальными параметрами характеризуется центральная и восточная части участка. Это делает обоснованным эксплуатацию участка с преобладающей закачкой дренажных вод в восточный ряд (№ 13з–18з) закачных скважин. Что обусловлено не только полученными расчетными параметрами, но и плановым расположением данных скважин (на максимальном удалении от существующих поверхностных водотоков).

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. В геолого-стратиграфическом разре-

зе изучаемой толщи ММП участка принимают участие нижнепалеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения кембрийской системы: онхойюряхской ($Є_3$ on), моркокинской ($Є_3$ mrk) и мархинской ($Є_3$ mr) свит. Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми и кавернозно-трещиноватыми карбонатными породами моркокинской ($Є_3$ mrk) и мархинской ($Є_3$ mr) свит. Наиболее проницаемые пласты-коллекторы, по результатам расходометрии, отмечены в интервалах глубин 157.0–190.0 м и 206.0–266.0 м. По причине незначительного объема закачанных вод ~100 тыс. м$^3$, формирования техногенного водоносного горизонта и зон вертикального массопереноса в ВВК в пределах участка не произошло.

На основе анализа имеющейся информации по криогидрогеологическому, литолого-фациальному и структурно-геологическому строению изучаемой территории и с учетом выделенных поисковых признаков была составлена прогнозная карта участков, перспективных для геологического изучения и дальнейшей опытной эксплуатации, с оценкой полезных объемов как существующих, так и предлагаемых участков (рис. 4).

На территории исследования выделены участки: ***Далдынский*** (прогнозная полезная емкость 11 млн м$^3$), ***Правобережный*** (прогнозная полезная емкость 17.5 млн м$^3$) и ***Сугунахский*** (прогнозная полезная емкость 11.5 млн м$^3$).

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. Его отличительная особенность – приуроченность в осевой части к Сугунахской кольцевой тектонической структуре сбросового типа, что предопределяет увеличение мощности многолетней мерзлоты до 500–600 м и, как следствие, полезной емкости участка.

## ВЫВОДЫ

Разработка алмазных месторождений Далдынского кимберлитового поля в условиях Крайнего Севера приводит к существенному преобразованию окружающей природной обстановки. Для безопасной утилизации дренажных рассолов, образующихся в процессе работы Удачнинского ГОКа, используется метод закачки в ММП. Выполненные исследования и последующие расчеты позволяют рассматривать коллекторы толщи ММП как целевой объект для дальнейшего расширения системы закачки дренажных вод рудника Удачный и карьера Зарница.

Наиболее перспективными являются участки Далдынский, Правобережный и Сугунахский. При прогнозируемых притоках дренажных вод ввод в эксплуатацию рассматриваемых участков позволит дополнительно закачать ~40 млн м$^3$, что обеспечит дальнейшую экологически безопасную отработку месторождений Далдынского кимберлитового поля, как минимум до середины 30-х годов XXI в.

В качестве основной рекомендации, предлагаемой к реализации, является проведение дальнейших исследований в рамках Далдынского кимберлитового поля для подтверждения перспективности участков закачки, определенных в данной работе. Выделенные критерии поисков новых участков будут учитываться при будущем строительстве в рамках расширения существующей системы закачки дренажных вод рудника Удачный, что необходимо для предотвращения негативного техногенного воздействия на геологическую и окружающую среды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агринский А.В.* Результаты изучения гидрогеологических условий при разведке одной из кимберлитовых трубок в Западной Якутии // Тр. ВСЕГИНГЕО. 1980. № 135. С. 48–57.
2. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П.* Итоги и перспективы захоронения дренажных вод кимберлитовой трубки Удачная в мерзлых породах // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003 С. 67–78.
3. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Гладков А.С., Трифонов Н.С. и др.* Рассолы глубоких горизонтов кимберлитовой трубки Удачная // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 4. С. 1235–1253. https://doi.org/10.5800/GT- 2018-9-4-0393
4. *Алексеев, С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Алексеева Л.П.* Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 2. С. 61–65.
5. *Гавич И.К.* Основы гидрогеологической стратификации и обработки информации. М.: МГРИ, 1982. 79 с.

6. Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
7. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / Под ред. В.А. Грабовникова. М.: Недра, 1993. 335 с.
8. *Дроздов А.В.* Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. 296 с.
9. *Дроздов А.В.* Оценка перспективности участка "Левобережный" для захоронения дренажных рассолов трубки "Удачной" // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. 2013. № 1 (42). С. 146–56.
10. *Дроздов А.В.* Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы (на примере Удачнинского ГОКа в Западной Якутии) // Геоэкология. 2005. № 3. С. 234–243.
11. *Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В.* Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
12. *Климовский И.В., Готовцев С.П.* Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
13. *Климовский И.В., Готовцев С.П., Шепелев В.В.* Гидрогеокриологические условия полигона подземного захоронения дренажных вод трубки "Удачная" // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 45–50.
14. *Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В.* Горногеологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
15. *Янников А.М.* Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля. Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2021. 240 с.
16. *Янников А.М., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С.* Динамика и прогноз изменения гидродинамического режима нижнекембрийского водоносного комплекса в пределах Далдынской флексуры // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 9. С. 60–73. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_60
17. *Янников А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанов А.Ю.* Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка "Ноябрьский" (рудник "Айхал") // Вестник Пермского университета. Геология. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299. https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284

# PROSPECTS FOR THE USE OF PERMAFROST AT THE DALDYNSKOE KIBERLITE FIELD FOR INJECTION OF DRAINAGE WATER FROM ZARNITSA AND UDACHNAYA DIAMOND PIPES

**A. M. Yannikov**[a,#]

[a] *Yakutniproalmaz Institute, ALROSA Joint-Stock Co., ul. Lenina, 39, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), 678174 Russia*

[#] *E-mail: yannikov90@mail.ru*

Environmentally friendly disposal of drainage water arising from the development of diamond tubes is currently becoming very acute for reducing technogenic load on the environment and for introducing new methods and technical solutions. Drainage water from the Daldynskoe kimberlite field were pumped into the Oktyabrsky (1985–2002), Kiengsky (2003–2012), and Levoberezhny (2012–2023) sites at different periods of the deposit development. Currently, Levoberezhny-2 site is being used, which has partially exhausted its useful capacity. As a result, the task was set to determine the possibilities for the further use of permafrost reservoirs in the study area, to identify and evaluate the most promising areas for future injection. The objects of study include the Upper Cambrian strata in the permafrost bottom, below the main erosion bases in the study area. A set of search features (criteria) of structures suitable for pumping drainage water into permafrost has been identified. These are tectonic, structural, geophysical, gas-dynamic, geomorphological, hydrogeological, temperature criteria. Taking into account the analysis of the available information on cryohydrogeological, lithofacial and structural-geological structure of the study area, a forecast map of areas that are promising for geological study and further trial operation was compiled, with an assessment of their useful volumes. The most promising areas are Daldynsky, Pravoberezhny and Sugunakhsky sites. The preliminary estimated useful volumes of these areas, in the case of the use of already developed technologies, are: Daldynsky ~11 million $m^3$; Pravoberezhny ~17.5 million $m^3$; and Sugunakhsky ~11.5 million $m^3$. In other words, with projected drainage water inflow, the considered areas will allow additional pumping of ~40 million $m^3$, which will ensure further environmentally safe mining of the Daldynskoe kimberlite field at least until the mid-2030s. The suggested method of pumping drainage water can be used in related industrial fields for mining not only kimberlite pipes, but also other solid minerals in the permafrost zone.

**Keywords:** *Daldynskoe kimberlite field*, *Zarnitsa pipe*, *Udachnaya pipe*, *natural brines*, *injection sites*

## REFERENCES


1. Agrinskii, A.V. *Rezul'taty izucheniya gidrogeologicheskikh uslovii pri razvedke odnoi iz kimberlitovykh trubok v Zapadnoi Yakutii* [Results of the study of hydrogeological conditions during the exploration of a kimberlite pipe in Western Yakutia]. Proc. VSEGINGEO, 1980, no. 135, pp. 48–57. (in Russian)
2. Alekseev, S.V., Alekseeva, L.P. *Itogi i perspektivy zakhoroneniya drenazhnykh vod kimberlitovoi trubki Udachnaya v merzlykh porodakh* [Results and prospects for the burial of drainage water of the Udachnaya kimberlite pipe in frozen rocks]. *Itogi geokriologicheskikh issledovanii v Yakutii v XX veke i perspektivy ikh dal'neishego razvitiya* [Results of the geocryological studies in Yakutia in the 20th century and the prospects for future development]. Yakutsk, IMZ SO RAN Publ., 2003, pp. 67–78. (in Russian)
3. Alekseev, S.V., Alekseeva, L.P., Gladkov, A.S., Trifonov, N.S., et al. *Rassoly glubokikh gorizontov kimberlitovoi trubki Udachnaya* [Brines in deep horizons of the Udachnaya kimberlite pipe]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1235–1253. (in Russian)
4. Alekseev, S.V., Drozdov, A.V., Drozdova, T.I., Alekseeva, L.P. *Pervyi opyt zakhoroneniya solenykh drenazhnykh vod kar'era trubki Udachnaya v mnogoletnemerzlye porody* [The first experience in burial of saline drainage water from the Udachnaya pipe quarry to the permafrost]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 2, pp. 61–65. (in Russian)
5. Gavich, I.K. *Osnovy gidrogeologicheskoi stratifikatsii i obrabotki informatsii* [Fundamentals of hydrogeological stratification and information processing]. Moscow, MGRI Publ., 1982, 79 p. (in Russian)
6. *Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR* [Hydrogeology of the USSR. Volume XX. Yakut ASSR]. Moscow, Nedra Publ., 1970, 384 p. (in Russian)
7. *Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya podzemnogo zakhoroneniya promyshlennykh stokov* [Hydrogeological studies to justify the underground disposal of industrial wastewater]. V.A. Grabovnikova, Ed., Moscow, Nedra Publ., 1993, 335 p. (in Russian)
8. Drozdov, A.V. *Zakhoronenie drenazhnykh rassolov v mnogoletnemerzlykh porodakh (na primere kriolitozony Sibirskoi platformy)* [Burial of drainage brines in permafrost (by the example of the permafrost zone in the Siberian Platform)]. Irkutsk, IGTU Publ., 2007, 296 p. (in Russian)
9. Drozdov, A.V. *Otsenka perspektivnosti uchastka "Levoberezhnyi" dlya zakhoroneniya drenazhnykh rassolov trubki "Udachnoi"* [Assessment of the prospects of Levoberezhny site for the disposal of drainage brines from the Udachnaya pipe]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle RAEN*, 2013, no. 1 (42), pp. 146–156. (in Russian)
10. Drozdov, A.V. *Podzemnoe zakhoronenie drenazhnykh rassolov v mnogoletnemerzlye porody (na primere Udachninskogo GOKa v Zapadnoi Yakutii)* [Underground burial of drainage brines in permafrost (by the example of the Udachninsky GOK in Western Yakutia)]. *Geoekologiya*, 2005, no. 3, pp. 234–243. (in Russian)
11. Drozdov, A.V., Iost, N.A., Lobanov, V.V. *Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdenii Zapadnoi Yakutii* [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU Publ., 2008, 507 p. (in Russian)
12. Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P. *Kriolitozona Yakutskoi almazonosnoi provintsii* [Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1994, 167 p. (in Russian)
13. Klimovskii, I.V., Gotovtsev, S.P., Shepelev, V.V. *Gidrogeokriologicheskie usloviya poligona podzemnogo zakhoroneniya drenazhnykh vod trubki "Udachnaya"* [Hydrogeocryological conditions at the disposal site for underground burial of drainage water from the "Udachnaya" pipe]. *Kriosfera Zemli*, 2002, vol. VI, no. 3, pp. 45–50. (in Russian)
14. Kolganov, V.F., Akishev, A.N., Drozdov, A.V. *Gornogeologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdenii almazov Yakutii* [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia]. Mirnyi, Mirninskaya tipografiya, 2013, 568 p. (in Russian)
15. Yannikov, A.M. *Gidrogeologiya Mirninskogo kimberlitovogo polya* [Hydrogeology of the Mirny kimberlite field]. Mirnyi, ZYaNTs/YaNA Publ., 2021, 240 p. (in Russian)
16. Yannikov, A.M., Zyryanov, I.V., Korepanov, A.Yu., Struchkova, A.S. *Dinamika i prognoz izmeneniya gidrodinamicheskogo rezhima nizhnekembriiskogo vodonosnogo kompleksa v predelakh Daldynskoi fleksury* [Dynamics and forecast of changes in the hydrodynamic regime of the Lower Cambrian aquifer within the Daldynskaya flexure]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2022, no. 9, pp. 60–73. (in Russian)
17. Yannikov, A.M., Yannikova, S.A., Ovchinnikova, M.Yu., Korepanov, A.Yu. *Ispol'zovanie mnogoletnemerzlykh porod dlya zakachki drenazhnykh vod korennykh mestorozhdenii almazov na primere uchastka "Noyabr'skii" (rudnik "Aikhal")* [The use of permafrost rocks for injection of drainage water of primary diamond deposits by the example of Noyabrsky site (Aikhal mine)]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2021, vol. 20, no. 3. pp. 284–299. https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284. (in Russian)