

ГИДРОГЕОЛОГИЯ

УДК 556.334

Перспективы использования силурийских карбонатных толщ Алакит-Мархинского кимберлитового поля для закачки дренажных вод**А.М. Янников^а, А.С. Стручкова^а, М.Ю. Овчинникова^{а, б}**^а Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА ПАО

678174, Республика Саха (Якутия), Мирный, ул. Ленина, 39. E-mail: yannikov90@mail.ru

^б Воронежский государственный университет

394018, Воронеж, Университетская пл., 1.

(Статья поступила в редакцию 23 января 2023 г.)

Отработка уникального месторождения алмазов трубка Юбилейная сопровождается формированием высокоминерализованных дренажных вод, представленных практически неизменёнными природными рассолами нижнеордовикского и верхнекембрийского водоносного комплексов. В настоящее время их утилизируют путем закачки в недра, а в качестве основной рассолопоглощающей структуры используются внутримерзлотные коллекторы. Литолого-фациальные условия Алакит-Мархинского кимберлитового поля определяются наличием наиболее представительных в пределах Западной Якутии разрезов силура, перекрытых пачками каменноугольных и пермских терригенных отложений, а также достаточно мощных эффузивных полей (50–150 м) траппового магматизма. Изучение криогидрогеологических условий в отметках залегания карбонатных и терригенно-карбонатных пород силура производилось в период 2014–2022 гг. по стандартным методикам, позволяющим оценить их потенциал для формирования внутримерзлотных коллекторов. В результате проведенных исследований описаны основные литологические типы пород силура, способные в результате техногенного воздействия, а именно закачки дренажных вод, сформировать внутримерзлотный техногенный водоносный горизонт и обеспечить безопасную отработку месторождения на всю проектную глубину.

Ключевые слова: *трубка Юбилейная, байтахская свита, башенная свита, машковская свита, карбонатные породы, природные рассолы, техногенный водоносный горизонт, внутримерзлотные коллекторы.*

DOI: 10.17072/psu.geol.21.2.107

Введение

Отработка крупнейшей в Западной Якутии кимберлитовой трубки Юбилейная в настоящее время осуществляется открытым способом. Текущим проектом предусмотрена отработка месторождения до глубины 720 м (абс. отм. -100 м) при полном вскрытии в абс. отм. +155/+70 м нижнеордовикского водоносного комплекса и частичном вскрытии в абс. отм. -20/-100 м верхнекембрийского водоносного комплекса. Размеры карьера: по поверхности 2000x1260 м; по дну (проектные) 515x250 м. Приток природных рассолов в настоящее время незначителен и не превышает 10–15 м³/сут, однако после

вскрытия коллекторов верхнекембрийского водоносного комплекса, которое произойдет в 2027–2028 гг., он превысит 300 м³/сут. Это потребовало проведения комплекса специализированных исследований, направленных на поиск структур, пригодных для закачки формирующихся дренажных вод.

Учитывая отсутствие высокопроницаемых коллекторов в интервалах подмерзлотных водоносных горизонтов, наиболее перспективной выглядела технология создания техногенных водоносных горизонтов в толще многолетнемерзлых пород (ММП), соответствующих зонам активного водообмена на предыдущих этапах геологического развития территории, до этапа четвертичных оледене-

ний. Наличие перекрывающих трапповых пород, а также отметки наиболее врезанных региональных водотоков предопределили в качестве объекта исследования карбонатные и терригенно-карбонатные породы силура.

В результате проведенного комплекса исследований была опознана территория в радиусе 20 км от трубки Юбилейная и выделена перспективная площадь для дальнейшего промышленного освоения и строительства участка закачки, который из-за своего расположения относительно карьера и основного регионального водотока – реки Марха – был назван «Заречный» (участок № 2).

Целью представленной статьи является криогидрогеологическая характеристика пород силура в пределах участка Заречный, а также прогноз динамики развития техногенного водоносного горизонта, который сформируется в результате закачки дренажных вод карьера Юбилейный. Достижение поставленной цели осуществлялось при помощи полевого изучения кернового материала, лабораторных определений коллекторских свойств пород, а также проведения комплекса опытно-фильтрационных работ, направленных на освоение перспективного участка.

Характеристика объекта исследований

Геологические условия изучаемой площади, а именно наличие двух этажей строения (кристаллического фундамента и осадочного чехла), определяются её нахождением в пределах древнего кратона – Сибирской платформы – 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 пермотриаса, 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

(Гидрогеология СССР, 1970) (рис. 1).

Участок Заречный находится в бассейне р. Марха в пределах Алакит-Мархинского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алакитского алмазоносного района. В геоморфологическом отношении район участка Заречный представляет собой водораздельную часть структурно-денудационного плато рек Марха и Кылах.

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, 18з и 20з (рис. 2).

В геолого-стратиграфическом разрезе толщи принимают участие палеозойские осадочные образования (Дубиков, 2002): 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 толщей базальтов мощностью от 14–21 до 130 м позднего палеозоя – раннего мезозоя, слагающей крупные пластовые тела и дайки. Скважинами вскрыто трапповое тело мощностью около 2 м на глубинах 103,0–115,5 м.

Согласно Техническому проекту промышленной эксплуатации узла закачки дренажных вод карьера Юбилейный, на участке Заречный по состоянию на 2026 г. будет присутствовать 21 скважина, в том числе: 8 закачных – № 2з, 3з, 4з, 5з, 6з, 7з и 8з, глубиной по 200 м.; 1 – № 10з, глубиной 230 м.; 3 – № 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 – № 9н, оборудованной для режима нижнеордовикского водоносного комплекса (НоВК), глубиной 400 м (рис. 2).

Материалы и методы

Комплекс криогидрогеологических исследований предусматривает буровые работы с применением следующих геофизических методов: гамма-каротаж (ГК), каротаж

магнитной восприимчивости (КМВ), кавернометрия (ДС), инклинометрия, термометрия, расходомерия (в естественном режиме

и при наливах); опытно-фильтрационные кустовые и одиночные наливы.



Рис. 1. Геологическая карта изучаемого участка (составлена по материалам Ботубинской и Мирнинской ГРЭ) (Янников, 2022)

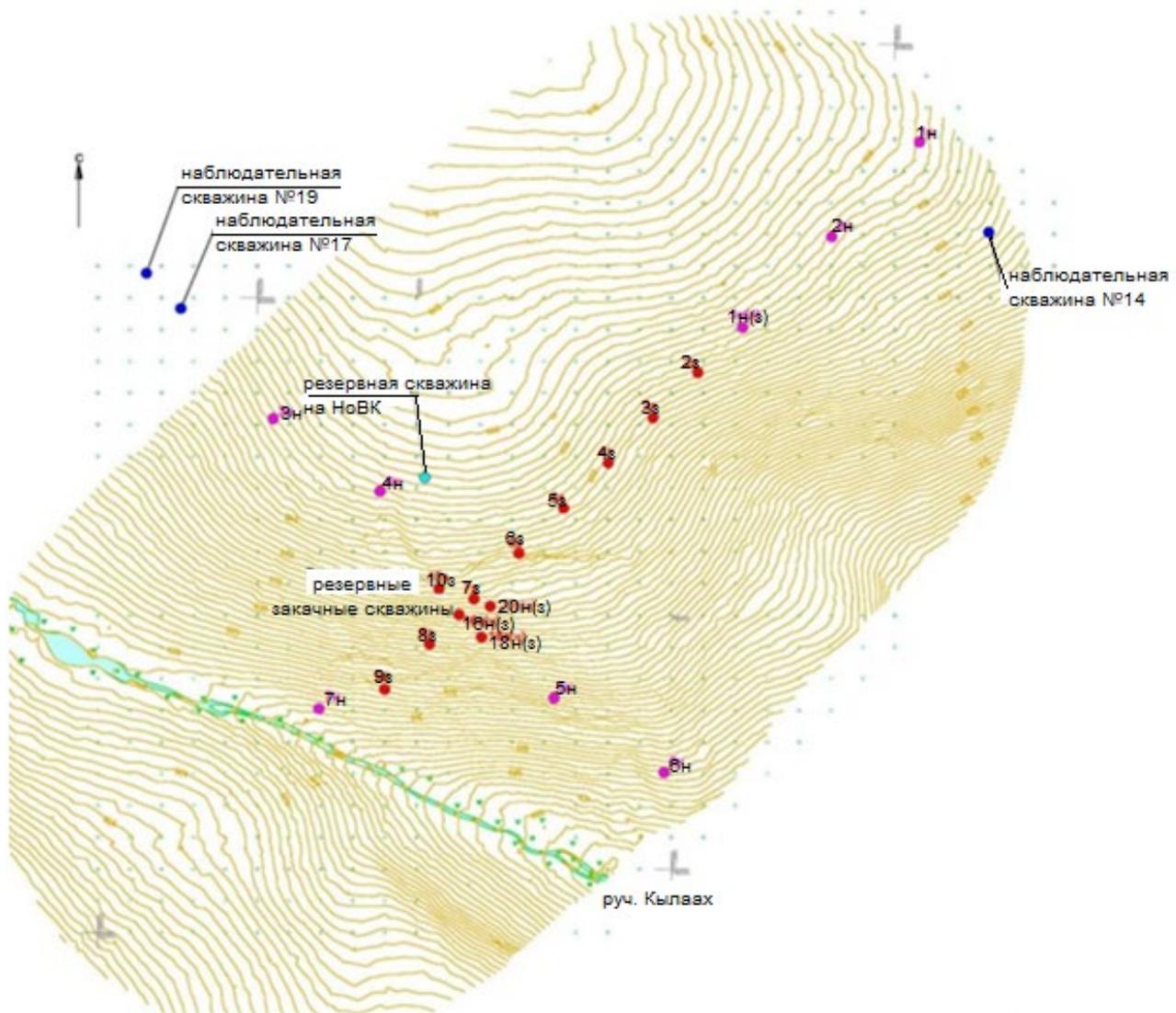


Рис. 2. Схема расположения скважин на участке Заречный

Изучение кернового материала выполнялось в полевых и лабораторных условиях по стандартным и утверждённым методикам. В полевых условиях велось литологическое и инженерно-геологическое описание керновых проб с последующим поинтервальным отбором представительных образцов. Отбиралось по 1 образцу длиной до 0,5 м с интервала в 10 м. В случае, если интервал был сложен несколькими литологическими разностями пород, количество проб соразмерно увеличивалось (Климентов, Кононов, 1978). В последующем минералогический состав части отобранных проб изучался в прозрачно-полированных шлифах на оптическом микроскопе. Всего по скважинам № 16з (н), 18з (н) и 20з (н) отобрано 45 проб.

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики

изменения гидродинамического режима в пределах участка Заречный были осуществлены методами моделирования в ПО Feflow. Всего исследования проводились на пяти участках:

Участок № 1 находился юго-западнее трубки Одинцова в пределах осевой части Центральной кимберлитовмещающей зоны, в которой фиксируются интервалы повышенной трещиноватости, дробления и закарстованности пород. Проектная глубина скважин – 250 м.

Участок № 2 находился в районе тр. Амакинской в пределах осевой части Центральной кимберлитовмещающей зоны Северо-Восточного разлома. По результатам радиоволнового просвечивания (РВП) были выделены имеющиеся на поисковом участке поглощающие радиоволны объекты: карсто-

вые образования, зоны тектонических нарушений, зоны измененных осадочных пород. Проектная глубина скважин – 250 м.

Участок № 3 находился в районе трубки Устинова в пределах осевой части Центральной зоны Северо-Восточного разлома. По результатам поискового бурения в разрезе отмечаются карстовые образования, зоны дробления, интенсивной трещиноватости и повышенной кавернозности пород карбонатного цоколя. Проектная глубина скважин – 250 м.

Участок № 4 был выделен сотрудниками ЯНИГП на основе анализа материалов геолого-геофизических работ. Юго-восточнее трубки Юбилейная выделяется субвертикальная тектонизированная зона динамического развития регионального разлома в нижнепалеозойских карбонатных породах, которые отличаются повышенной трещиноватостью и, возможно, также характеризуются относительно высокими фильтрационно-ёмкостными параметрами. Этот же участок рекомендуется сотрудниками НППФ «Карбон». Скважины следует задавать в висячих боках северного крыла разлома с наклоном в юго-западном направлении (навстречу падению структур). Глубина скважин определяется глубиной залегания кровли напорных соленых вод. В пределах участка она ожидается на глубинах 240–255 м. Рекомендуемая глубина скважин – до 250 м.

На участке № 5 предшествующими работами (Дроздов и др., 2008) производилось изучение характера проявления рудовмещающего разлома от жилы Межозерная к северо-востоку до границы участка Фабричный. Практически во всех скважинах по геолого-геофизическим данным фиксировались признаки рудовмещающей зоны: наличие карстовых полостей, маломощные инъекции кимберлитов, зоны дробления, зеркала скольжения, повышенная трещиноватость с наложенным ожелезнением, нарушение корреляции геофизических пластов во вмещающих карбонатных породах. Проектная глубина скважин – 250 м.

Результаты исследований и их обсуждение

Литолого-фациальные особенности толщи многолетнемерзлых пород в пределах участка Заречный

Кылахская свита (O_{2-3kl})

Вскрытая мощность отложений свиты на участке – 28,0–33,8 м. Представлена переослаиванием мергелей красновато-бурого цвета и доломитов зеленовато-серого цвета. Структура пород скрытозернистая. Текстура неравномерно слоистая. В разрезе преобладают мергели красновато-бурого цвета, слаботрещиноватые, 3–4 трещины на 1 пог. м керна, мелкие 0,5–1 мм, расположенные под углом 45–40° к оси керна, реже – под углом 5–15°. Трещины заполнены льдом. Кусковатость 7–8 кусков на 1 пог. м. Зоны дробления в интервалах: 214,3–215,5; 217,5–218,6; 219,7–220,6; 222,9–224,4; 228,8–229,0; 229,9–230,1; 231,6–231,8; 246,8–246,9 м – керн в виде обломков размером 5–80 мм. Подземные воды не вскрыты.

По результатам лабораторных исследований образцов, отобранных из скважин участка Заречный, коэффициент открытой пористости ($K_{откр}^I$) отложений варьирует в пределах 14,42–20,26%, средняя величина – 18,43%. Коэффициент эффективной пористости ($K_{эф}^I$) варьирует в пределах 1,34–1,42%, средняя величина – 1,38%.

Коэффициент остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$) изменяется от 92,30 до 93,40% при средней величине 92,85%. Коэффициент пористости ($K_{пл}^I$), определённый для пластовых условий, изменяется от 18,46 до 20,21%, средняя величина – 19,33%. Величина влажности пород, определённая в лабораторных условиях, варьирует в пределах 2,80–8,60%, средняя величина – 5,40%.

Практически по всему вскрытому разрезу свиты зафиксированы зоны дробления, средняя мощность зон дробления – 2,6 м. Кавернозности и повышенной трещиноватости пород не отмечено.

Байтахская свита (S_{1bt})

Мощность отложений свиты на участке – 21,3–21,8 м. Известняки глинистые серые с оттенком от зеленого до голубого. Структура скрытозернистая, текстура массивная, трещиноватость – 2–3, редко – до 6–10 трещин на пог. м, ориентированы под углом 5–10° и 45–50° к оси керна. Часть трещин заполнена льдом, трещины открытого типа – 0,5–1 мм. Интервалы зон дробления: 199,1–200,7; 202,9–203,1; 204,0–204,3; 205,0–206,2; 207,2–

208,0; 208,7–209,3; 210,0–210,8; 211,1–211,3; 211,8–212,0; 212,4–213,1 м – керн раздроблен в виде обломков размером 0,5–7 см. Подземные воды не вскрыты.

По результатам лабораторных исследований образцов, коэффициент открытой пористости ($K_{откр}^П$) отложений варьирует в пределах 11,87–19,50%, средняя величина – 17,16%.

Коэффициент пористости ($K_{пл}^П$), определённый для пластовых условий – 19,32%. Величина влажности пород, определённая в лабораторных условиях, варьирует в пределах 5,90–9,60%, средняя величина – 7,80%. Кавернозности и повышенной трещиноватости пород не отмечено.

Башенная свита $S_{1b\check{s}}$

Мощность отложений башенной свиты – 54,6–56,0 м. Отложения представлены ритмичным чередованием доломитов рыжего цвета с известняками светло-серого цвета. Структура мелко-скрытозернистая, текстура слоистая. Слоистость волнистая, выдержанная, мелкая, по интервалу равномерно распределена. Порода среднетрещиноватая – от 3 до 5 трещин на 1 пог. м керна, трещины заложены в субвертикальном направлении, залечены льдом, мощность льда достигает от нескольких мм до 1 см. Подземные воды не вскрыты. В интервале глубин 112–114 м отмечена кавернозность пород. Зон дробления и повышенной трещиноватости не отмечено.

По результатам лабораторных исследований, коэффициент открытой пористости ($K_{откр}^П$) отложений варьирует в пределах 4,26–6,94%, средняя величина – 5,75%. Коэффициент эффективной пористости ($K_{эф}^П$) варьирует в пределах 0,43–1,71%, средняя величина – 1,07%.

Коэффициент остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$) изменяется от 66,40 до 93,40% при средней величине – 80,16%. Коэффициент пористости ($K_{пл}^П$), определённый для пластовых условий, изменяется от 4,24 до 6,54%, средняя величина – 5,63%. Величина влажности пород, определённая в лабораторных условиях, варьирует в пределах 1,10–2,10%, средняя величина – 1,63%.

По результатам проведённых исследований, породы башенной свиты ($S_{1b\check{s}}$) обладают коллекторскими свойствами.

Машковская свита $S_{1m\check{s}}$

Мощность отложений свиты – 43,4–45,3 м. Свита представлена чередованием серых известняков с доломитами светло-серого цвета. Структура мелко-скрытозернистая, текстура слоистая. Слоистость слабоволнистая, нечеткая. Породы среднетрещиноватые – от 5 до 7 трещин на 1 пог. м керна, трещины открытого типа ориентированы под углом 60–75° к оси керна. Стенки трещин волнистые, наблюдается ожелезнение. Отмечаются прожилки льда по трещинам, мощностью до 2 см. Подземные воды не вскрыты. Зон дробления, повышенной трещиноватости и кавернозности не отмечено.

По результатам лабораторных исследований, коэффициент открытой пористости ($K_{откр}^П$) отложений варьирует в пределах 7,37–8,60%, средняя величина – 8,0%. Коэффициент эффективной пористости ($K_{эф}^П$) варьирует в пределах 0,70–1,32%, средняя величина – 1,0%.

Коэффициент остаточной водонасыщенности ($K_{ов}$) изменяется от 82,20 до 91,90% при средней величине – 87,05%. Коэффициент пористости ($K_{пл}^П$), определённый для пластовых условий, изменяется от 7,36 до 8,57%, средняя величина – 8,0%. Величина влажности пород, определённая в лабораторных условиях, варьирует в пределах 1,50–2,70%, средняя величина – 2,07%.

Породы машковской свиты ($S_{1m\check{s}}$) также должны рассматриваться как перспективные коллекторы в толще ММП.

Айхальская свита S_{2ah}

Айхальская свита залегает выше интервала, изученного при опытно-фильтрационных работах (интервал – 120–250 м), от которого она, как и кровельная часть машковской свиты, ограничена в разрезе долеритовой интрузией, залегающей на глубинах от 103,0 до 115,5 м и являющейся водупором (мощность слоя долеритов – 1,5–2,2 м). Мощность отложений айхальской свиты – 56,6–94,6 м. Свита представлена переслаиванием крупно- и среднезернистых песчаников с небольшими прослоями мергелей. Песчаники светло-серые с жёлтым оттенком. В интервале 34,8–37,2 м керн поднят в виде кусков (обломков) 5–15 см и небольших столбиков керна до

20 см. На глубине 41,7 м наблюдается включение угля. В целом интервал слабо трещиноватый – 1–2 трещины на 1 пог. м. Аргиллиты слоистые, серого цвета с бурым оттенком из-за ожелезнения. Трещиноватость – до 2 трещин на 1 пог. м керна. Трещины ярко выраженного бурого цвета (признак ожелезнения). Зона дробления – в интервале 68,5–68,7 м, обломки керна размером до 50 мм. Породы мёрзлые, но включений льда не наблюдается. Подземные воды не вскрыты. Зон повышенной трещиноватости и кавернозности не отмечено.

Ахтарандинская свита P₁ah_t

Отложения ахтарандинской свиты встречаются спорадически. Мощность свиты по скважине – 21,8 м. Песчаники серые с зеленоватым оттенком, среднезернистые, массивные. В интервале 20,5–22,0 м трещины субвертикальные, в количестве 3–4 штук на 1 пог. м керна. В интервале 22,0–27,0 м трещиноватость субгоризонтальная – 3–4 штуки на 1 пог. м. КERN в виде столбиков длиной 25–40 см при количестве 2–3 штук на 1 пог. м. Зоны дробления керна до обломков размером 3–4 см в интервалах: 30,0–31,0; 36,0–37,2 м. КERN в виде столбиков размером

20–35 см в количестве 2–3 штук на 1 пог. м керна. Породы мёрзлые, но льдистости не наблюдается.

Осадочные породы перекрыты породами трапповой формации мощностью от 14 до 21 м, которые являются естественным водопором, ограничивающим вертикальное (вверх) распространение закачиваемых рассолов в толще ММП (Алексеев, 2000). Стратиграфическая разбивка участка по опорным скважинам приведена в табл. 1.

На рис. 3 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 (S₁mš) и башенной свит (S₁bš) силурийской системы. Наиболее проницаемые коллекторы, по результатам расходомерии, отмечены в интервале глубин 143–168 м.

Таблица 1. Стратиграфическая разбивка участка Заречный

Свита	Скв. 16з(н) (абс. отм. +635,1 м)			Скв. 18з(н) (абс. отм. +630,0 м)			Скв. 20з(н) (абс. отм. +633,0 м)		
	Глубина подошвы слоя, м	Глубина в абс. отм., м	Мощность слоя, м	Глубина подошвы слоя, м	Глубина в абс. отм., м	Мощность слоя, м	Глубина подошвы слоя, м	Глубина в абс. отм., м	Мощность слоя, м
Алакитская βP ₂ -T ₁	20,0	615,1	14,2	20,6	609,4	21,1	14,0	619,0	13,0
Ахтарандинская P ₁ ah _t	41,8	593,3	21,8						
Айхальская C ₂ ah	98,4	536,7	56,6	94,6	535,4	72,9	98,0	535,0	84,0
Алакитская βP ₂ -T ₁	103,0	532,1	1,5	110,2	519,8	2,2	115,5	517,5	2,1
Машковская S ₁ mš	144,0	491,1	43,6	140,2	489,8	43,4	145,4	487,6	45,3
Башенная S ₁ bš	200,0	435,1	56,0	194,8	435,2	54,6	200,2	432,8	54,8
Байтахская S ₁ bt	221,0	414,1	21,3	216,0	414,0	21,4	222,0	411,0	21,8
Кылахская O ₂₋₃ kl	250,0	385,1	28,7	250,0	380,0	33,8	250,0	383,0	28,0

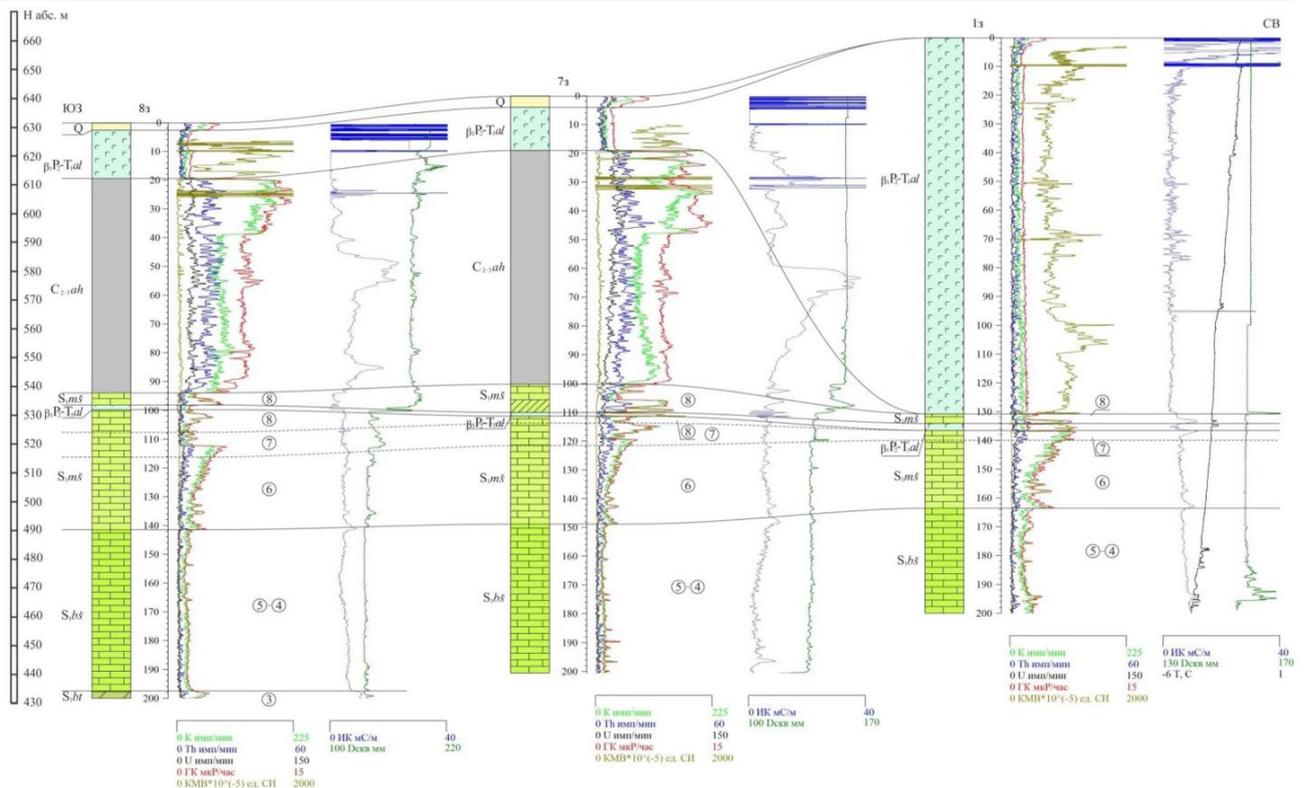


Рис. 3. Корреляционная схема по скважинам № 1н(з), 7з и 8з участка Заречный (составлена по материалам Мирнинской ГРЭ и Айхальского ГОКа)

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.

Формирование техногенного водоносного горизонта связано с опытно-фильтрационными работами (Колганов и др., 2015). По состоянию на январь 2021 г., в толщу ММП участка Заречный закачено ≈ 5 тыс. м³ минерализованных дренажных вод рудника Айхал. В настоящее время сформированы разрозненные линзы рассолов, они приурочены только к пристволовым зонам (из-за небольшого объёма закаченных вод) и характеризуются крайне неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло- и массопереноса при использовании толщи ММП для закачки дренажных вод (Алексеев и др., 2002; Дроздов, 2005). Для предварительной оценки приёмности коллекторов толщи ММП, а также

для определения интервалов поглощения в породах вскрываемого разреза проведены пробные наливки рассолов во все пробуренные скважины. Для выполнения наливов использовались дренажные рассолы трубки Удачная. Максимальная приёмность на стадии поисков получена в скважине 16з и составила 5 м³/ч. При повторном наливке в 2019 г. приёмность составила до 43,2 м³/ч. В эксплуатационных скважинах экспресс-наливки показали приёмность в 2,5 м³/ч. в скважинах, расположенных в южной части и 0,02 м³/ч в северной (1н). По результатам расходомерии были выделены интервалы возможных коллекторов, которые представлены в табл. 2. Для оценки фильтрационных характеристик пород в 2013 г. и 2019 г. были проведены кустовые наливки. Для этого использовались дренажные рассолы трубок Айхал и Удачная. Максимальная приёмность – 43,2 м³/ч – определялась в скважине 16з в 2019 г. по закачке 40 м³ рассола при среднем дебите закачки – 10 м³/ч. По скважинам 7з и 8з получены значения приёмности – 20,9 и 29,4 м³/ч, при этом средний расход закачки за все время с учетом времени остановок составил 5 м³/ч.

Таблица 2. Выделенные интервалы коллекторов по ГИС и расходомерии

№ 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 уровня в наблюдательной скважине 1бз составило только 0,4 м, что говорит о распространении рассолов в прискважинном пространстве (Янников, 2022). Анализируя полученные данные по выполненным 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 среднетрещиноватые – до 5–7 трещин на 1 п.м. Трещины открытого типа, частично залечены льдом;

- расчётная водопроницаемость – от 1,9 до 27,6 м²/сут;

- приемистость закачных скважин – до 20 м³/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 (Оловин, 1993; Великин и др., 2005). Всего на участке Заречный закачено ≈ 5 тыс. м³ рассолов, почти половина – в скважину 1бз. Опробований образованного техногенного талика на настоящий момент ввиду малого объема закачки не было проведено.

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.

В результате проведенных исследований 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 табл. 3 приведены результаты расчётов прогнозных притоков.

Полученные прогнозные значения притоков природных рассолов (15–340 м³/сут) характеризуются как низкие. При продолжении отработки месторождения подземным способом, приток будет увеличиваться, что, прежде всего, связано со степенью вскрытия верхнекембрийского водоносного комплекса. При отработке 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 3. Притоки подземных вод к месторождению трубки Юбилейная

Годы	Отметки, м абс.	Притоки подземных вод			Суммарный водоприток	
		НОВК	ВВК	СВК	м ³ /сут	тыс. м ³ в год
		м ³ /сут	м ³ /сут	м ³ /сут		
Открытая добыча						
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

Исходя из прогнозных притоков, для прогнозирования динамики изменения криогидрогеологических условий участка Заречный, была построена цифровая модель.

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.

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 (Дроздов, 2006; Янников, 2022а, 2022б):

1. Природных (геоморфологических условий, геологического строения, структурно-тектонических условий, гидрогеокриологических 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 водопритоков показал, что закачка дренажных вод рекомендуется только после вскрытия подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса. При этом прогнозная потребность составит 340 м³/сут в зимнее время и 700 м³/сут в летнее время. К закачке рекомендуются дренажные рассолы с минерализацией выше 55–60 г/л, что определяется целевой тощей используемых коллекторов.

Согласно геолого-гидрогеологическому разрезу, в толще многолетнемерзлых пород можно выделить 3 слоя:

1 слой: от земной поверхности до отметки +530 м абс., характеризующий отложения каменноугольного возраста и покровные трапповые долериты, являющиеся водоупорными отложениями;

2 слой: от +530 до +532 м абс. характеризует трапповые интрузии, внедрившиеся в толщу осадочных пород в пределах участка

закачки, являющиеся 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) км², включая 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 уровнем режимом с 2018 г. по 2021 г. 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 (Гунин, 2006). Принципы калибровки были описаны ранее.

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 (Гунин, 2006). Принципы калибровки были описаны ранее.

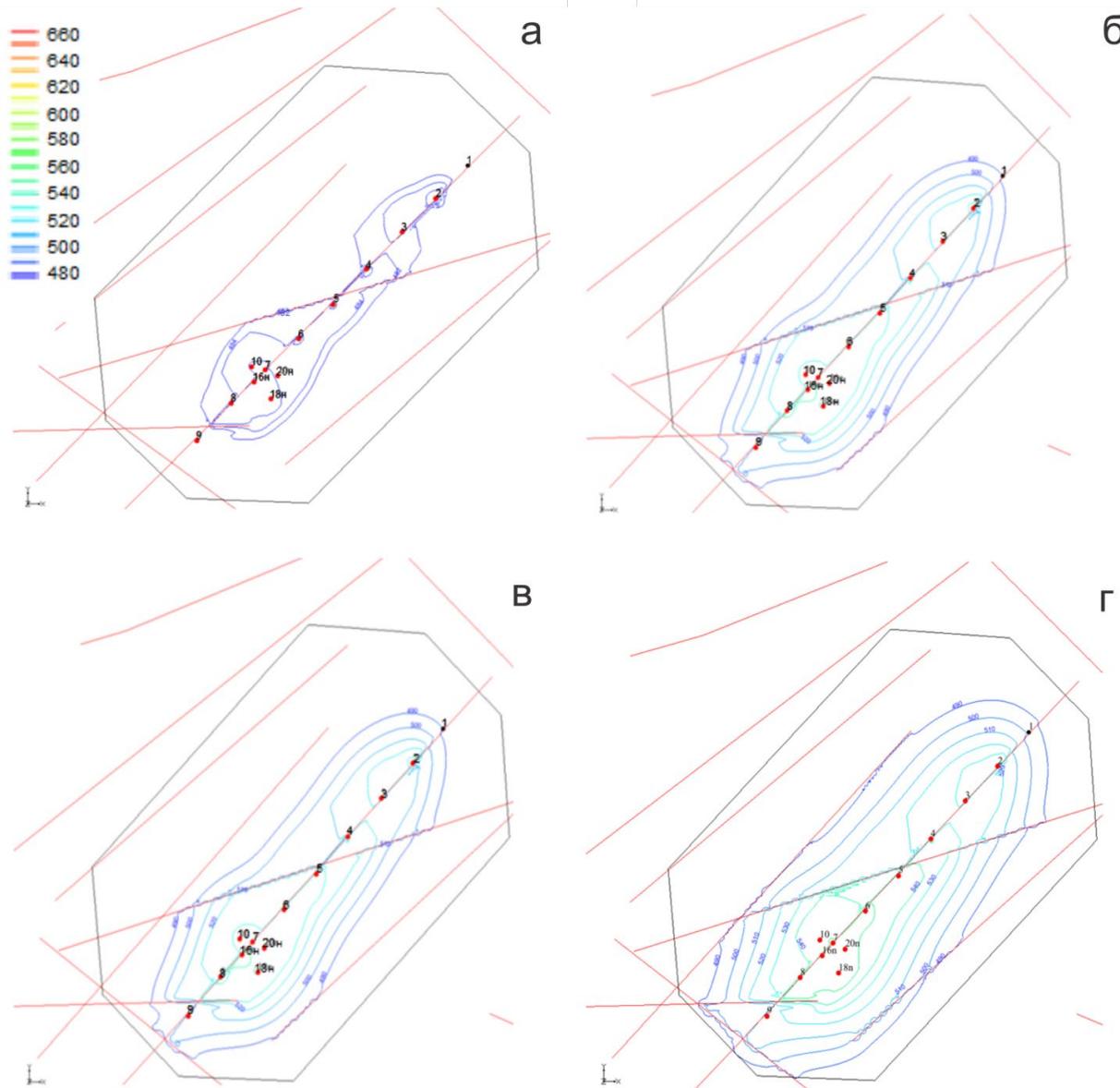


Рис. 4. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте: а) на конец 2030 г.; б) на конец 2035 г.; в) на конец 2040 г.; г) на конец 2045 г.

Прогнозное моделирование изменения уровня 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 $Q = 0 \text{ м}^3/\text{час}$;

- коллекторы толщи ММП задавались как «сухой грунт»;

- вертикальный массоперенос в зонах разрывных нарушений (переток закачиваемых рассолов в ниже залегающий НоВК) задавался 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 выполненным ранее расчетам.

Суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам. Исходя из представленных ранее фильтрационных параметров, 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 (рис. 4, 5, 6 и 7).

Выводы

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о сложных горно-геологических условиях отработки месторождения трубки Юбилейная, связанных с формированием притоков высокоминерализованных вод (до 300 г/л).

В результате выполненного цифрового моделирования было установлено, что:

- уровень в эпицентре закачки за весь пе-

риод эксплуатации участка – 2023–2045 гг. – 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^3 , 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).

При условии строительства на месторождении одноименного рудника, емкостных запасов участка будет недостаточно, так как прогнозный суммарный объём (потребность закачки) на всём жизненном цикле месторождения составит 6,2 млн м^3 , что, в свою очередь, требует дальнейшего изучения территории для выявления дополнительных перспективных площадей.

Было установлено, что интервал внутри-мерзлотных коллекторов, которые можно рассматривать для размещения дренажных вод в толще ММП, представлен трещиноватыми известняками, доломитистыми известняками и доломитами машковской ($S_{1m\delta}$) и башенной свит ($S_{1b\delta}$) силурийской системы.

Результаты исследований, представленные в данной статье, будут использованы для проектирования и для нахождения технических решений, направленных на обеспечение безопасных условий отработки трубки Юбилейная на всю глубину разведанных запасов (1300 м от дневной поверхности).

Библиографический список

Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии. Новосибирск: Изд-во СО РАН. НИЦ ОИГТМ, 2000. 119 с.

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. 4, № 2. С. 61–65.

Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.

Великин С.А., Милановский С.Ю., Петрунин А.Г. Изучение фильтрации на гидротехнических объектах Якутии // Материалы Третьей Конференции геокриологов России. Т. 4. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. С. 50–59.

Гунин В.И. Оценка условий захоронения техногенных рассолов в мерзлых породах на основе численного эксперимента // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 377–380.

Дроздов А.В. Подземное захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлые породы (на примере Удачинского ГОКа в Западной Якутии) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2005. № 3. С. 234–243.

Дроздов А.В. Захоронение промышленных стоков горнодобывающих предприятий АК «АЛРОСА» в криолитосфере // Горный журнал. 2006. № 6. С. 12–15.

Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.

Дубиков Г.И. Состав и криогенное строение мерзлых толщ Западной Сибири. М.: ГЕОС, 2002. 246 с.

Климентов П.П., Кононов В.М. Методика гидрогеологических исследований. М.: Высшая школа, 1978. 408 с.

Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 576 с.

Оловин Б.А. Фильтрационная проницаемость вечномерзлых грунтов. Новосибирск: Наука, 1993. 257 с.

Янников А.М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля (республика Саха (Якутия)). Под общ. ред. А.В. Толстова. Мирный: АЛРОСА, 2022. 132 с.

Янников А.М., Янникова С.А., Зырянов И.В., Корепанов А.Ю. Перспективы использования глубокозалегающих водоносных горизонтов для закачки слабоминерализованных вод // Горная промышленность. 2022а. № 1. С. 76–81.

Янников А.М., Янникова С.А., Корепанов А.Ю. Влияние тектонических нарушений на проектируемые системы опережающего водопонижения на примере трубки «Юбилейная» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022б. № 5-2. С. 174–186.

Prospects for the Use of the Silurian Carbonate Sequences of the Alakit-Markhinskiy Kimberlite Field for Drainage Water Injection

A.M. Yannikov^a, A.S. Struchkova^a, M.Yu. Ovchinnikova^{a, b}

^aYakutniproalmaz, 39 Lenina Str., Mirnyy 678174, Republic of Sakha (Yakutia), Russia. E-mail: yannikov90@mail.ru

^bVoronezh State University, 1 Universitetskaya Sq., Voronezh 394018, Russia

The development of the unique Yubileynaya pipe diamond deposit is accompanied by the formation of highly mineralized drainage waters, represented by practically unaltered natural brines of the Lower Ordovician and Upper Cambrian aquifers. Currently, drainage waters are injected into intrapermafrost collectors used as the main brine-absorbing structure. The lithofacies conditions of the Alakit-Markhinskoe kimberlite field has been chosen because of presence of the most representative Silurian sections in Western Yakutia, overlain by members of Carboniferous and Permian terrigenous deposits, as well as fairly thick trapp effusive fields (50–150 m). The study of cryohydrogeological conditions in the carbonate and terrigenous-carbonate rocks of the Silurian was carried out in the period 2014-2022 using standard methods to assess their potential for intrapermafrost reservoirs formation. In result of the studies, the main lithological types of the Silurian rocks, which are capable of forming an intrapermafrost technogenic aquifer due to the injection of drainage water and providing the safe development of the deposit to the entire design depth, are described.

Key words: *Yubileynaya pipe; Baytakhskaya Suite; Bashennaya Suite; Mashkovskaya Suite; carbonate rocks; natural brines; technogenic aquifer; intrapermafrost reservoirs*

References

- Alekseev S.V.* 2000. Kriogenez podzemnykh vod i gornykh porod na primere Daldyno-Alakitskogo rayona Zapadnoy Yakutii [Cryogenesis of groundwater and rocks on the example of the Daldino-Alakitskiy region of Western Yakutia]. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, p. 119. (in Russian)
- Alekseev S.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Alekseeva L.P.* 2002. Pervyy opyt zakhoroneniya solenykh drenaznykh vod karyera trubki Udachnaya v mnogoletnemerzlye porody [The first experience of burying saline drainage waters of the Udachnaya pipe open pit in permafrost]. Kriosfera Zemli. VI(2): 61–65. (in Russian)
- Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR [Hydrogeology of the USSR. Volume XX. Yakutian ASSR]. Moskva, Nedra, 1970, p. 384. (in Russian)
- Velikin S.A., Milanovsky S.Yu., Petrunin A.G.* 2005. Izuchenie filtratsii na gidrotekhnicheskikh obektakh Yakutii [Study of filtration at hydrotechnical facilities in Yakutia]. In: Proceedings of the Third Conference of Geocryologists of Russia. T. 4. Moskva, MGU, pp. 50-59. (in Russian)
- Gunin V.I.* 2006. Otsenka uslovii zakhoroneniya tekhnogennykh rassolov v merzlykh porodakh na osnove chislennogo eksperimenta [Evaluation of the conditions for the disposal of technogenic brines in frozen rocks based on a numerical experiment]. In: Underground hydrosphere: Proceedings of the All-Russian Conference on Groundwater in the East of Russia. Irkutsk, ISTU, pp. 377-380. (in Russian)
- Drozdov A.V.* 2005. Podzemnoe zakhoronenie drenaznykh rassolov v mnogoletnemerzlye porody (na primere Udachninskogo GOKa v Zapadnoy Yakutii) [Underground burial of drainage brines in permafrost (on the example of the Udachninskiy GOK in Western Yakutia)]. Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology. 3:234-243. (in Russian)
- Drozdov A.V.* 2006. Zakhoronenie promyshlennykh stokov gornodobyvayushchikh predpriyatiy AK «ALROSA» v kriolitosfere [Burial of industrial effluents from mining enterprises of AK ALROSA in the cryolithosphere]. Mining Journal. 6:12-15.
- Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V.* 2008. Kriogidrogeologiyaalmaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii [Cryohydrogeology of diamond deposits of Western Yakutia]. Irkutsk, Izd. IGTU, p. 507. (in Russian)
- Dubikov G.I.* 2002. Sostav i kriogennoe stroenie merzlykh tolshch Zapadnoy Sibiri [Composition and cryogenic structure of frozen strata of Western Siberia]. Moskva, GEOS, p. 246. (in Russian)
- Klimentov P.P., Kononov V.M.* 1978. Metodika gidrogeologicheskikh issledovaniy [Methods of hydrogeological research]. Moskva, Higher school Publ., p. 408. (in Russian)
- Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V.* 2015. Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniyalmazov Yakutii [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia]. LAP LAMBERT Academic Publishing, p. 576. (in Russian)
- Olovin B.A.* 1993. Fil'tratsionnaya pronitsaemost vechnomerzlykh gruntov [Filtration permeability of permafrost soil]. Novosibirsk, Nauka, p. 257. (in Russian)
- Yannikov A.M.* 2022. Hidrogeologiya Alakit-Markhinskogo kimberlitovogo polya (respublika Sakha (Yakutiya)) [Hydrogeology of the Alakit-Markhinskiy kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))]. Ed. A.V. Tolstov. Mirnyy, ALROSA, p. 132. (in Russian)
- Yannikov A.M., Yannikova S.A., Zyryanov I.V., Korepanov A.Yu.* 2022a. Perspektivy ispolzovaniya glubokozalegayushchikh vodonosnykh gorizontov dlya zakachki slabomineralizovannykh vod [Prospects of the use of deep aquifers for the injection of low-mineralized waters]. Mining industry. 1:76-81. (in Russian)
- Yannikov A.M., Yannikova S.A., Korepanov A.Yu.* 2022b. Vliyanie tektonicheskikh narusheniy na proektiruemye sistemy operezhayushchego vodoponizheniya na primere trubki «Yubileinaya» [Influence of tectonic disturbances on the design of advanced dewatering systems on the example of the Yubileinaya pipe]. Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 5(2):174-186. (in Russian)