

ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 556.334.5

Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал»)**А.М. Янников^а, С.А. Янникова^а, М.Ю. Овчинникова^{а, б}, А.Ю. Корепанов^а**
^а«Якутнипроалмаз»

678174, г. Мирный, ул. Ленина, 39, Республика Саха (Якутия)

E-mail: yannikov90@mail.ru

^бВоронежский государственный университет

394018, Воронеж, Университетская пл., 1

(Статья поступила в редакцию 14 мая 2021 г.)

Мощные толщи многолетнемерзлых пород на территории Якутской алмазоносной провинции позволяют учитывать и использовать этот естественный благоприятный фактор в природоохранных направлениях. Для экологически безопасной эксплуатации месторождений АК АЛРОСА осуществляет закачку дренажных вод в существующие и формируемые емкости коллекторов в толщах многолетнемерзлых пород. В связи с чем важным направлением исследований является оценка влияния применяемого метода на состояние геологической среды путем построения схемы прогноза положения техногенного горизонта на расчетный срок эксплуатации месторождения. Методами наземной геофизики и изучением режима пьезометрической поверхности были получены результаты планового распространения закачиваемых дренажных вод. Оценена емкость участка закачки дренажных рассолов по результатам закачки в режиме опытно-промышленных работ. Проведенные исследования и выполненные расчеты позволяют сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» на участке Ноябрьский в многолетнемерзлые породы позволило уменьшить степень влияния горных и добычных работ, как на геологическую среду, так и на окружающую, исключив возможность попадания рассолов в поверхностные воды.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые породы, рассолы, дренажные воды, Айхал.*

DOI: 10.17072/psu.geol. 20.3.284

Введение

Рациональное использование природных ресурсов и геологической среды, испытывающей непосредственную техногенную нагрузку из-за отработки месторождений, является одной из актуальных глобальных проблем современности. Добыча полезных ископаемых зачастую приводит к отрицательным экологическим изменениям окружающей среды. Отработка месторождений связана с образованием дренажных вод, которые, как правило, занимают значительную часть в общем объеме воздействия на природную и геологическую среды. Коренные

месторождения алмазов, обрабатываемые АК АЛРОСА в рамках Якутской алмазоносной провинции, имеют повсеместное обводнение различной интенсивности подмерзлотными и межмерзлотными рассолами. Для экологически безопасной эксплуатации месторождений АК АЛРОСА производит закачку дренажных вод по двум принципиальным технологическим схемам:

- закачка в существующие и формируемые емкости коллекторов в толщах многолетнемерзлых пород (ММП);
- обратная закачка в подмерзлотные водоносные горизонты и комплексы криолитозоны.

Развитие на всей территории Западной Якутии мощной толщи ММП, обладающей экранирующими свойствами от верхней, наиболее незащищенной, части разреза (зоны интенсивного водообмена) и играющей роль своеобразной «покрышки» (Гидрогеология СССР, 1970; Шепелев и др., 1984; Колганов и др., 2015), позволяет учитывать и использовать этот естественный благоприятный фактор в природоохранных направлениях.

Целью представленной статьи является оценка влияния горных и добычных работ рудника «Айхал» на участке Ноябрьский на геологическую среду при использовании метода закачки дренажных вод в ММП, а также построение схемы прогноза положения техногенного горизонта на расчетный срок эксплуатации месторождения. Достижение поставленной цели осуществлялось при помощи натуральных экспериментов, использующих геофизические методы изучения, а также стандартные решения гидродинамического контроля. Прогнозная емкость участка определялась в результате качественной интерпретации проведенных ГИС, лабораторного изучения керн и гидродинамического моделирования. Исследования проводились в следующей последовательности:

1. Изучение кернового материала, выделение интервалов поглощения на этапе полевых и натуральных экспериментов.
2. Изучение планового распространения закачиваемых рассолов при помощи режимных наблюдений по сети скважин, совмещенных с методами наземной геофизики.
3. Схематизация и разработка модели участка «Ноябрьский».
4. Оценка прогнозной емкости участка, определение оптимального режима его эксплуатации.

Характеристика объекта исследований

Трубка «Айхал» расположена в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, относящегося к Якутской алмазоносной провинции (Гидрогеология СССР, 1970). Формирующиеся в процессе отработки месторождения дренажные рассолы закачиваются на сопряженном участке «Ноябрьский». Участок расположен в 4 км юго-западнее трубки

Айхал, на водоразделе рек Сохсолох и Ой-юр-Юряге.

В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхой-юрской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной (силурийской системы); айхальской свиты (каменугольной системы). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойского-раннемезозойского периода (P_2-T_1), образованным внедрением магмы основного состава – долеритами, слагающей крупные пластовые тела интрузий и дайки, а также туфами (Геология, гидрогеология, 1986).

По отношению к ММП основные модели природных и природно-техногенных коллекторов в криолитозоне, применяемых для ликвидации промышленных стоков, можно стратифицировать на: надмерзлотные, межмерзлотные, подмерзлотные (первого подмерзлотного водоносного горизонта) (Вожов, Сурнин, 1982; Климовский, Готовцев, 1994; Дроздов и др., 2008).

Природные внутримерзлотные коллектора представляют собой криогенные геологические структуры с определенной, в основном тектонической нарушенностью и пластово-поровой пустотностью ММП, которые обладают естественной и наведенной емкостью (Балобаев, 1991; Яковлев Е.А., Сторчик 1982; Лобанов и др., 1995; Сердюков и др., 1996). При воздействии на льдистую составляющую пород этих структур высококонцентрированными стоками происходит формирование дополнительной гравитационной емкости в техногенном талике внутри мерзлого массива. В такие естественные коллекторы производится закачка дренажных вод (крепких рассолов) хлоридного кальциевого состава (Балобаев, Девяткин, 1983).

Согласно проекту на строительство узла закачки дренажных вод рудника «Айхал», на участке «Ноябрьский» в 2013–2015 гг. было пробурено 14 скважин (рис. 1), в том числе:

- 6 закачных скважин №№ 101, 102, 103, 104, 105, 106 глубиной по 230 м;
- 8 наблюдательных скважин №№ 1н, 2н,

3н, 4н, 5н, 6н – по 230 м, 7н – 400 м, 8н – 600 м.

Кроме этого, на более ранних стадиях исследований, на участке были пробурены

скважины №№ 1, 5/1 и 5/2, использующиеся в качестве наблюдательных, а также скважина №2, ранее используемая в качестве закачной.

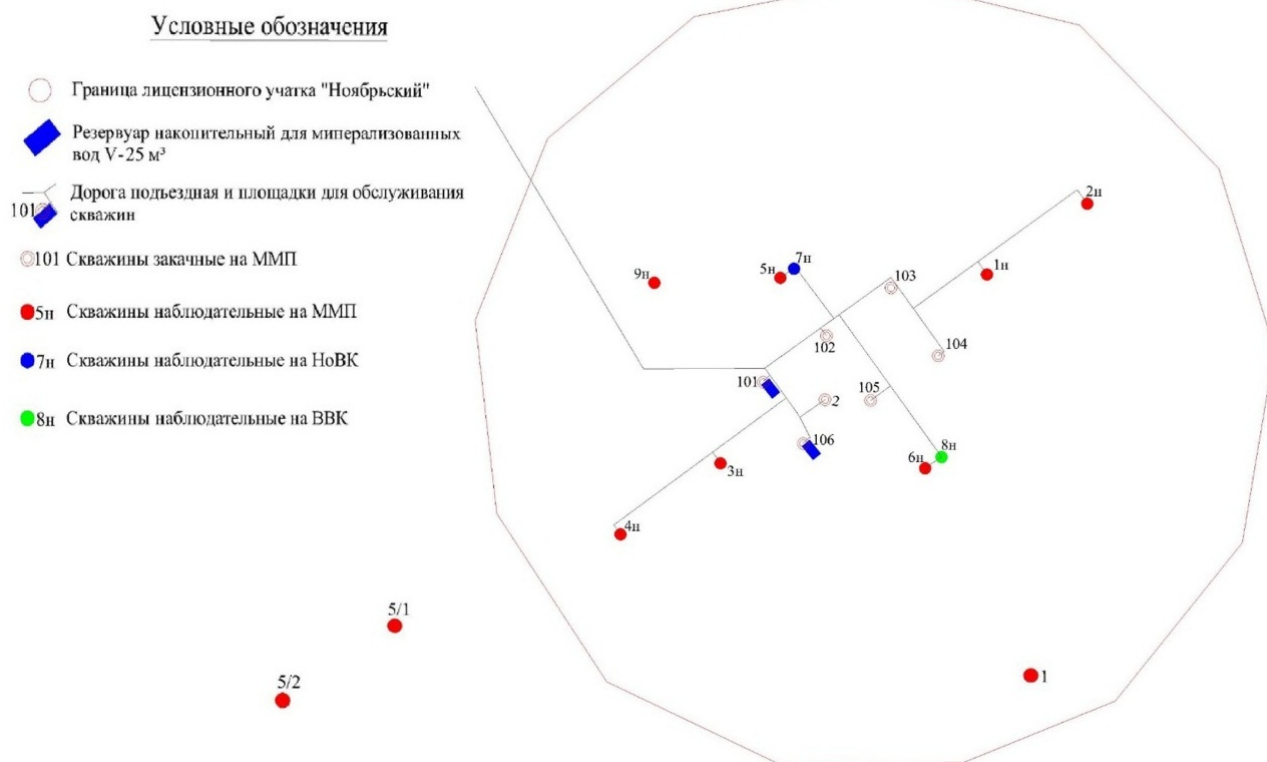


Рис. 1. Схема расположения скважин на участке закачки дренажных вод рудника «Айхал»

По результатам проведенных гидрогеологических и геофизических исследований, породы, обладающие наилучшими коллекторскими свойствами («рабочие интервалы»), залегают:

Скв.101 – на глубинах от 150.0 до 193.0 м.

Скв.102 – на глубинах от 165.0 до 199.0 м.

Скв.105 – на глубинах от 145.0 до 188.0 м.

Скв.106 – на глубинах от 145.0 до 187.0 м.

Поглощающие интервалы представлены трещиноватыми известняками сохолохской свиты (O_1sh), трещиноватыми известняками и мергелем сытыканской свиты (O_2st) и трещиноватым, пестроцветным мергелем кылахской свиты (O_{2-3kl}). Наиболее проницаемые пласты-коллектора, по результатам расходомерии, отмечены в интервале глубин 145.0–190.0 м.

В настоящее время участок обратной закачки «Ноябрьский» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме с суммарной производительностью закачки до 430 м³/сут в режиме свободного налива. На базе 6 по-

глощающих скважин. На начало 2021 г. в коллектора ММП закачено порядка 250 тыс. м³ дренажных вод, при расчётной ёмкости участка 6 300 000 м³. На настоящий момент заполнено ~ 4% полезной ёмкости участка.

Методика исследования

Результатом многолетних исследований (2001–2009 гг.) перспективных участков, проводимых геологоразведочным комплексом АК АЛРОСА, явилось обоснование перспективности строительства участка закачки дренажных вод рудника «Айхал» в зоне динамического влияния Ноябрьского разлома. При выборе местоположения объекта исследований, прежде всего, учитывались благоприятные геолого-гидрогеологические, геокриологические, геоморфологические, структурно-тектонические условия участка «Ноябрьский». Рассолопоглощающей структурой на участке «Ноябрьский» является

техногенный водоносный горизонт, формируемый в толще ММП в результате закачки дренажных рассолов рудника «Айхал». Первоначально, при закачке рассолов, их распространение (в свободном ото льда трещинном пространстве ММП) происходит при неполном насыщении под действием силы тяжести по хорошо проницаемым зонам. При этом происходит таяние ледового заполнителя трещин, пор, каверн, увеличение их раскрытия, соединение отдельных проводящих зон, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях (Алексеев и др., 2002, 2005). Со временем за счет таяния льда сформируется область полного насыщения свободного пространства в толще ММП рассолами, смешанными с водой растаявшего льда. И уже с этого времени движение рассолов будет происходить под действием градиента давлений и определяться законами Дарси и сохранения массы (Атрощенко, 2000).

Для изучения планового распространения закачиваемых вод, в 2015 и в 2019 гг. были выполнены наземные геофизические исследования и проведено изучение режима изменения пьезометрической поверхности. В 2015 г. в результате интерпретации полученных материалов электроразведки построены разрезы распределения продольных электрических сопротивлений по профилям зондирований и карты продольной проводимости для различных интервалов глубин.

Проведенные в 2019 г. геофизические исследования были направлены на изучение изменения планового расположения, формируемого в результате закачки дренажных вод рудника «Айхал» техногенного водоносного горизонта. Профили электроразведочных работ расположены вкрест простирания кимберлитоконтролирующей зоны разломов.

Результаты работ представлены в виде геоэлектрических разрезов дифференциальной проводимости по профилям, карты уровня дренажных рассолов и подземных вод нижнеордовикского водоносного комплекса по участку. Построение карт и разрезов осуществлялось при помощи пакета программ Oasis montaj, Surfer. Верхняя часть

разрезов до глубин 40 м из-за технических возможностей аппаратуры из изучения выпала. Разрезы построены по дифференциальной проводимости (dS/dH), так как этот параметр наиболее контрастно отражает степень геоэлектрической неоднородности разреза.

Результаты исследований и их обсуждения

Дренажные воды рудника «Айхал» образуются в результате разгрузки в подземные горные выработки природных рассолов межмерзлотного нижнеордовикского водоносного комплекса и подмерзлотного верхнекембрийского водоносного комплекса.

По результатам статистической обработки химических анализов дренажных вод, закачиваемых в ММП, по анионному составу рассолы являются хлоридными. Катионный состав рассолов относится к магниевонатриево-кальциевому.

1. Изучение планового распространения купола растекания при помощи режимных наблюдений по сети скважин

Наблюдения за уровнями подземных вод охватывают межмерзлотный нижнеордовикский (НоВК), верхнекембрийский (ВВК) и техногенный водоносные комплексы. Техногенный межмерзлотный водоносный горизонт образован закачкой дренажных вод рудника «Айхал» на участке закачки дренажных вод (УЗДВ) «Ноябрьский».

Для установления структуры сформировавшегося на участке закачки фильтрационного потока, определяющего распространение закачиваемых вод, и для уточнения фильтрационных характеристик пластов-коллекторов, был осуществлен геодинимический контроль, основывающийся на изменении уровня в скважинах.

Наблюдения за гидродинамическим режимом техногенного межмерзлотного талика выполнялись по 14 скважинам.

Динамика изменения уровня по закачным скважинам представлена в табл. 1.

Таблица 1. Динамика изменения уровня по закачным скважинам

Параметры	Скв.101	Скв.102	Скв.103	Скв.104	Скв.105	Скв.106	Скв.2
Абс. отм. устья скважины	632.0	640.6	653.0	644.5	637.4	628.6	631.9
Глубина уровня на 2014–18 гг. по стволу скважины, м. в абс. отм.	<u>192.6</u> +439.4	<u>205.2</u> +435.4	<u>223.0</u> +430.0	<u>Сухая</u> 414.5	<u>Сухая</u> 407.4	<u>191.2</u> +437.4	<u>179.8</u> +452.1
Объем налива за 2019 г., м ³	540	7880	16250	5908	8500	1050	0
Глубина уровня на 31 декабря 2019 г. по стволу скважины, м. в абс. отм.	<u>192.9</u> +439.03	<u>173.1</u> +467.46	<u>203.9</u> +449.1	<u>203.1</u> +441.3	<u>194.6</u> +442.79	Пробка 188.5м	<u>191.1</u> +440.76
+ Повышение - Понижение уровня, м	- 0.4	+32.1	+ 19.1	+ 26.8	+ 35.4		-11.3

Скважины, при построении графиков изменения уровня техногенного горизонта в ММП, были распределены по принципу удаленности от центра закачки (рис. 2, 3).

В ходе наблюдений за изменением режима подземных вод техногенного горизонта наблюдается процесс его формирования по мощности и площади. Изменение глубин залегания уровней техногенного горизонта по наблюдательным скважинам за многолет-

ний период наблюдений (2014–2019 гг.) представлено в табл. 2.

Максимальные повышения уровня в многолетнем разрезе (с начала эксплуатации участка) отмечаются в скважинах №№ 1н, 3н, 4н, находящихся в зоне динамического влияния разлома. То есть движение рассолов происходит по тектонической зоне в направлении с северо-востока на юго-запад.

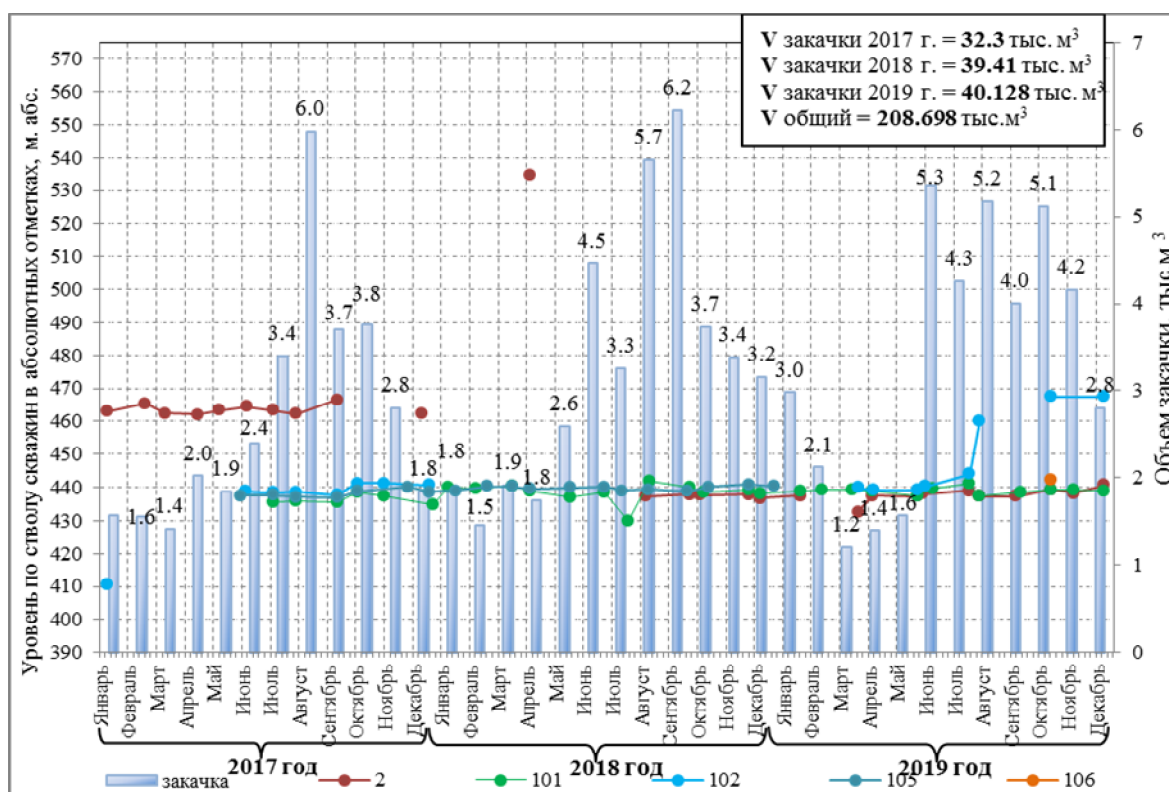


Рис. 2. Динамика изменения уровня техногенного горизонта в ММП по скважинам, расположенным в эпицентре закачки на участке «Ноябрьский»

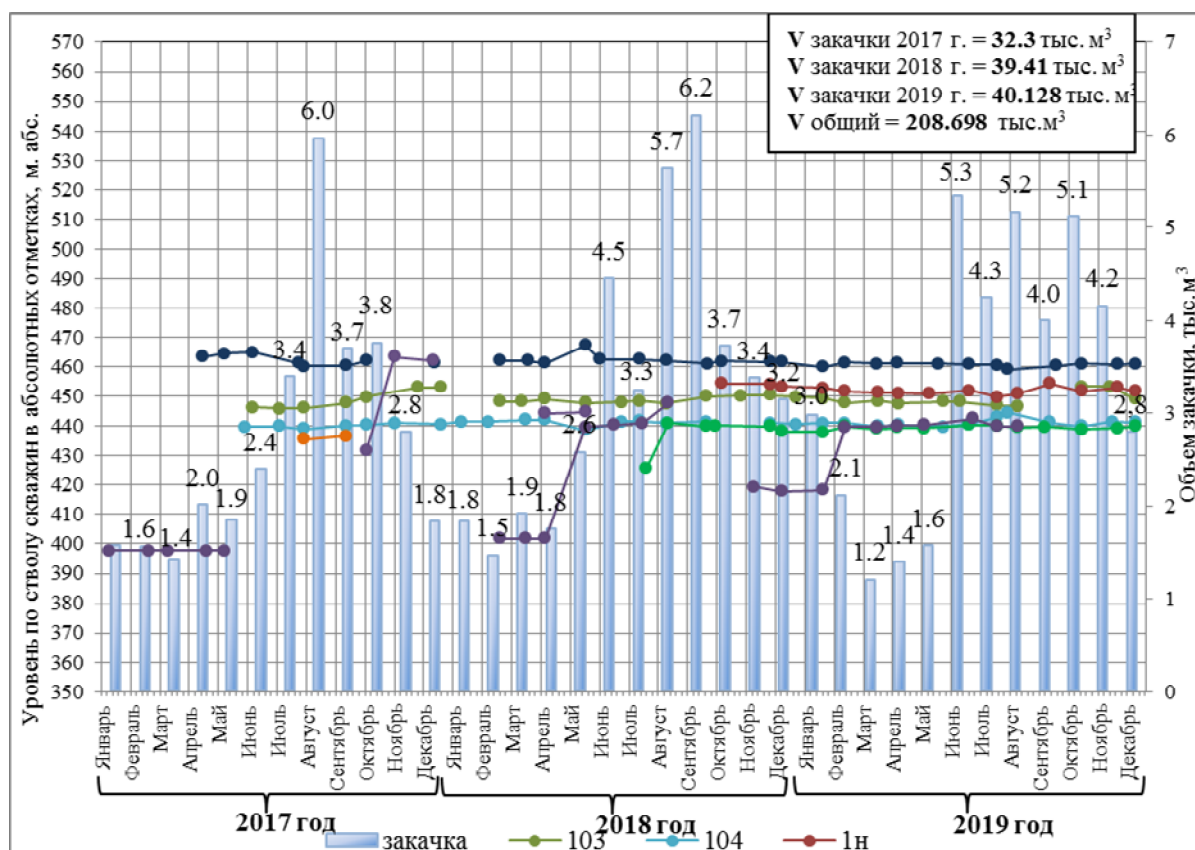


Рис. 3. Динамика изменения уровня подземных вод техногенного горизонта по наблюдательным скважинам на участке «Ноябрьский»

Таблица 2. Динамика изменения глубины залегания уровня по наблюдательным скважинам

Абс. отм. устья скважины	Скв.1н	Скв.2н	Скв.3н	Скв.4н	Скв.5н	Скв.9н
	+ 651.5	+ 653.5	+ 622.0	+ 625.8	+ 642.0	+ 635.0
Глубина уровня при вводе скважины в режим по стволу скважины, м. в абс. отм., м.	Сухая + 421.5	Сухая + 423.5	Сухая + 392.0	Сухая + 395.8	188,2 + 453.8	Сухая + 635.0
Глубина уровня на декабрь 2017 г. по стволу скважины, м в абс. отм., м.	Сухая + 421.5	Сухая + 423.5	184,0 + 438.0	Сухая + 395.8	189,4 + 452.6	-
Глубина уровня на декабрь 2018 г. по стволу скважины, м в абс. отм., м.	198.4 + 453.1	Сухая + 423.5	183.7 + 438.3	207.9 + 417.9	180.3 + 461.7	Сухая + 635.0
Глубина уровня на декабрь 2019 г. по стволу скважины, м в абс. отм., м.	199.90 + 451.65	Сухая + 423.50	182.10 + 439.90	185.90 + 439.90	180.89 + 461.11	Сухая + 635.0
+ Повышение - Понижение, м	+ 30.5	0	+ 44.10	+ 44.10	+ 7.31	Пробка

Анализ приведенной информации (таблицы и диаграммы) указывает на тот факт, что в настоящее время техногенный горизонт находится на стадии формирования, т.к. объемы ежегодной закачки невелики (поряд-

ка 40 тыс. м³ в год). Площадь образующейся линзы-криопэга четко прослеживается только в эпицентре закачки (по линии закачных скважин), при удалении более чем на 200 м корреляция ухудшается, что указывает на

ограниченное плановое распространение. Наблюденные изменения пьезометрической поверхности дополнительно указывают на влияние структурно-тектонического, литолого-фациального и геокриологических факторов.

Формирование планово однородного и выдержанного, с точки зрения фильтрационных характеристик, природно-техногенного криопэга возможно не ранее 2030 г., т.к. к этому периоду на участке будет закачено порядка 600–700 тыс. м³ рассолов.

2. Изучение планового распространения закачиваемых вод, с применением методов наземной геофизики

Задачей геофизических работ, выполняемых на стадии опытно-промышленных работ на участке «Ноябрьский» в 2015 г., являлась оценка динамики развития зоны техногенного талика, как в плане, так и в разрезе; определение возможных путей транзита закачиваемых рассолов, а также установление мощности обводненной части многолетнемерзлых пород (ММП) до глубин 300 м.

При интерпретации результатов электро-разведки ЗМПП (зондирование методом переходных процессов) верхняя часть разреза до глубин 50 м из изучения выпадала из-за технических возможностей аппаратуры. По данным ЗМПП, верхние части геоэлектрических разрезов по профилям от дневной поверхности до абсолютных отметок 490–500 м охарактеризованы градиентной областью повышенных значений сопротивлений более 1000 Ом. Градиентная область отвечает подошве трапповых отложений, т.е., по данным электроразведки, граница раздела «траппы-карбонатные породы» проходит на глубине примерно 100–120 м от дневной поверхности.

Первая низкоомная (проводящая) структура с продольным сопротивлением $\rho_i = 3\text{--}5 \text{ Ом*м}$ расположена в центре обследованного участка, глубина залегания кровли составляет 140–150 м. Вторая структура повышенной проводимости в изученном разрезе с продольным сопротивлением $\rho_i = 8 \text{ Ом*м}$

выделена на юго-востоке участка, кровля структуры коррелируется на глубине 150 м. При глубине кровли 190–200 м она распространяется на юг участка. Третья проводящая структура с продольным сопротивлением $\rho_i = 8 \text{ Ом*м}$ локализована в разрезе на юго-западе участка, и кровля структуры выделена на глубине 150 м. На глубинах 200–230 м низкоомная структура раскрывается на юг участка (рис. 4).

Выделенные низкоомные интервалы разреза интерпретируются как интервалы возможного в дальнейшем распространения техногенного горизонта, образующегося в проницаемых интервалах карбонатных пород (тектонически ослабленные зоны, зоны трещиноватости и дробления). Эти интервалы оцениваются как возможные пути транзита закачиваемых рассолов.

Таким образом, была определена мощность и границы обводненных интервалов в изученном разрезе многолетнемерзлых пород (ММП). Полученные результаты в целом согласуются с наблюдаемыми по сети скважин изменениями пьезометрической поверхности формируемого природно-техногенного межмерзлотного горизонта.

Наземные геофизические исследования 2015 г. обусловлены локальным обводнением массива ММП, так как на начальной стадии опытно-промышленных работ на участке распространение закачиваемых вод происходит по трещинам и разломным зонам (как в плане, так и в разрезе) и не имеет выраженной площадной формы, необходимой для определения показателей проводимости массива.

На рис. 4 отображено плановое распространение купола растекания закачиваемых рассолов, определенное по результатам проведенной наземной геофизики, относительно сети пробуренных скважин, геофизических профилей и контура лицензионного участка «Ноябрьский».

Проведенные в 2019 г. геофизические исследования были направлены на изучение изменения планового расположения, формируемого в результате закачки дренажных вод рудника «Айхал», техногенного водоносного горизонта.

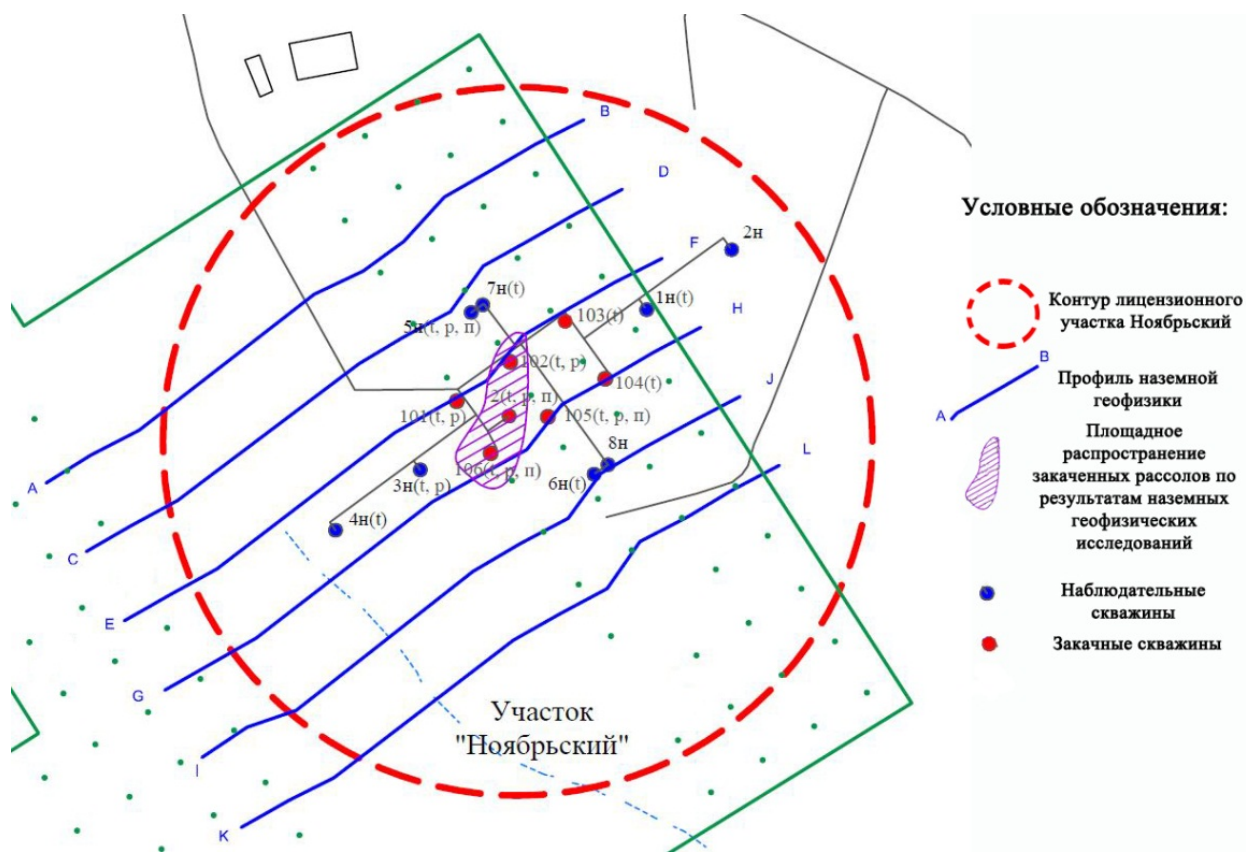


Рис. 4. Плановое распространения купола растекания по результатам геофизических исследований 2015 г.

По геоэлектрическим разрезам (рис. 5) видно, что нижний интервал разреза глубже 180–200 м на большей части площади является сильнопроводящим. В центральной части участка на глубинах 180–220 м от дневной поверхности эта проводящая область соответствует техногенному талику, на остальной площади – межмерзлотным подземным водам нижнеордовикского водоносного комплекса.

По данным о положении кровли водоносного горизонта, на геоэлектрических разрезах построена карта уровня водоносного горизонта (абсолютные отметки в метрах) по состоянию на июль 2019 г. На карте видно, что техногенный водоносный горизонт в толще многолетнемерзлых пород имеет локальное распространение (рис. 5).

В плане техногенный талик имеет близкую к овальной форму, вытянутую в северо-восточном направлении. Линейные размеры талика, по данным электроразведки, составляют ~ 300×1000 м, его кровля находится на глубине 180–220 м от дневной поверхности.

Мощность, определенная по разрезам дифференциальной проводимости, составляет порядка 25–30 м. Вокруг зоны талика абсолютные отметки верхней границы проводящего слоя в пределах 350–400 м и соответствуют кровле нижнеордовикского водоносного комплекса. Предполагаемые тектонические зоны выделены по линейным зонам пониженных сопротивлений, по потере корреляции значений ρ_T и т.п.

На плане изоом на эффективной глубине 250 м (рис. 6) такие зоны проявлены фрагментами северо-восточного и северо-западного направлений. Они могут рассматриваться как зоны трещиноватости горных пород (зоны дробления, пустоты и т.п.) и в дальнейшем как возможные пути миграции закачиваемых рассолов.

По данным электроразведки ЗМПП (зондирование методом переходных процессов) 2019 г., верхняя граница водоносного горизонта в пределах этой проводящей структуры находится на глубинах 220–230 м от дневной поверхности.

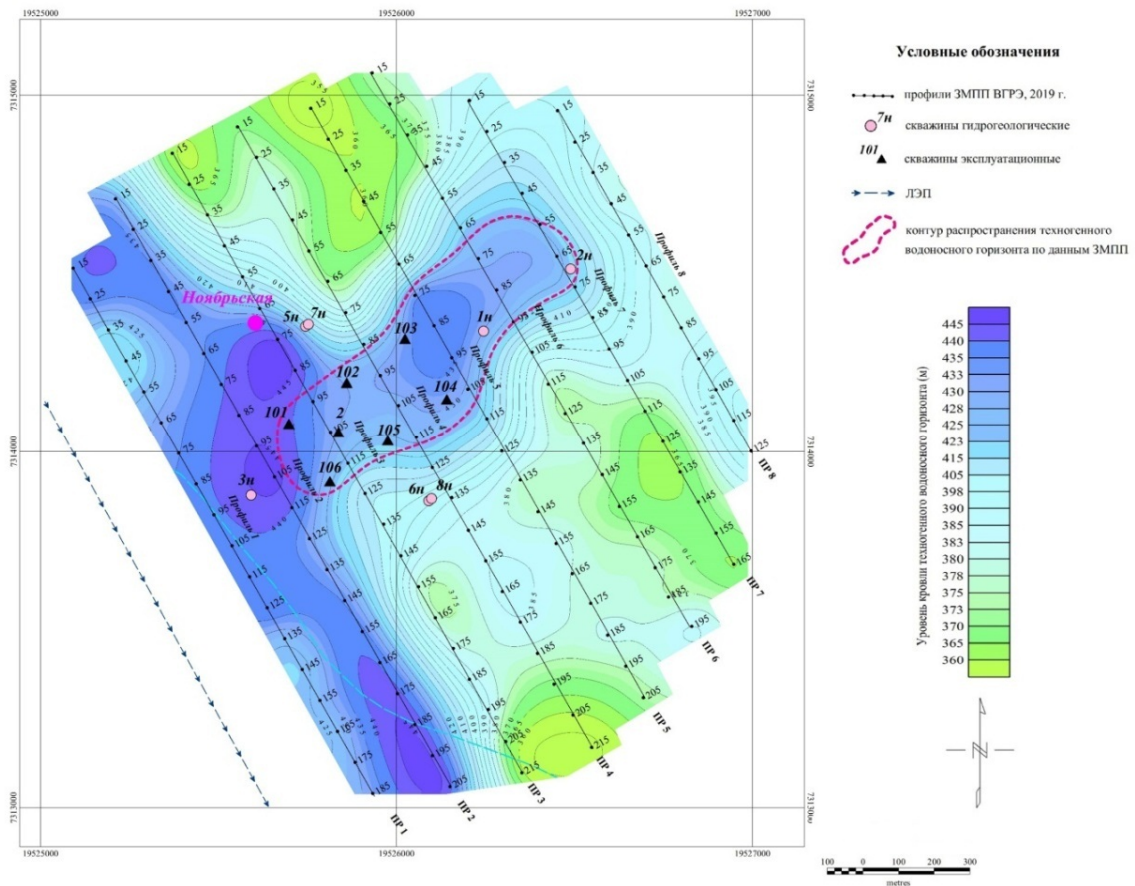


Рис. 5. Карта распределения уровня водоносного горизонта по данным электроразведки, июль 2019 г.

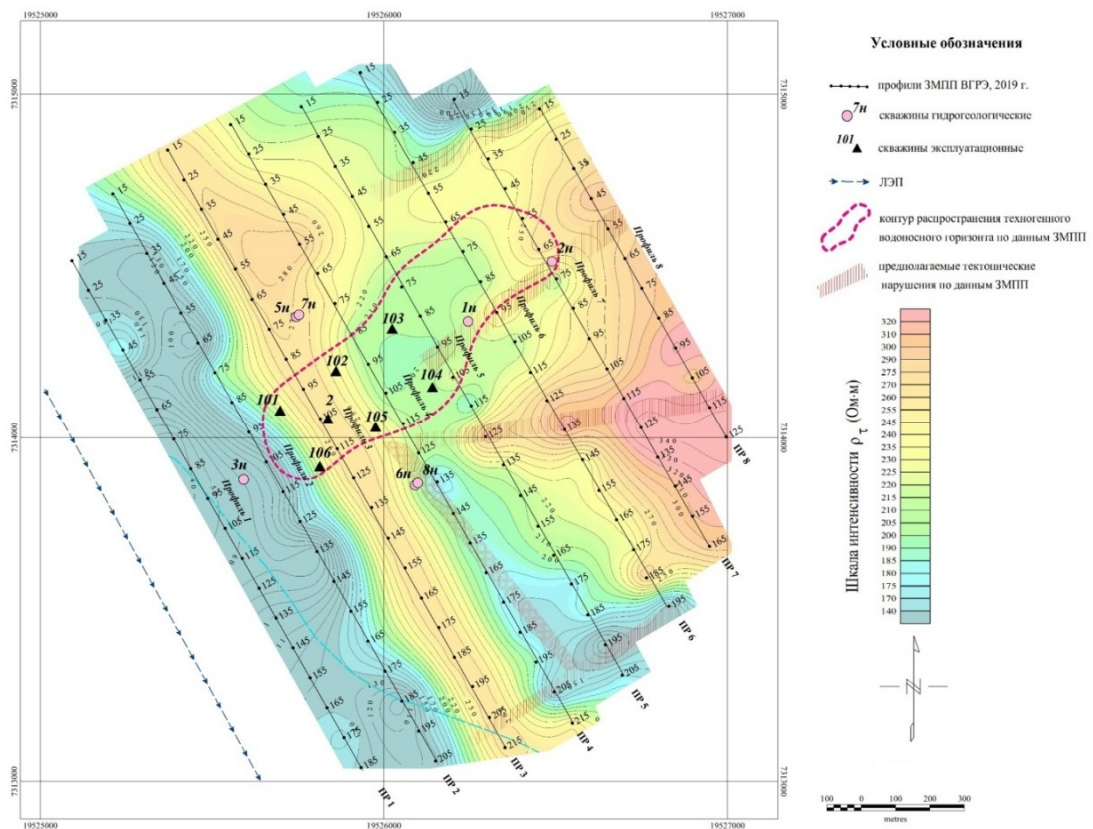


Рис. 6. План изом на эффективной глубине 250 м, июль 2019 г. (установка совмещенная, петля 100×100, шаг по профилю 100 м). Масштаб: 1:50 000.

3. Схематизация и разработка модели для участка «Ноябрьский»

Общая мощность ММП на участке «Ноябрьский» составляет около 450 м. Верхняя пачка мощностью 100–130 м представлена долеритовым траппом. Ниже залегает пласт известняка мощностью 20–40 м, известняк трещиноватый. Ниже залегает толща ММП, представленных чередующимися песчаниками, известняками, доломитами, мергелями различной степени трещиноватости. Среди относительно слаботрещиноватых отложений встречаются интервалы повышенной трещиноватости и зоны дробления мощностью до 10 м, обладающие высокими фильтрационными свойствами (табл. 3).

При определении емкости рабочего пласта используется такой параметр, как недостаток насыщения, который определяется разницей между пористостью и влажностью пород в этом интервале. По данным геофизических исследований, в скважинах наиболее проницаемым является толща пород, расположенная на отметках 440–480 м абс. Средняя величина недостатка насыщения в интервале поглощающего пласта составляет 13.7%, по данным лабораторных анализов, без учета трещиноватости.

Мощность ММП между подошвой долеритового траппа и первым коллектором нижнеордовикского водоносного комплекса составляет порядка 200–250 м. Трещиновато-пористые ММП представим условной расчетной средой, состоящей из упорядоченного чередования трещин и пористых блоков. Трещины и поры в блоках содержат лёд. При отсутствии льда водопроницаемость трещиновато-пористой среды определяется проницаемостью трещин, а емкость – пористостью блоков. Далее считаем, что трещины заполнены льдом не полностью, т.е. существует некоторая начальная свободная трещиноватость, а значит – и начальный коэффициент фильтрации (K_o^1). Пористые блоки также считаем не полностью насыщенными льдом, $n_\delta = n'_\delta + W$, где W – льдистость, n'_δ – часть пористости, свободной ото льда. Мощность пористого блока – m_δ , раскрытие свободной ото льда трещины – 2δ (Дроздов, Готовцев, 1992; Дроздов, 2006, 2007). В соответствии с

вышеизложенными представлениями о строении ММП, при закачке рассолы будут продвигаться по открытой части трещин, быстро освобождая их ото льда за счет теплообмена и высокой минерализации ($K_o^1 \rightarrow K_o$), где K_o – полный коэффициент фильтрации породы, свободной ото льда. Учитывая, что объем льда в трещинах мал по сравнению с объемом льда в пористых блоках ($n_T \ll n_\delta$), потерями тепла на проработку трещин пренебрегаем. Далее происходят процессы прогрева блоков через трещины и диффузионно-конвективное проникновение рассолов в микропоры и микротрещины с образованием криогаллита (смеси кристаллов льда и гидрогаллита – $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), имеющего более низкую, чем в зоне ММП, температуру замерзания. Эти процессы приводят к таянию льда в пористых блоках и, как следствие, освобождению части порового объема из-за разности в плотностях льда и воды. Механизм воздействия рассола на ММП можно представить следующим образом. Под действием диффузии рассолы проникают из трещин в блоки. Продвигаясь по занятому льдом поровому пространству блоков, рассолы химически и физически взаимодействуют с кристаллами льда, смешиваясь с ними в определенной пропорции. Процесс смешения приводит к снижению точки замерзания ниже температуры ММП и оттаиванию пород. Минерализация рассолов месторождения примерно 200 г/л, температура ММП до глубины 500 м порядка -4°C (Курилко, 2004; Ершов и др., 2007).

Задача о возможности закачки дренажных рассолов в ММП сводится к определению пространственно-временных закономерностей формирования зоны оттаявших пород под действием закачки через трещины рассолов. Расчетная схема задачи теплообмена между трещиной и пористым блоком для начальных моментов времени (когда блок между трещинами полностью не оттаял) можно представить в виде следующей схемы. По трещине рассматривается конвективный перенос без учета продольной теплопроводности, отвод тепла из трещины в блок – за счет поперечной теплопроводности.

Таблица 3. Характеристика ММП пород участка «Ноябрьский»

Абс. отм. устья, м	Глубина отбора, м	Абс. отм., м	Влажность, %	Пористость, %	Трещиноватость, %	Стратиграфический индекс	Наименование пород
1	2	3	4	5	6	7	8
631.9	87.6	544.3	5.10	15.2		C ₂ ah	угл. алевролит
631.9	92.1	539.8	1.00	21.9			алевр. песчанистый
631.9	96.1	535.8	1.60	18.9			алевр. песчанистый
631.9	104.3	527.6	0.20	9.2	3.7	S ₁ bt	известняк
631.9	106.8	525.1	0.10	1.8	3.7		известняк
631.9	112.1	519.8	0.12	6.3	7.0		известняк
631.9	116.7	515.2	0.08	3.3	7.0		известняк
631.9	122.1	509.8	0.15	2.6	7.0		известняк
631.9	125.6	506.3	0.16	8	7.0	S ₁ bt	известняк
631.9	131.6	500.3	0.99	15.2	7.0		мергель
631.9	135.6	496.3	1.60	14.9	8.0	O ₂₋₃ kl	мергель
631.9	147.3	484.6	0.28	13.4	зона дробления		мергель
631.9	151.1	480.8	0.95	17.5	зона дробления		мергель
631.9	155.5	476.4	0.45	8.3	зона дробления		мергель
631.9	163.6	468.3	1.33	18.7	зона дробления		известняк
631.9	169.1	462.8	0.35	17.6	7.0	O ₂ st	известняк
631.9	171.4	460.5	1.15	12.4	6.0		известняк
631.9	175.8	456.1	0.10	12.6	6.0		известняк
631.9	182.0	449.9	0.19	15.8	6.0	O ₁ sh	известняк
631.9	188.8	443.1	0.60	12.5	6.0		известняк
631.9	194.2	437.7	2.74	22.8	6.0		известняк
631.9	198.4	433.5	0.99	10.2	6.0		известняк
631.9	204.2	427.7	0.98	16.9	6.0		известняк
631.9	208.0	423.9	1.40	17.2	6.0		долом. известняк
631.9	213.0	418.9	0.51	12.6	6.0		долом. известняк
631.9	218.0	413.9	0.70	17.8	6.0		известняк
631.9	222.0	409.9	0.36	10.8	6.0		долом. известняк
631.9	226.0	405.9	2.80	19.4	6.0	известняк	
631.9	232.7	399.2	1.38	12.8	6.0	O ₁ sh	глин. известняк
631.9	237.2	394.7	1.25	15.3	6.0		глин. известняк
631.9	244.3	387.6	2.19	15.7	6.0		мергель
631.9	249.0	382.9	2.11	15.4	6.0	O ₁ ol	мергель
631.9	252.7	379.2	1.01	12.4	6.0		мергель
631.9	259.0	372.9	0.72	13.3	6.0		мергель
631.9	263.4	368.5	2.17	15.4	6.0		мергель
631.9	267.0	364.9	0.37	12.2	6.0		глин. известняк

Механизм воздействия рассола на ММП можно представить следующим образом. Под действием диффузии рассолы проникают

из трещин в блоки. Продвигаясь по занятому льдом поровому пространству блоков, рассолы химически и физически взаимодействуют с кристаллами льда, смешиваясь с

ними в определенной пропорции (Гидрогеологические исследования, 1976, 1993; Порожняк, Рассудов, 1993).

В соответствии с зафиксированной температурой пород на участке, минерализация рассола, при которой раствор будет находиться в жидком состоянии, должна быть больше 70 г/л. По формуле смешения находим, что 1 м³ рассола с минерализацией 200 г/л при T = -4°C может растопить 4 м³ льда. Если же учесть, что относительно теплые рассолы, особенно при закачке их в летнее время из отстойника, прогреют пласт до температуры порядка -2°C, то 1 м³ рассола с минерализацией 200 г/л растопит около 10 м³ льда.

4. Оценка емкости участка закачки дренажных рассолов «Ноябрьский» по результатам закачки в режиме опытно-промышленных работ

Для оценки потенциальной емкости участка закачки «Ноябрьский» целесообразно ориентироваться на установленный на начальном этапе закачки характер развития репрессивной воронки в плане и разрезе. При в целом изометричной форме распространения рассолов выделяется несколько преобладающая их миграция в направлении на юго-запад.

Аппроксимируя указанный характер развития кривой репрессии на весь участок закачки в предварительных границах горного отвода с условием достижения юго-западным флангом репрессивной кривой на отметке подошвы рабочего пласта границы горного отвода, можно принять емкость рабочего пласта в границах репрессивной воронки в качестве прогнозируемой емкости участка «Ноябрьский».

При проведении поисковых работ на участке закачки Ноябрьский был определен поглощающий пласт на глубинах 173–197 м, соответствующий абсолютным отметкам от +458,9 до +434,9 м абс. При бурении закачных скважин во время опытно-промышленных работ, на участке закачки также было проведено определение интервалов возможных коллекторов. В среднем, рабочий интервал многолетнемерзлых пород

расположен на отметках от 440 м абс. до 480 м абс.

Разработка гидрогеологической модели выполнялась в программе MODFLOW, входящей в лицензионный пакет GMS. Программа MODFLOW требует представления непрерывной области фильтрации в виде сеточной области. В плане область фильтрации должна быть разбита на прямоугольные блоки. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, причем слои могут быть горизонтальными или ограничиваться некоторой произвольной поверхностью, отражающей особенности строения водоносного горизонта.

Для построения модели размеры области приняты такими, чтобы на весь прогнозный период моделирования внешние границы не оказывали существенного влияния на реакцию модели при возмущении на участке закачки рассолов.

Радиус распространения рассолов в толще мерзлых пород также можно определить, исходя из решения задачи о радиальной фильтрации в сухой грунт:

$$R^2 = \sqrt{\frac{kQ}{\pi \mu} 2t}$$

где K – коэффициент фильтрации;

Q – дебит закачки, соответствующий общим водопритокам в карьер;

R – радиус влияния (растекания);

t – время;

μ – гравитационная емкость пласта (коэффициент недостатка насыщения пород).

На рис. 8 дана прогнозная схема распространения дренажных вод в рабочем пласте при достижении ими границы горного отвода. При таком распространении рассолов в ММП емкость пласта с учетом недостатка насыщения 13,7% составит 6,36 млн. м³ (табл. 4).

Полученная оценка потенциальной емкости участка закачки позволяет рассчитывать на достаточность экологически безопасной его эксплуатации на весь период отработки месторождения «Айхал».

Так, при существующем расходе закачки дренажных рассолов, примерно 240 м³/сут емкости участка хватит на 72 года.

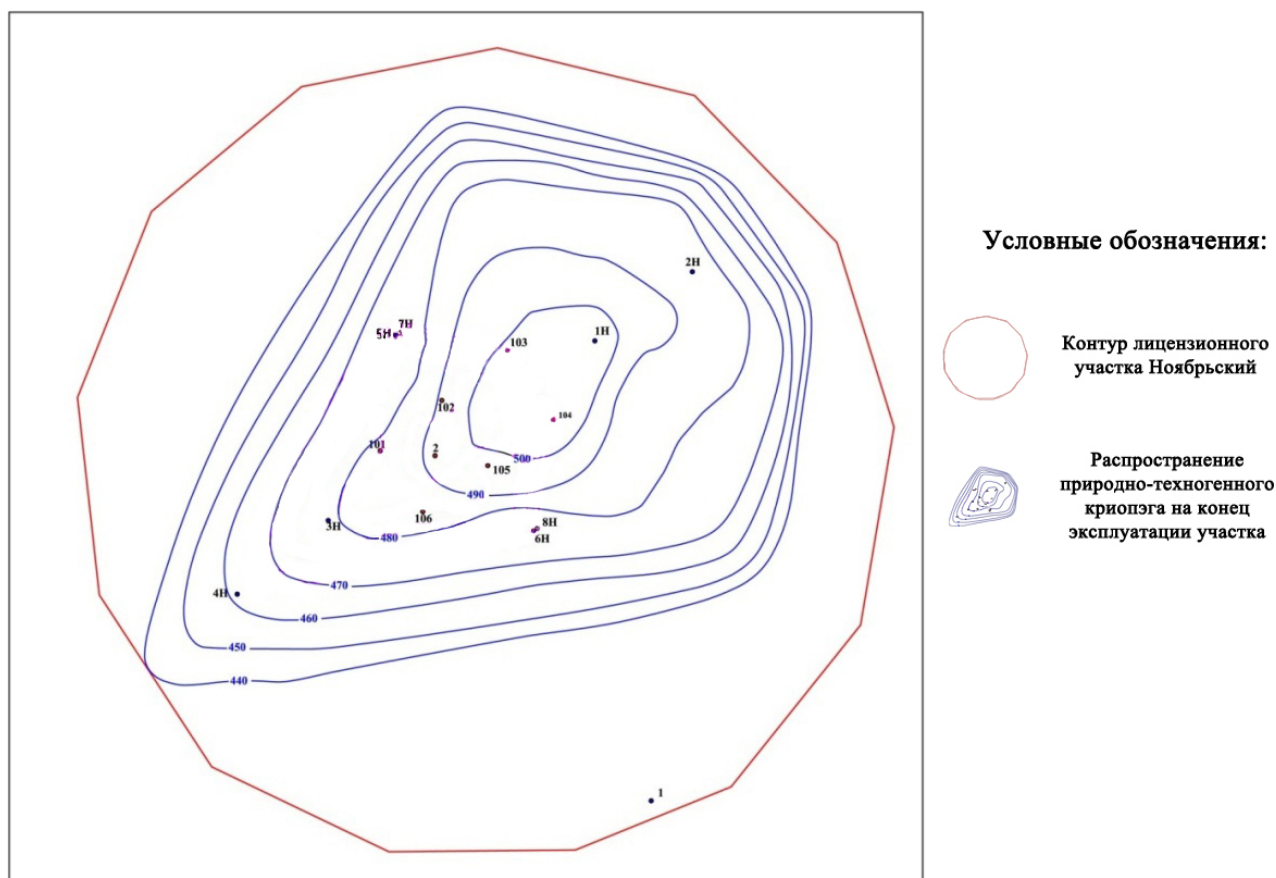


Рис. 8. Схема прогнозируемого положения уровня техногенного горизонта на расчетный срок эксплуатации участка закачки.

Таблица 4. Расчет потенциальной емкости участка закачки «Ноябрьский»

Интервал расчета емкости, м. абс.	Площадь распространения, м ² . Граница верхняя/нижняя	Объем между горизонталями, м ³	Емкость по недостатку насыщения, м ³
+440/+450	1692941/1470783	13818619	2167151
+450/+460	1470783/1223964	13473732	1845901
+460/+470	1223964/994208,9	11090863	1519448
+470/+480	994208.9/621090	8076494	1106480
	Сумма	46459708	6364980

При прогнозируемом в максимальном расходе притока дренажных рассолов 430 м³/сут (с учетом смешения с водами поверхностного стока рудника), емкости участка хватит на 40 лет.

Выводы

Наблюдаемые изменения пьезометрической поверхности, а также результаты наземной геофизики указывают на то, что природно-техногенный криопэг на участке «Но-

ябрьский» в настоящее время находится на начальной стадии формирования.

Особенности структурно-тектонического, литолого-фациального и геокриологического строения участка оказывают наибольшее влияние на растекание закачиваемых рассолов как в плане, так и в разрезе.

Схематизация участка выполнена согласно общепринятым решениям, с учётом имеющейся информации о горно-геологических и криогидрогеологических условиях участка. В качестве основы для фи-

зико-математического и гидродинамического моделирования приняты стандартные дифференциальные уравнения и формулы динамики подземных вод. Что позволяет утверждать о достоверности полученных параметров и прогнозной ёмкости участка.

Проведённые исследования и выполненные расчёты позволяют сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» на участке «Ноябрьский» позволило уменьшить степень влияния горных и добычных работ (и связанного с ними водопонижения) как на геологическую среду изучаемого района, локализовав её на планомерно ограниченном, сравнительно небольшом по площади участке, на котором непосредственно осуществляется закачка, так и на окружающую среду, посредством исключения попадания в поверхностные воды дренажных рассолов.

Наблюдаемый положительный опыт эксплуатации, подтвержденный результатами исследований, позволяют утверждать о целесообразности дальнейшего тиражирования данного метода.

Библиографический список

- Алексеев С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Алексеева Л.П.* Первый опыт захоронения солевых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетнемерзлые породы // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 2. С. 61–65.
- Алексеев С.В., Гунин В.И., Дроздов А.В., Алексеева Л.П.* Особенности миграции высокоминерализованных стоков карьера трубки Удачная в многолетнемерзлых породах при их подземном захоронении // Тез. докл. III конференции геокриологов России. М.: МГУ, 2005. С. 5–12.
- Атрощенко Ф.Г.* Исследование процессов, контролирующей миграцию минерализованных вод при их захоронении в многолетнемерзлые породы // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия. Томск: ТПУ, 2000. С. 579–583.
- Балобаев В.Т.* Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 192 с.
- Балобаев В.Т., Девяткин В.Н.* Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии // Теплофизические исследования криолитозоны Сибири. Новосибирск: Наука, 1983. С. 22–34.
- Вожов В.И., Сурнин А.И.* Закономерности распространения многолетнемерзлых пород на Сибирской платформе // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1982. С. 5–18.
- Бодунов Е.И., Белецкий В.Л., Фрадкин Г.С.* Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антиклизы. Якутск: Изд. ЯФ СО АН СССР, 1986. 176 с.
- Боревская А.В., Гаврилов И.Т., Гольдберг В.М., Кривошеев В.П.* Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты: Метод. указания. М.: Недра, 1976. 312 с.
- Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / Под ред. В.А. Грабовникова. М.: Недра, 1993. 335 с.
- Гидрогеология СССР. Том XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
- Дроздов А.В.* Структурно-тектонические критерии оценки приемистости массивов для захоронения сточных вод алмазодобывающих предприятий в криолитозоне Западной Якутии // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 2. С. 26–45.
- Дроздов А.В.* Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2007. 296 с.
- Дроздов А.В., Готовцев С.П.* Особенности миграции рассолов в криолитозоне при их подземном захоронении // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН. 1992. С. 31–48.
- Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В.* Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
- Ершов Э.Д., Комаров И.А., Чувилин Е.М.* Прогноз процессов взаимодействия жидких техногенных рассолов, захороняемых в массиве мерзлых пород // Геоэкология. 1997. № 2. С. 19–29.
- Климовский И.В., Готовцев С.П.* Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
- Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В.* Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 576 с.
- Курилко А.С.* Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. Якутск.: Изд-во СО РАН, 2004. 154 с.
- Лобанов В.В., Дроздов А.В., Молчанов Ю.Д.* Прогнозирование геологических структур для захоронения агрессивных рассолов в многолетнемерзлых породах // Горный журн. 1995. № 10. С. 21–24.

Шепелев В.В., Толстихин О.Н., Пигузова В.М. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.

Порохняк А.М., Рассудов А.В. Захоронение жидких отходов в криолитозоне. М.: Недра, 1993. 112 с.

Сердюков Л.И., Артемьева Е.Л., Строгова Е.В., Зувев В.М., Солопанов А.Т. О природе по-

глошающей способности многолетнемерзлых пород при захоронении в них дренажных рассолов // Горный журн. 1996. № 7. С. 5–12.

Яковлев Е.А., Сторчик Н.П. Захоронение стоков в глубокие водоносные горизонты // Разведка и охрана недр. 1982. № 6. С. 46–49.

Using Permafrost for Pumping Drainage Water from Primary Diamond Deposits on the Example of the Noyabrskiy Site (Aykhal Mine)

A.M. Yannikov^a, S.A. Yannikova^a, M.Yu. Ovchinnikova^{a, b}, A.Yu. Korepanov^a
^a«Yakutniproalmaz», 39 Lenina Str., Mirnyy, Republic of Sakha (Yakutia) 678174, Russian Federation. E-mail: yannikov90@mail.ru

^bVoronezh State University, 1 Universitetskaya Sqr., Voronezh 394018, Russian Federation.

Thick permafrost strata in the territory of the Yakutsk diamondiferous province make it possible to take into account and use this natural favorable factor in environmental protection. For the environmentally safe exploitation of the fields, ALROSA is injecting drainage water into the existing and developed in the permafrost strata reservoirs. Consequently, an important research problem is assessment of the resulting impact of injection on the state of the geological environment by designing a method for predicting the position of the technogenic horizon for the estimated life of the field. The parameters of the planned distribution of the injected drainage water were obtained by the geophysical methods and study of the regime of the piezometric surface. The capacity of the drainage brine injection site was estimated based on the injection results in the mode of pilot operations. The conducted studies and calculations allow us concluding that the use of the method of drainage water pumping into permafrost from the Aykhal mine on the Noyabrskiy site made it possible to reduce the impact of mining operations on the geological environment and surroundings, eliminating the possibility of brines to contaminate the surface water.

Key words: *permafrost; brines; drainage waters; Aykhal.*

References

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 of the saline drainage waters of the Udachnaya pipe open pit in the permafrost]. *Kriosfera Zemli*. VI(2): 61–65. (in Russian)

Alekseev S.V., Gunin V.I., Drozdov A.V., Alekseeva L.P. 2005. Osobennosti migratsii vysokomine-ralizovannykh stokov karyera trubki Udachnaya v mnogoletnemerzlykh porodakh pri ikh podzemnom zakhoronении [Peculiarities of migration of highly mineralized waste waters from the Udachnaya pipe open pit in permafrost rocks during their underground burial]. *In: Tez. dokl. III konferentsii geokriologov Rossii*. Moskva, MGU, pp. 5–12. (in Russian)

Atroshchenko F.G. 2000. Issledovanie protsessov, kontroliruyushchikh migratsiyu mineralizovannykh vod pri ikh zakhoronении v mnogoletnemerzlye porody [Investigation of the processes that control

the migration of saline waters during their burial in permafrost]. *In: Fundamentalnye problemy vody i vodnykh resursov na rubezhe tretyego tysyacheletiya*. Tomsk, TPU, pp. 579–583. (in Russian)

Balobaev V.T. 1991. Geotermiya merzloy zony litosfery severa Azii [Geothermy of the permafrost zone of the lithosphere in northern Asia]. *Novosibirsk, Nauka*, p. 192. (in Russian)

Balobaev V.T., Devyatkin V.N. 1983. Merzlotno-geotermicheskie usloviya Zapadnoy Yakutii [Permafrost-geothermal conditions of Western Yakutia]. *In: Teplofizicheskie issledovaniya kriolitozony Sibiri*. Novosibirsk, Nauka, pp. 22–34. (in Russian)

Vozhov V.I., Surnin A.I. 1982. Zakonomernosti rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod na Sibirskoy platforme [Regularities of the distribution of permafrost rocks on the Siberian Platform]. *In: Gidrogeologiya neftegazonosnykh oblastei Sibirskoy platformy*. Novosibirsk, SNIIGGiMS, pp. 5–18. (in Russian)

Bodunov E.I., Beletskiy V.L., Fradkin G.S. 1986. *Geologiya, gidrogeologiya i geokhimiya nefti i gaza*

yuzhnogo sklona Anabarskoy antiklizi [Geology, hydrogeology and geochemistry of oil and gas on the southern slope of the Anabar anticline]. Yakutsk, YaF SO AN SSSR, p. 176. (in Russian)

Borevskaya A.V., Gavrilov I.T., Goldberg V.M. Krivosheev V.P. 1976. Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya zakhoroneniya promyshlennykh stochnykh vod v glubokie vodonosnye gorizonty: Metod. Ukazaniya [Hydrogeological studies for the disposal of industrial wastewater in deep aquifers: Methodical Guidelines]. Moskva, Nedra, p. 312. (in Russian)

Gidrogeologicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya podzemnogo zakhoroneniya promyshlennykh stokov [Hydrogeological studies to prove the underground disposal of industrial wastewater]. Ed. V.A. Grabovnikov. Moskva, Nedra, 1993, p. 335. (in Russian)

Gidrogeologiya SSSR. Tom XX. Yakutskaya ASSR [Hydrogeology of the USSR. Volume XX. Yakutskaya ASSR]. Moskva, Nedra, 1970, p. 384. (in Russian)

Drozdov A.V. 2006. Strukturno-tektonicheskie kriterii otsenki priemistosti massivov dlya zakhoroneniya stochnykh vodalmazodobyvayushchikh predpriyatii v kriolitozone Zapadnoy Yakutii [Structural-tectonic criteria for assessing the injectivity of massifs for disposal of wastewater from diamond mining enterprises in the cryolithozone of Western Yakutia]. Kriosfera Zemli, X(2): 26–45. (in Russian)

Drozdov A.V. 2007. Zakhoronenie drenazhnykh rassolov v mnogoletnemerzlykh porodakh (na primere kriolitozony Sibirskoy platformy) [Disposal of drainage brines in permafrost (by the example of the permafrost zone of the Siberian platform)]. Irkutsk, IGTU, p. 296. (in Russian)

Drozdov A.V., Gotovtsev S.P. 1992. Osobennosti migratsii rassolov v kriolitozone pri ikh podzemnom zakhoroneni [Features of the migration of brines in the cryolithozone during their underground injection]. In: Formirovaniye podzemnykh vod kriolitozony. Yakutsk, IMZ SO RAN, pp. 31–48. (in Russian)

Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. 2008. Kriogidrogeologiya almaznykh mestorozhdeniy Zapadnoy Yakutii [Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia]. Irkutsk, IGTU, p. 507. (in Russian)

Ershov E.D., Komarov I.A., Chuvilin E.M. 1997. Prognoz protsessov vzaimodeistviya zhidkikh tekhnogenykh rassolov, zakhoronyaemykh v massive merzlykh porod [Prediction of the interaction processes of liquid technogenic brines buried in the permafrost massif]. Geoekologiya. 2:19–29. (in Russian)

Klimovskiy I.V., Gotovtsev S.P. 1994. Kriolitozona Yakutskoy alamazonosnoy provintsii [Cryolithozone of the Yakut diamondiferous province]. Novosibirsk, Nauka, p. 167. (in Russian)

Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. 2015. Gorno-geologicheskie osobennosti korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutii [Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia]. LAP LAMBERT Academic Publishing, p. 576. (in Russian)

Kurilko A.S. 2004. Eksperimentalnye issledovaniya vliyaniya tsiklov zamorazhivaniya-ottaivaniya na fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod [Experimental studies of the influence of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of rocks]. Yakutsk, SO RAN, 2004, p. 154. (in Russian)

Lobanov V.V., Drozdov A.V., Molchanov Yu.D. 1995. Prognozirovaniye geologicheskikh struktur dlya zakhoroneniya agressivnykh rassolov v mnogoletnemerzlykh porodakh [Prediction of geological structures for disposal of aggressive brines in permafrost]. Gornyy zhurnal, 10:21–24. (in Russian)

Shepelev V.V., Tolstikhin O.N., Piguzova V.M. 1984. Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya Vostochnoy Sibiri [Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk, Nauka, p. 191. (in Russian)

Porokhnyak A.M., Rassudov A.V. 1993. Zakhoronenie zhidkikh otkhodov v kriolitozone [Burial of liquid waste in the cryolithozone]. Moskva, Nedra, p. 112. (in Russian)

Serdyukov L.I., Artyemyeva E.L., Strogova E.V., Zuev V.M., Soloponov A.T. 1996. O prirode pogloshchayushchey sposobnosti mnogoletnemerzlykh porod pri zakhoroneni v nikh drenazhnykh rassolov [On the nature of the absorbing capacity of permafrost during the burial of drainage brines]. Gornyy zhurnal. 7:5–12. (in Russian)

Yakovlev E.A., Storchik N.P. 1982. Zakhoroneniye stokov v glubokie vodonosnye gorizonty [Disposal of wastewaters in deep aquifers]. Razvedka i okhrana nedr. 6:46–49. (in Russian)