

УДК 556.3.01:662.012

ОЦЕНКА БЛАГОПРИЯТНЫХ УЧАСТКОВ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ДРЕНАЖНЫХ РАССОЛОВ КАРЬЕРА «ЮБИЛЕЙНЫЙ» В КРИОГЕННЫХ ТОЛЩАХ

¹Дроздов А.В., ²Мельников А.И.¹Институт «Якутнiproalmaz» АК «АЛРОСА», Мирный;²Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: mel@crust.irk.ru

Рассмотрены криогидрогеологические, структурно-тектонические условия вблизи трубки «Юбилейной» и на выделенных участках для захоронения дренажных рассолов в мерзлые толщи. По результатам поисковых работ, опытно-фильтрационных исследований, аналитических расчетов и выполненного численного моделирования произведена прогнозная оценка возможности закачки сточных вод в многолетнемерзлые породы на перспективном участке «Заречный» с расчетом его полезной емкости и продолжительности эксплуатации.

Ключевые слова: дренажные рассолы, тектонические структуры, многолетнемерзлые породы, моделирование, закачка

ESTIMATION OF FAVORABLE SITES FOR THE BURIAL PLACE OF DRAINAGE BRINES OF THE OPENCAST MINE PIPE «JUBILEJNYJ» IN CRYOGENIC THICKNESSES

¹Drozdov A.V., ²Melnikov A.I.¹Institute «Jakutniproalmaz» AC «ALROSA», Mirnyj;²Institute of the Earth Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Irkutsk, e-mail: mel@crust.irk.ru

Structurally tectonic conditions near to a pipe «Jubilejnyj» and on the allocated sites for a burial place of drainage brines in frozen thicknesses are considered criohydrogeologicals. By results of search works, skilled-filtrational researches, analytical calculations and the executed numerical modelling the look-ahead estimation of possibility pumping sewage in многолетнемерзлые breeds on a perspective site of «Zarechnyj» with calculation of its useful capacity and duration of operation is made.

Keywords: drainage brines, tectonic structures, permafrost, modelling, pumping

Отработка глубоких горизонтов алмазных месторождений в Якутии связана с поступлением хлоридных (кальциевых или натриевых) рассолов в открытые и подземные горные выработки [4]. Возможность использования криогеологических структур и подмерзлотных водоносных горизонтов для удаления дренажных вод зависят от региональных мерзлотно-гидрогеологических условий, определяющих закрытость геологической структуры, характера обмена подземных и поверхностных вод, фильтрационно-емкостных свойств выбранных интервалов криолитозоны, а также мощности и проницаемости пород перекрывающего мерзлого экрана. В Удачнинском ГОКе АК «АЛРОСА» уже более 25 лет осуществляется захоронение дренажных рассолов в толщ многолетнемерзлых пород (ММП), обладающих высокими поглощающими способностями на благоприятных участках, приуроченных к зонам тектонических нарушений [2, 3]. При отработке трубки «Удачной» в условиях обводнения уже использовано два полигона захоронения (Октябрьский и Киенгский). В настоящее время

начата эксплуатация Левобережного участка для удаления дренажных рассолов в благоприятные криогенные структуры. В Далдыно-Алакитском алмазоносном районе ведется строительство узла закачки минерализованных на участке Ноябрьский для рудника «Айхал».

В то же время на перспективу для Айхальского ГОКа существует необходимость объективной оценки вновь вводимых природных объектов криолитозоны, в которые можно закачивать минерализованные стоки горных предприятий без ущерба окружающей среде региона. В карьере «Юбилейный» вскрытие межмерзлотных рассолов нижнеордовикского водоносного комплекса с минерализацией 50–150 г/дм³ прогнозируется в 2017–2018 гг. на отметках +168...+118 абс. м. Водоприток в карьер оцениваются объемами от 450 (гор. +165 абс. м) до 1100 м³/сут (гор. –100 абс. м). Минерализованные стоки карьера планируется закачивать в благоприятные криогенные структуры ММП. При водоотведении необходимо обеспечить экологическую безопасность на всех этапах ее реализации: контроль и прогноз запол-

нения дренажными рассолами выбранного интервала в ММП, выявление направления их миграции, разработка мероприятий по предотвращению возможных негативных процессов и т.п.

Геологоразведочные работы по поиску перспективных структур для закачки дренажных вод карьера «Юбилейный» выполнялись Мирнинской ГРЭ на 5 выделенных ранее участках, расположенных недалеко от месторождения (рисунок). Для выявления и изучения криогеологических структур на данном этапе было пробурено 10 скважин (11н–20н) глубиной по 250 м. Для предварительной оценки приёмистости, а также для определения интервалов поглощения в ММП проведены пробные наливки рассолов во всех пробуренных скважинах. Для выполнения наливов использовались дренажные рассолы из карьера «Удачный».

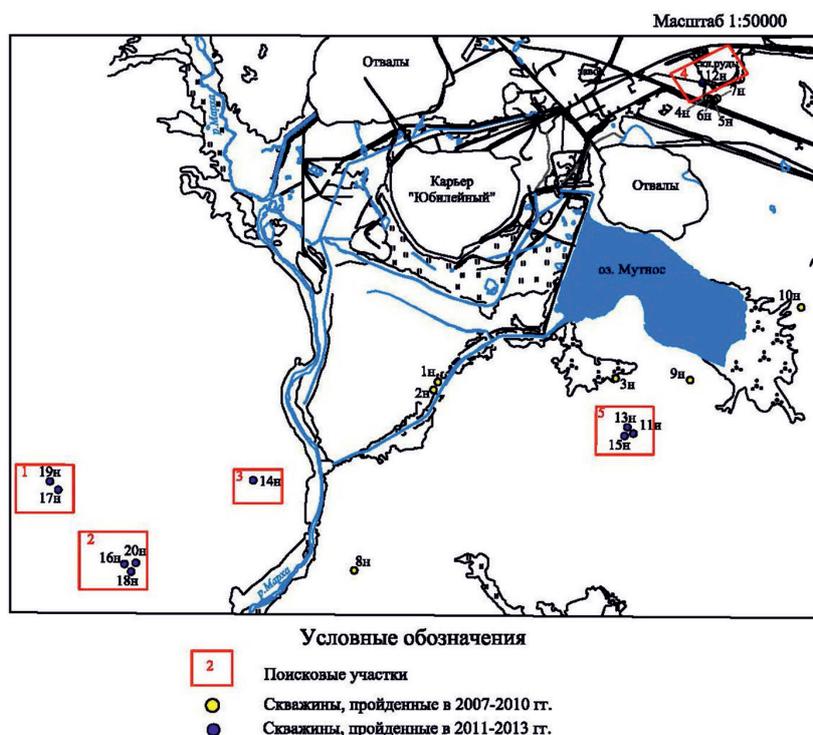
Участок № 1 находится юго-западнее трубки Одинцова, в пределах осевой части Центральной кимберлитовмещающей зоны, в которой фиксируются интервалы повышенной трещиноватости, дробления и закарстованности пород. Приёмистость скважин 17н, 19н составила около 1 м³/час.

Участок № 2 расположен в районе трубки Амакинской, в пределах осевой части

Центральной кимберлитовмещающей зоны Северо-Восточного разлома. По результатам наземных геофизических исследований были выделены объекты, характеризующиеся на участке поглощающими радиоволны свойствами: карстовые образования, зоны тектонических нарушений, зоны измененных осадочных пород. Приёмистость скважин 16н, 18н, 20н превысила 5 м³/час.

Участок № 3 находится 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. Приёмистость скважины 14н менее 1 м³/час.

Участок № 4 выделен 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, высокими фильтрационно-ёмкостными параметрами. Приёмистость скважины 12н не превышает 0,5 м³/час.



Поисковые участки для закачки дренажных рассолов карьера Юбилейный в ММП

Участок № 5 выделен по геолого-геофизическим данным при изучении характера проявления рудовмещающего разлома от жилы «Межозерная» к северо-востоку до границы участка «Фабричный». По скважинам фиксировались признаки рудовмещающей зоны: наличие карстовых полостей, маломощные инъекции кимберлитов, зоны дробления, зеркала скольжения, повышенная трещиноватость, нарушение корреляции геофизических пластов во вмещающих карбонатных породах. Приемистость скважин 11н, 13н, 15н изменяется в диапазоне 0,95–5,8 м³/час.

По результатам пробных наливов и для уточнения фильтрационных характеристик ММП на наиболее перспективных участках (№ 2 и № 5) были проведены 2 кустовых налива. Кустовые наливы выполнялись в непрерывном режиме, за исключением кратковременных остановок по техническим причинам. Центральные скважины в кусте выбирались по результатам, полученным при проведении пробных наливов, учитывалось также и техническое состояние скважин. По результатам проведенных опытно-фильтрационных работ для опытно-промышленной эксплуатации рекомендован участок № 2 (Заречный), обладающий наиболее высокими фильтрационно-емкостными свойствами ММП в осадочных толщах.

Криогидрогеологические и структурно-тектонические условия

Согласно схеме районирования и в соответствии с геоструктурными и стратиграфо-литологическими признаками территория трубки Юбилейной относится к Верхневилуйскому криоартезианскому бассейну [4]. Отработка месторождения потребовала анализа граничных условий, фильтрационных схем и оценки необходимых параметров водоносных комплексов. Для расчета прогнозных водопритоков в карьер произведено микрорайонирование с уточнением границ областей фильтрации и корректировкой фильтрационных свойств водоносных комплексов. Кимберлитовая трубка рассматривалась как «гидрогеологическое окно», через которое осуществляется прямая гидравлическая связь водоносных комплексов с карьером. Поэтому на криогидрогеологическом уровне (район месторождения) для определенных целей и задач производится районирование природных криогидрогеологических систем с позиций генезиса

отложений в определенных структурных этажах осадочного чехла.

Криогидрогеологические условия района отличаются большой сложностью и своеобразием. К числу факторов, сыгравших основную роль в формировании коллекторов подземных вод, относятся: наличие древнего осадочного чехла, включающего преимущественно переслаивание карбонатных и глинистых отложений; значительные фациальные замещения разных типов пород осадочных толщ; существование многоактного кимберлитового и траппового магматизма; развитие региональных и локальных зон тектонических нарушений разного уровня заложения; влияние длительного, многофазного и разнонаправленного криогенного этапа развития региона с образованием мощной толщи криолитозоны и изменением режима подземной и поверхностной гидросфер.

Территория района входит в состав северной геокриологической зоны, которой свойственно сплошное распространение ММП, непрерывность криогенной толщи, значительная ее мощность и высокие значения отрицательных температур [4]. Основной чертой климата региона является резкая континентальность, с температурным диапазоном выше 100 °С. Низкая среднегодовая температура воздуха и отрицательный годовой радиационный баланс (– 0,5...– 2,0 ккал/см²·мес) благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию температурных полей мерзлых массивов. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности и формируется, кроме всего, под воздействием климатических, ландшафтных, геоморфологических и других факторов.

Криогенная толща района имеет трехъярусное строение. Верхний ярус слагают ММП, содержащие воду в виде льда, заполняющего поры, каверны, трещины. Нижний ярус состоит из охлажденных пород, пустоты которых заполнены солеными водами и рассолами с отрицательной температурой – криопэгами. Промежуточное значение занимает ярус морозных пород. Необходимо отметить, что представление о строении верхнего яруса криолитозоны в последние годы несколько изменилось. Некоторыми скважинами в толще ММП зафиксированы реликтовые линзы межмерзлотного типа соленых вод и рассолов [2–4]. Мощность верхнего яруса криолитозоны (ММП) в районе достигает 750 м

и зависит преимущественно от рельефа и структурно-тектонических особенностей горных массивов. Нижняя граница ММП по месторождению контролируется глубиной вскрытия подземных вод и варьируется в пределах от 454 до 668 м, причем минимальные ее значения характерны для восточного фланга. Пониженные значения мощности криогенных толщ объясняются наличием ослабленной зоны рудоконтролирующего разлома с развитием нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса.

Геотермическими исследованиями установлено, что среднегодовая температура горных пород изменяется в широком диапазоне. Это связано со сложными геологическими условиями, влиянием реки Мархи и крупных озёр в районе месторождения. В результате температура горных пород на глубине нулевых годовых амплитуд изменяется от -6 до $+4$ °С. Причём наиболее высокие температуры наблюдались в подошрном талике озера Безымянного, а по мере удаления от него они закономерно понижались от 0 до -6 °С. Наиболее низкие температуры горных пород на месторождении зафиксированы в интервалах глубин 400–500 м. Величина геотермического градиента в интервале глубин 400–1200 м постепенно увеличивается от 0,2–0,4 до 1,3–1,7 °С/100 м. Различие в температурах горных пород в некоторой степени связано с литологическими особенностями горных пород и их теплопроводностью. Среднее значение внутриземного теплового потока для района трубки Юбилейной составляет 25 мВт/м².

Криогенное строение осадочных пород поисковых участков изучено по керну скважин глубиной 250 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 отмечаются расширенные трещинные, трещинно-жильные и базальные криогенные текстуры. Ниже по разрезу осадочные толщи разбиты вертикальными и наклонными трещинами шириной от 0,5 до 12,0 см. Лед в трещинах чистый, прозрачный. В его массе заключены обломки пород. Трещины напластования зафиксированы только в глинистых известняках и мергелях. Влажность глинистых известняков составляет 6–14%. Объемная льдистость пород на участках изменяется

по разрезу от 20 до 2–3%. В ряде случаев скважинами вскрыты пачки монолитных крепких известняков и доломитов мощностью 2–5 м. Пленки льда визуальны видны только на сколе образцов.

В соответствии с известной схемой, устанавливающей взаимоотношение подземных вод и ММП, подземные воды района разделены на следующие типы: над-, меж- и подмерзлотные. Поэтому характеристика криогидрогеологических условий основана на данном принципе стратификации водовмещающих пород. В районе месторождения надмерзлотные воды представлены водами сезонно-талого слоя, водами гидрогенных подрусловых таликов и водами подошрных таликов.

Нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс характеризуется спорадичностью распространения (только на северо-восточном фланге месторождения), наличием мерзлых пород выше и ниже обводненной части разреза, незначительным напором подземных вод и крайне низкой водообильностью отложений. Глубина вскрытия обводненных пород от 454 до 504 м (+ 167,6...+ 118,3 абс. м). Кровлей комплекса служит мощная толща замороженных отложений от нижнего ордовика до пермо-карбона, а подошвой – породы нижнего ордовика и верхнего кембрия (+ 87,2...+ 95,6 абс. м). Водосодержащие пласты – коллектора, приуроченные к нижней части олдондинской свиты (*O₁ol*), представлены песчанистыми доломитами, водорослевыми доломитами, известковистыми песчаниками, переслаивающимися с плотными глинистыми доломитами и мергелями. Эффективная мощность коллекторов – от 0,6 до 6,6 м, преобладают пласты мощностью 1–2 м. Распределение коллекторов в плане и разрезе неравномерное.

Степень водообильности комплекса очень слабая, приток пластовой воды составляет 0,86–1,27 м³/сут, величина пластового давления не превышает 2,3 МПа, коэффициент водопроницаемости составляет 0,0014 м²/сут. По химическому составу межмерзлотные воды хлоридные натриево-кальциевые с минерализацией от 27,8 до 57,8 г/дм³. Рассолы агрессивны к металлу и бетону. Таким образом, нижнеордовикский водоносный комплекс обладает незначительными естественными запасами, которые сформировались, по-видимому, лишь за счет поступления напорных вод из нижележащих горизонтов по ослабленной

зоне северо-восточного рудовмещающего разлома.

Верхнекембрийский подмерзлотный водоносный комплекс характеризуется повсеместным распространением, на всю изученную глубину (до 1200 м) является единственным водоносным комплексом, который будет оказывать определенное влияние на обводнение месторождения при его отработке. Водоносный комплекс приурочен к карбонатным разностям отложений моркокинской (C_3mrk) и мархинской (C_3mrh) свит верхнего кембрия, характеризующихся частым переслаиванием глинистых и карбонатных пород. Верхнекембрийские отложения вскрыты в интервале глубин 550–1334 м. Водосодержание коллектора в плане и разрезе распределены неравномерно. При оценке водообильности комплекса получены незначительные притоки воды, колеблющиеся в пределах 0,2–13,8 м³/сут. Замеренные пластовые давления при этом составляли от 2,15–3,87 МПа.

В целом, участок № 2 «Заречный» расположен в разломном узле, образованном широкими пересекающимися зонами северо-восточных (более ранняя) и северо-западных систем разломов.

Многочисленные дизъюнктивные нарушения, установленные в верхних горизонтах осадочного чехла, связаны с проявлениями траппового магматизма, который контролируется в районе Вилюйско-Котуйской региональной зоны глубинных разломов, протянувшейся на сотни километров. Северо-западные разломы этой системы прослеживаются в виде широкой полосы прерывистых даек траппов среднепалеозойского возраста и сопровождаются широкими зонами повышенной трещиноватости горных пород. Выделяется несколько ветвей спаренных или строенных даек. В процессе проведения буровых работ на поисковых участках отмечались тектонические элементы, проявляющиеся в наличии маломощных (до 1–2 м) зон дробления, секущей открытой трещиноватости отложений. Повышенная частота встречаемости указанных показателей отмечается до глубины 200 м. На нижних горизонтах наибольшим развитием пользуются межслоевая трещиноватость и слоистость. В керне по скважинам встречались трещины с зеркалами скольжения на их плоскостях. На поисковых участках зоны поглощений ниже эрозионного среза приурочены большей ча-

стью к крепким плотным известнякам или доломитизированным известнякам. Эти породы кроме крупных трещин, содержат и открытые пустоты. По всей вероятности, немалую роль в поглощении играют и межслоевые трещины. Северо-восточная система частично затушевывается наложенной на нее северо-западной и проявлена не так отчетливо. Тем не менее, она также подчеркивается широкими зонами повышенной трещиноватости, иногда со штрихами и зеркалами скольжения имеющими сбросовую или (чаще) сдвиговую кинематику.

Результаты опытно-фильтрационных работ на перспективном (Заречном) участке

На поисковом участке № 2 (Заречный) пробурено 3 скважины 16н, 18н и 20н глубиной по 250 м. Геолого-стратиграфический разрез ММП на участке представлен палеозойскими осадочными образованиями: карбонатно-терригенными отложениями кылахской свиты (ордовикская система); байтахской, башенной и машковской свит (силурийской системы); айхальской и ахтарандинской свит (каменноугольной системы). Осадочные породы перекрыты трапповым силлом (мощностью 14–21 м) позднепалеозойского-раннемезозойского возраста (P_2-T_1). Кроме этого, всеми тремя скважинами на участке вскрыта трапповая интрузия на глубинах 103,0–115,5 м мощностью около 2 м.

По результатам выполненных гидрогеологических исследований установлено, что минимальное значение коэффициента приемистости на участке «Заречный» составляет 0,2 м³/ч×м. Однако криогидрогеологическая среда толщи ММП является благоприятной для захоронения дренажных рассолов, при этом подтверждено, что, чем продолжительнее проводится закачка, тем больше становится коэффициент приемистости скважины. К примеру, в скважине № 16н были проведены пробный и кустовой налив. При пробном налив с продолжительностью 0,5 суток коэффициент приемистости был равен 0,2 м³/час×м, а при кустовом налив с продолжительностью 10 суток (2 ступень) коэффициент приемистости увеличился до 2,5 м³/час×м (таблица). Коэффициент фильтрации по результатам расчетов на участке увеличивается от 0,08 до 0,4 м/сут, а коэффициент водопроводимости от 7,8 до 27,6 м²/сут.

Результаты наливов рассолов в скважину 16н на участке «Заречный»

Характеристика налива	Пробный налив	Кустовой налив (1; 2 ступени)
Продолжительность налива, сут.	0,5	12; 10
Объем налитого рассола, м ³	17	525; 1280
Начальный уровень воды в скважине, м	147,4	145; 152
Плотность рассола, г/см ³	1,255	1,14
Температура рассола, °С	9,5	4
Динамический уровень, м: – на начало / на конец налива	147,4 / 74,4	145/141,6; 152/150
Повышение, м	73	3,4; 2
Приемистость скважины, м ³ /ч	14,8	1,8; 5
Коэффициент приемистости, м ³ /ч×м	0,2	0,5; 2,5
Подшва коллектора по расходомерии, м		168

Приемистость эксплуатационных скважин в условиях ММП является величиной переменной. Во время пробных наливов в скважины, из-за ограниченной возможности использования больших объемов рассолов, в основном, не удается оценить максимальные показатели их поглощающей способности. В начальный момент сброса рассолов в ММП их отток идет по уже существующему свободному, главным образом, трещинному коллектору. Далее, по мере плавления ледового заполнителя трещин, появляются новые пути фильтрации. В большинстве случаев приемистость скважин возрастает в 2–3 раза [1, 2].

Фильтрационно-емкостные свойства ММП на полигонах закачки по сравнению с начальными этапами освоения скважин увеличиваются (таблица). Это объясняется тем, что происходит плавление ледового заполнителя под воздействием сбрасываемых рассолов. Таким образом, ММП как среда для захоронения минерализованных стоков, может изменять под воздействием рассолов свои поглощающие, емкостные и прочностные показатели. Некоторые проницаемые интервалы коллекторов на начальных этапах проработки не проявляются, так как, вероятнее всего, оказались закольматированы при бурении продуктами разрушения пород и льдом. При пробных наливах часть трещинных коллекторов открывается и становится местом проникновения жидкости в ММП [1, 2].

Анализируя полученные данные опытно-фильтрационных исследований по скважинам Заречного участка, можно сделать следующие выводы:

– основной поглощающий интервал (143–168 м) приурочен к отложениям ба-

шенной и машковской свит, представленных известняками и доломитами. Породы среднетрещиноватые, до 5–7 трещин на 1 п.м. Трещины открытого типа, частично залечены льдом;

– приемистость скважины 16н более 5 м³/ч, при расчётной водопроницаемости толщ от 7,8 до 14 м²/сут;

– коллекторы залегают ниже урезов речных долин (урез р. Мархи 604,5 абс. м, отметка залегания коллекторов 487–493 абс. м);

– установлен эффект увеличения фильтрационно-емкостных свойств коллекторов за счет растворения льда;

– коллекторы выше по разрезу перекрыты естественным водоупором в виде силла траппов, залегающих в кровле отложений машковской свиты;

– участок закачки удален от карьера на расстояние 5,5 км, при котором возврат закачиваемых вод в карьер будет отсутствовать длительный период (несколько десятков лет).

Таким образом, по результатам проведенных опытно-фильтрационных работ для опытно-промышленной эксплуатации рекомендован участок № 2 (Заречный), обладающий наиболее высокими фильтрационно-емкостными свойствами ММП в осадочных толщах и характеризующийся благоприятными условиями для закачки рассолов.

Прогноз распространения фронта закачиваемых рассолов на участке «Заречный»

Прогноз закачки рассолов в ММП сводится к решению взаимосвязанной системы уравнений фильтрации и тепломассопереноса в пласте с учетом фазового перехода в системе лед-рассол при изменчивости

фильтрационных параметров в зависимости от нахождения в мерзлой или талой зонах. Для решения задачи утилизации рассолов в ММП расчеты можно упростить, для этого используя схему фильтрации в сухой грунт [5]. В соответствии с этой схемой проводимость пласта меняется от нулевых значений (T_o – мерзлая зона) до максимальных (T , отвечающих талой зоне). Соответственно, будет изменяться водоотдача (недостаток насыщения) пласта от μ_o до μ . Причем, в качестве водоотдачи следует принимать гравитационную составляющую. В такой постановке с использованием лицензионной программы MODFLOW было выполнено численное моделирование задачи захоронения сточных вод в двух предельных вариантах:

– I вариант – минимальные значения фильтрационных параметров (зона растаяла минимально), $k_1 = 0,08$ м/сут, $\mu_1 = 0,02$;

– II вариант – максимальные значения параметров (талая зона), $k_2 = 0,4$ м/сут, $\mu_2 = 0,1$.

Закачка моделировалась в соответствии с объемами водопритоков в карьерное поле. В одну скважину сбрасывалось до 5–7,5 м³/ч рассолов в режиме свободного налива. Одновременно закачка производилась в 2 (1 год) – 6 (9–11 годы) скважин. При I варианте расчетов площадь распространения техногенного водоносного горизонта составит 0,83 км² (через 3 года) и 4,21 км² (через 11 лет). Уровни воды на участке закачки прогнозируются на отметках 490–520 абс. м (ниже тела долеритовой интрузии).

При II варианте исследований площадь распространения техногенного водоносного горизонта будет значительно меньше: 0,37 км² (через 3 года) и 2,13 км² (через 11 лет). Уровни воды на участке закачки будут существенно ниже (460–470 абс. м). Результаты моделирования свидетельствуют о том, что чем выше емкости свойства отложений, тем меньше площадь распространения закачиваемых рассолов.

Таким образом, если закачивать на участке только дренажные рассолы (без смешивания со слабоминерализованными водами), то прогнозной емкости ММП участка «Заречный» хватит на весь период отработки запасов до отметки – 100 абс. м. При этом граница распространения закачиваемых рассолов в ММП не доходит до р. Марха и карьера.

Приведенные выше результаты численных расчетов с использованием моделирования были продублированы аналитическими оценками. При наливе рассолов через

скважину в ММП в первом приближении можно воспользоваться решением задачи о радиальной фильтрации в сухой грунт. Для этого используем зависимость радиуса растекания от фильтрационных параметров и времени [5]:

$$R^2 = \frac{2t}{\mu} \sqrt{\frac{KQ}{\pi}} + R_K^2, \quad (1)$$

где K – коэффициент фильтрации; Q – дебит закачки, соответствующий общим водопритокам в карьер; R – радиус растекания; R_K – приведенный радиус контура закачных скважин; t – время; μ – гравитационная емкость пласта (коэффициент недостатка насыщения).

Подставляя исходные данные в формулу (1), получим: $R = 943$ м. Оцененный радиус растекания не учитывает площадную конвекцию и дисперсионную составляющую. Дополнительные параметры контура вытеснения за счет разницы в плотностях получим по зависимости [1]:

$$\Delta R_n = 1,65 \sqrt{\Delta \bar{\gamma} \frac{Km}{n_\delta} t}, \quad (2)$$

где $\Delta \bar{\gamma} = \frac{\gamma_p - \gamma_o}{\gamma_o}$, γ_p – плотность рассола, γ_o – плотность пресной воды; Km – водопроводимость пласта; t – время прогноза; n_δ – пористость блока.

Введя исходные данные для расчета, получим: $\Delta R_n = 379$ м. Дополнительное перемещение контура вытеснения за счет дисперсионного переноса составит [1]:

$$\Delta R_d = 4,4 \sqrt{\frac{D}{n_o} t}, \quad (3)$$

где D – коэффициент конвективной диффузии; n_o – активная трещиноватость, 0,01.

Введя исходные данные для расчетов, получим, что дополнительно фронт поршневого вытеснения за счет конвективной дисперсии за 10 лет составит: $\Delta R_d = 138$ м. Суммируя вышеизложенное, оценим общий радиус распространения закачиваемых рассолов:

$$R_\Sigma = R + \Delta R_n + \Delta R_d = 943 + 379 + 138 = 1460 \text{ м.}$$

Минимальное расстояние от контура обратной закачки до охраняемого объекта (р. Марха) составляет 1800 м. Таким образом, условие экологической безопасности соблюдается: 1800 м > 1460 м. Проведем расчет радиуса распространения рассолов

другим способом на основе зависимости (5,25), учитывающий фазовый переход «лёд-вода»:

$$V_{on} = \frac{2}{3} \beta^* \frac{Q_o \tau}{n_\delta m} \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Считаем, что рассолы займут область, которую в плане можно приравнять к кругу:

$$V_{on} = \pi (R^2 - R_K^2) \cdot m \cdot n_\delta. \quad (5)$$

Из зависимости (5) найдем радиус растекания закачиваемых рассолов:

$$R = \sqrt{\frac{V_{on}}{\pi m n_\delta} + R_K^2}. \quad (6)$$

Подставим в формулу исходные данные и получим: $R = 853$ м. Расчетное значение хорошо коррелируется с R , полученным с использованием схемы фильтрации в сухой грунт ($R = 943$ м) (см. зависимость 1). Для оценки общего радиуса распространения R_Σ необходимо дополнительно учесть гравитационную и дисперсионную составляющие:

$$R_\Sigma = 853 + 379 + 138 = 1370 \text{ м.}$$

Таким образом, рассчитанные двумя способами значения радиуса распространения закачиваемых рассолов в ММП близки между собой (1370 и 1460 м), что меньше расстояния до р. Марха, находящейся на расстоянии 1800 м от участка закачки. Полученные результаты аналитических расчетов хорошо коррелируются с данными численного моделирования, что является надежной базой для дальнейшего их использования.

Список литературы

1. Бочеввер Ф.М. и др. Основы гидрогеологических расчетов. – М.: Изд-во «Недра». – 1969.
2. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. – 296 с.
3. Дроздов А.В. Природные и техноприродные резервуары промышленных стоков в криолитозоне (на примере Якутской части Сибирской платформы). – Якутск: Изд-во СВФУ, 2011. – 416 с.
4. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. – Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. – 507 с.
5. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. – М.: Изд-во «Наука». – 1977.