



Научная статья

УДК 556.334.5

<https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>

Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал»

А.М. Янников^{a*}, А.С. Стручкова^b, А.Ю. Корепанов^c^{a-c}Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Россия

Резюме. Участок «Ноябрьский» используется для закачки дренажных высокоминерализованных вод, образующихся при разработке кимберлитовой трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия), Россия). Производимая с 2013 г. в скважины участка закачка вод привела к формированию локализованного внутримерзлотного техногенного водоносного горизонта. Учитывая фильтрационные параметры формируемых коллекторов толщи многолетнемерзлых пород, а также подтвержденную полезную емкость участка, его эксплуатацию планируют вести как минимум до 2044 г. Несмотря на сравнительно небольшие объемы закачки (до 430 м³/сут.), прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима техногенного горизонта является интересной задачей, обладающей большой практической значимостью для обеспечения экологической и промышленной безопасности. Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики гидродинамического режима в пределах участка «Ноябрьский» были осуществлены методами моделирования в программном обеспечении Modflow. В настоящее время сформированная линза рассолов характеризуется неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло- и массопереноса при использовании толщи многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод. На основе результатов прогнозного моделирования можно сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» в толще многолетнемерзлых пород на участке «Ноябрьский» позволяет уменьшить степень влияния горных и добычных работ как на геологическую среду изучаемого района посредством локализации ее 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 до 2044 г.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, рассолы, техногенный водоносный горизонт, дренажные воды, Айхал

Для цитирования: Янников А.М., Стручкова А.С., Корепанов А.Ю. Моделирование гидродинамического режима техногенного водоносного горизонта в пределах участка «Ноябрьский» рудника «Айхал» // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 1. С. 20–35. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>.

Original article

Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrsky site of the Aikhal mine

Aleksey M. Yannikov^{a*}, Agita S. Struchkova^b, Aleksey Yu. Korepanov^c^{a-c}"Yakutnioproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA", Mirny, Russia

Abstract. The Noyabrsky site is used for the injection of highly mineralized drainage waters formed during the development of the Aikhal kimberlite pipe (Republic of Sakha (Yakutia), Russia). The water injected into the wells of the site since 2013 has formed a localized intrapermafrost technogenic aquifer. Taking into account the porosity parameters of the formed permafrost reservoirs, as well as the confirmed useful capacity of the site, its operation is planned to continue until 2044 at the very least. Despite relatively small injection volumes (up to 430 m³/day), forecasting dynamical changes in the hydrodynamic regime of the technogenic water horizon is a challenging task, which is of significant practical importance for the provision of environmental and industrial safety. The assessment of the anthropogenic impact, as well as the subsequent forecasting of the hydrodynamic regime dynamics within the Noyabrsky site, were carried out by modeling methods in the Modflow software. The brine lens formed today is characterized by uneven porosity parameters, which is due to the peculiarities of heat and mass transfer when using permafrost for drainage water injection. Based on the results of predictive modeling a conclusion can be derived that the use of the method of Aikhal mine drainage water injection into the permafrost strata at the Noyabrsky site allows to reduce the influence degree of mining and production operations on the geological



environment of the studied area through its localization on an intentionally limited, relatively small area, where injection is carried out, as well as on the environment, by preventing drainage brines from entering surface waters until 2044.

Keywords: permafrost, brines, technogenic aquifer, drainage waters, Aikhal

For citation: Yannikov A.M., Struchkova A.S., Korepanov A.Yu. Modeling hydrodynamic regime of the technogenic aquifer within the Noyabrsky site of the Aikhal mine. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie* = *Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(1):20-35. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-1-20-35>.

Введение

В последние два десятилетия методы математического моделирования стали одним из основных инструментов изучения гидрогеологических процессов и начали повсеместно использоваться при решении научных и практических задач как в России, так и за рубежом [1]. Современные программные продукты дают возможность создавать многослойные гидрогеологические модели, имитирующие трехмерную пространственную миграцию и фильтрацию вод с точностью, позволяющей делать прогнозы о дальнейших изменениях, происходящих в результате техногенной нагрузки, и последующем взаимодействии с геологической средой.

Трубка «Айхал» (Республика Саха (Якутия), Россия) приурочена к Алаakit-Мархинскому кимберлитовому полю. Отрабатывалась открытым способом с 1961 по 1997 гг. до глубины 325–380 м (абсолютная отметка +195...+235 м) при частичном вскрытии нижнеордовикского водоносного комплекса [2]. В настоящее время разрабатывается подземным способом, проектом предусмотрена разработка до глубины 900 м от дневной поверхности.

Коренные месторождения алмазов, отрабатываемые АК «АЛРОСА» в рамках Якутской алмазоносной провинции, имеют повсеместное обводнение различной интенсивности подмерзлотными и межмерзлотными росолами [3]. Оработка месторождений связана с образованием дренажных вод, которые оказывают значительное воздействие на природную и геологическую среды. Для экологически безопасной эксплуатации на руднике «Айхал» производится закачка дренажных вод в существующие и формируемые емкости коллекторов в толщах многолетнемерзлых пород. Закачка дренажных вод приводит к формированию техногенного водоносного горизонта, локализованного в пределах участка закачки.

Опыт использования многолетнемерзлых пород для закачки указывает на создание до-

статочно сложных природно-техногенных систем [4, 5], изучение которых является важной прикладной задачей для заблаговременного выявления потенциальных рисков различного характера и формирования необходимого инструментария технологий и технических решений, направленных на минимизацию или локализацию техногенного воздействия вплоть до полного исключения негативных последствий.

Целью проводимых исследований являлось создание цифровой модели участка закачки дренажных вод «Ноябрьский» рудника «Айхал» с точностью, позволяющей прогнозировать изменения криогидрогеологических условий, а также оценивать степень техногенной нагрузки на геологическую среду и экологические риски.

Материалы и методы исследования

Участок «Ноябрьский» находится в бассейне реки Сохсоллоох, в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля, расположенного в юго-западной части Далдыно-Алаakitского алмазоносного района [6]. В геоморфологическом отношении район участка представляет собой водораздельную часть структурно-денудационного плато рек Сохсоллоох и Ойюр-Юреге.

В геолого-стратиграфическом разрезе изучаемой толщи участка принимают участие палеозойские осадочные образования: карбонатно-терригенные отложения онхойюряхской свиты (кембрийская система); олдондинской, сохсоллоохской, сытыканской и кылахской свит (ордовикская система); байтахской и башенной свит (силурийской системы); айхальской свиты (каменноугольной системы). Осадочные породы перекрыты трапповым полем (мощностью 76–93 м) позднепалеозойско-раннемезозойского периода (P_2-T_1), образованным внедрением магмы основного состава: долеритами, слагающими крупные пластовые тела интрузий и дайки, а также туфами (рис. 1, 2) [7].

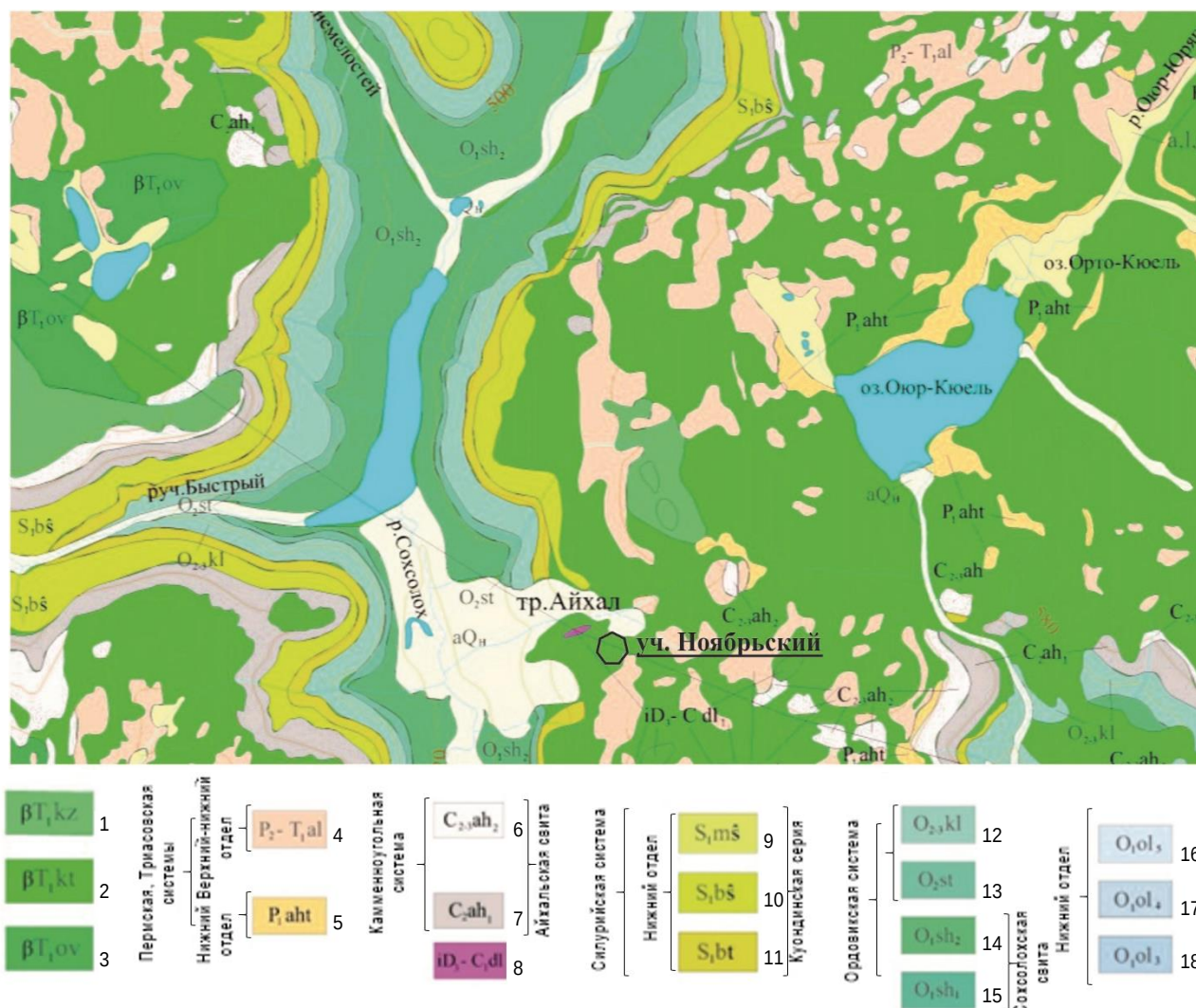


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Алаkit-Мархинского кимберлитового поля (по материалам Ботубунинской и Мирнинской геолого-разведочных экспедиций):

- 1 – кузьмовский комплекс феррогаббро-долеритовый; 2 – катангский комплекс долеритовый; 3 – оленек-велинггинский комплекс габбро-долеритов и такситовых долеритов; 4 – алаkitская свита: туфы основного состава, ксенотуфы, туффиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, потоки базальтов, песчаники, прослои алевролитов, аргиллитов, линзы углей (0–120 м); 5 – ахтарандинская свита: песчаники, прослои алевролитов, аргиллитов, углистых сланцев, линзы углей, гравелитов, конгломератов (30–75 м); 6 – айхальская свита, верхняя подсвита: песчаники, алевролиты, прослои аргиллитов, углистых алевролитов и сланцев, линзы углей, конгломератов (10–60 м); 7 – айхальская свита, нижняя подсвита: песчаники, алевролиты, углистые алевролиты и аргиллиты, прослои углисто-глинистых сланцев, углей, линзы конгломератов (30–50 м); 8 – далдыно-алаkitский комплекс кимберлитовый; 9 – машковская свита: органогенные и органогенно-детритовые известняки, прослои глинистых и алевритистых известняков (70–90 м); 10 – башенная свита: криптозернистые известняки, прослои мергелей, органогенно-обломочных и глинистых известняков (40–60 м); 11 – байтахская свита: зеленоцветные мергели, прослои аргиллитов, глинистых известняков, линзы плоскогалечных конгломератов (4–36 м); 12 – кылахская свита: пестроцветные мергели, алевритистые и глинистые доломиты, прослои органогенно-детритовых и глинистых известняков (27–42 м); 13 – сытыканская свита: известняки, песчанистые известняки, прослои кварцевых песчаников, мергелей, доломитов, линзы гравелитов (4–20 м); 14 – сохолохская свита, верхняя пачка: доломиты, известковистые песчаники, прослои и линзы строматолитовых, оолитовых и органогенно-обломочных известняков, мергелей, плоскогалечных конгломератов (35–50 м); 15 – сохолохская свита, нижняя пачка: доломиты глауконитовые, оолитовые и органогенно-обломочные прослои известняков, известковистых песчаников, мергелей, плоскогалечных конгломератов и осадочных брекчий (20–30 м); 16–18 – олдодинская свита: 16 – пятая пачка: доломиты, алевролиты, песчаники, мергели с гипсом, прослои известняков, водорослевых доломитов (40–60 м), 17 – четвертая пачка: доломиты, прослои водорослевых доломитов, плоскогалечных конгломератов, известняков с гипсом (40–50 м), 18 – третья пачка: доломиты, мергели с гипсом, прослои оолитовых строматолитовых доломитов, известняков (35–45 м)



**Fig. 1. A fragment of the geological map of the Alakit-Markha kimberlite field
(based on the materials of the Botuoba and Mirny geological exploration survey):**

1 – Kuzmovsky ferrogabbro-dolerite complex; 2 – Katanga dolerite complex; 3 – Olenek-Velingna complex of gabbro-dolerites and taxite dolerites; 4 – Alakit formation: basic tuffs, xenotuffs, tuffites, tuff sandstones, tuff siltstones, basalt flows, sandstones, interbedded siltstones and argillites, coal lenses (0–120 m); 5 – Akhtaranda formation: sandstones, interbedded siltstones and argillites, carbonaceous shales, lenses of coals, gravelstones, conglomerates (30–75 m); 6 – Aikhal formation, Upper subformation: sandstones, siltstones, embedded argillites, carbonaceous siltstones and shales, lenses of coals, conglomerates (10–60 m); 7 – Aikhal formation, Lower subformation: sandstones, siltstones, carbonaceous siltstones and argillites, embedded carbonaceous argillaceous shales, coals, lenses of conglomerates (30–50 m); 8 – Daldyn-Alakit kimberlite complex; 9 – Mashkovskaya formation: organogenic and organic-detrital limestones, embedded clayey and silty limestones (70–90 m); 10 – Tower formation: crypto-granular limestones, embedded marls, organogenic detrital and clayey limestones (40–60 m); 11 – Baitakh formation: green marls, embedded argillites, clayey limestones, lenses of flat pebble conglomerates (4–36 m); 12 – Kylakh formation: variegated marls, silty and clayey dolomites embedded organogenic–detrital and clayey limestones (27–42 m); 13 – Sytykan formation: limestones, sandy limestones, embedded quartz sandstones, marls, dolomites, lenses of gravelstones (4–20 m); 14 – Sokhsolokh formation, top bench: dolomites, calcareous sandstones, interlayers and lenses of stromatolitic, oolitic and organogenic-detrital limestones, marls, flat pebble conglomerates (35–50 m); 15 – Sokhsolokh formation, lower bench: glauconite dolomites, oolitic and organogenic-detrital interlayers of limestones, calcareous sandstones, marls, flat pebble conglomerates and sedimentary breccias (20–30 m); 16–18: Oldodinskaya formation: 16 – 5th bench: dolomites, siltstones, sandstones, marls and gypsum, embedded limestones and algal dolomites (40–60 m), 17 – 4th bench: dolomites, embedded algal dolomites, flat pebble conglomerates, limestones and gypsum (40–50 m), 18 – 3^d bench: dolomites, marls and gypsum, embedded oolitic stromatolitic dolomites, limestones (35–45 m)

Структурно-тектоническое строение участка изучено по результатам бурения гидрогеологических, структурных и поисково-разведочных скважин в сочетании с комплексом геофизических исследований скважин, наземными геофизическими исследованиями. На рассматриваемой территории широко развиты субширотные разломы, контролирующие кимберлитовый магматизм. В структурно-тектоническом отношении весь участок приурочен к зоне динамического воздействия Ноябрьского глубинного разлома, относящегося к группе чукукских разломов. В пределах участка сформирована система оперяющих разломов, имеющих подчиненное положение. Необходимо отметить, что данный разлом относится к кимберлитконтролирующим для таких трубок, как Заря, Надежда, Ноябрьская и Подтраповая. Из перечисленных кимберлитовых тел только трубка Заря имеет промышленные содержания алмазов, остальные характеризуются убогой алмазоносностью [8].

Подземные воды района исследований разделяются на над-, меж- и подмерзлотные. В районе месторождения надмерзлотные воды представлены водами сезонно-талого слоя, водами гидрогенных подрусловых и подозерных таликов. Подмерзлотные воды представлены четырьмя водоносными комплексами: верхне-, средне-, нижнекембрийским и верхнепротерозойским. Межмерзлот-

ные воды представлены нижнеордовикским межмерзлотным водоносным комплексом. Данный комплекс характеризуется спорадичностью распространения, наличием мерзлых пород выше и ниже обводненной части разреза, незначительным напором подземных вод и крайне низкой водообильностью отложений [7]. Кровлей комплекса служит мощная толща замороженных пород от нижнего ордовика до пермо-карбона, а подошвой – многолетнемерзлые породы верхнего кембрия. Воды комплекса вскрываются на отметках +260...+70 м. Подмерзлотный верхнекембрийский водоносный комплекс приурочен к отложениям мархинской и моркокинской свит и представлен переслаиванием мергелей, глинистых известняков, доломитов [8, 9]. Подземные горные выработки рудника «Айхал» вскрывают на полную мощность ордовикский межмерзлотный водоносный комплекс. При дальнейшей эксплуатации рудника будет вскрыт верхнекембрийский водоносный комплекс.

Согласно техническому проекту промышленной эксплуатации узла закачки дренажных вод рудника «Айхал» (ответственным исполнителем которого является А.М. Янников), на участке «Ноябрьский» было пробурено девятнадцать скважин, в том числе:

– шесть закачных скважин (№ 101, 102, 103, 104, 105, 106) глубиной по 230 м;

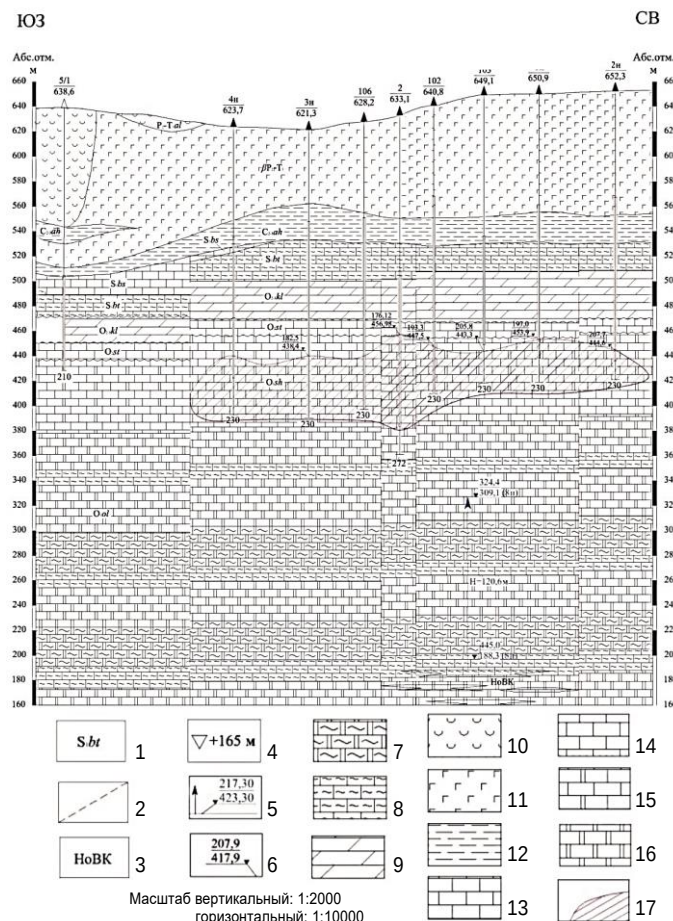


Рис. 2. Геолого-гидрогеологический разрез по участку «Ноябрьский»:

1 – геологический возраст; 2 – нарушение разрывного типа; 3 – межмерзлотный нижнеордовикский водоносный комплекс; 4 – кровля нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса; 5 – уровень подземных вод и его напор; 6 – уровень подземных вод на 21 декабря 2020 г.; 7 – доломит глинистый; 8 – известняк глинистый; 9 – мергель; 10 – туфы; 11 – долериты; 12 – алевролит песчанистый; 13 – известняк; 14 – известняк песчанистый; 15 – доломит известковистый; 16 – доломит; 17 – техногенный водоносный горизонт

Fig. 2. Geological and hydrogeological section of the Noyabrskiy site:

1 – geological age; 2 – discontinuous faulting; 3 – interpermafrost Lower Ordovician aquifer; 4 – roofing of the Lower Ordovician interpermafrost aquifer; 5 – level and pressure of groundwater; 6 – groundwater level as of December 21, 2020; 7 – clayey dolomite; 8 – clayey limestone; 9 – marl; 10 – tuffs; 11 – dolerites; 12 – sandy siltstone; 13 – limestone; 14 – sandy limestone; 15 – calcareous dolomite; 16 – dolomite; 17 – technogenic aquifer

– тринадцать наблюдательных скважин, из которых семь (№ 1н, 2н, 3н, 4н, 5н, 6н, 9н) имеют глубину по 230 м, четыре (№ 1, 2, 5/1, 5/2) – глубину по 250 м, одна (№ 7н) – глубину 400 м, и еще одна (№ 8н) – глубину 600 м (рис. 3).

Оценка техногенного влияния, а также последующее прогнозирование динамики изменения гидродинамического режима в пределах шахтного поля трубки Айхал и участка «Ноябрьский» были осуществлены методами моделирования в программном обеспечении Modflow. Уравнение фильтрации принято за основу при построении модели фильтрации в

районе участков закачки дренажных вод. Для однозначности решения оно дополняется начальными и граничными условиями, определяющими природные условия питания и разгрузки, а также технологические показатели системы закачки рассолов [10]. В качестве метода гидрогеологических исследований используется численное моделирование пространственных задач геофильтрации методом конечных разностей. В плане область фильтрации разбита на блоки. В разрезе вся толща пород разбивается на слои, отражающие особенности строения водоносного горизонта. Для построения модели размеры обла-

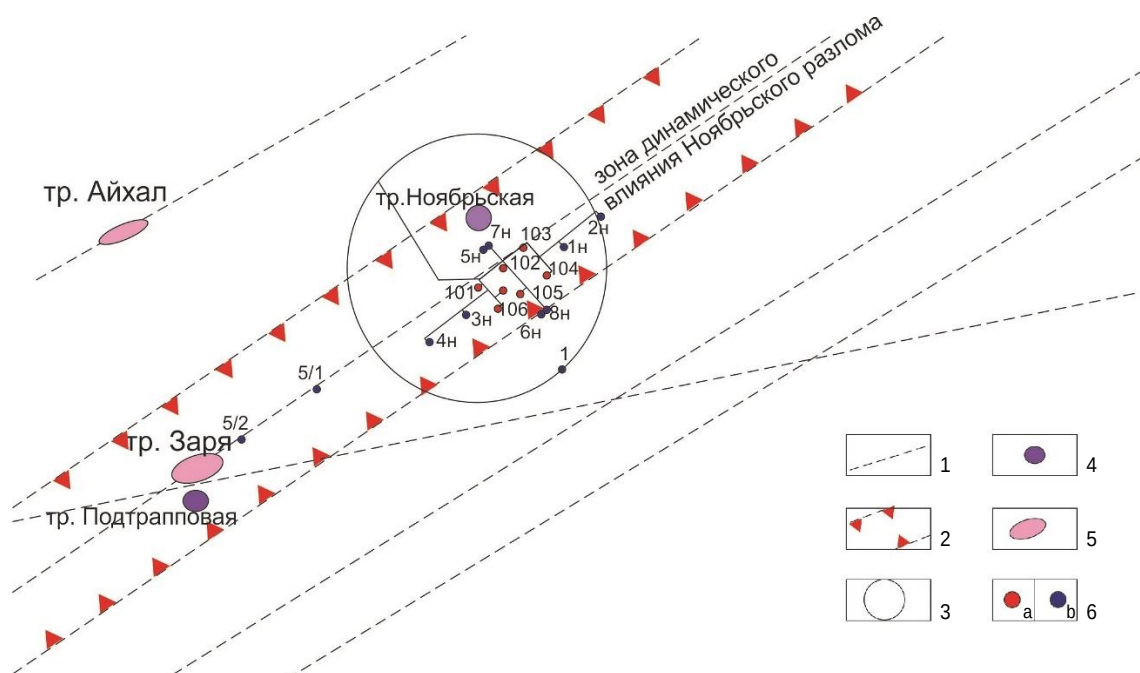


Рис. 3. Структурно-тектоническая схема участка закачки «Ноябрьский» (составлена по материалам Мирнинской геолого-разведочной экспедиции и Айхальского горно-обогатительного комбината):

1 – кимберлитконтролирующие разрывные нарушения; 2 – зона динамического воздействия Ноябрьского разлома; 3 – горный отвод участка «Ноябрьский»; 4 – непромышленные кимберлитовые трубки; 5 – промышленные кимберлитовые трубки; 6 – скважины: а – закачные, b – наблюдательные

Fig. 3. Structural and tectonic diagram of the Noyabrsk injection site (compiled on the materials of the Mirny geological exploration survey and the Aikhal mining and processing plant):

1 – kimberlite-controlling faults; 2 – zone of Noyabrsk fault dynamic impact; 3 – located claim of the Noyabrsk site; 4 – non-commercial kimberlite pipes; 5 – production kimberlite pipes; 6 – wells: a – injection wells, b – observation wells

сти приняты такими, чтобы на весь прогнозный период моделирования внешние границы не оказывали существенного влияния на реакцию модели при возмущении на участках закачки рассолов. Область моделирования принята размером $3 \times 3 \text{ км}^2$. В соответствии с методикой моделирования область разбита в плане на квадратные блоки размером $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ м}$. Число блоков в одном слое составляет $300 \cdot 300 = 90000$. В соответствии с зональностью фильтрационных свойств многолетнемерзлых пород в разрезе и необходимостью учета нижнеордовикского межмерзлотного водоносного комплекса толща пород на модели представлена тремя слоями:

- первый слой (верхний) отражает на модели интервал многолетнемерзлых пород, приуроченный к породам трапповой формации;
- второй слой – интервал многолетнемерзлых пород в абсолютных отметках +400...+200 м;
- третий слой – комплекс пород в интервале +200...+120 м абс., к которым приурочен нижнеордовикский водоносный комплекс.

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 свойства. Так как в данном случае высока степень неопределенности значений водопроводящих и емкостных свойств пород, целью решения обратной задачи является подбор расчетных значений фильтрационных (коэффициентов фильтрации) и емкостных (недостаток насыщения и упругая водоотдача) параметров водоносных горизонтов так, чтобы заданным расходом закачки рассолов модельное пространственно-временное распределение уровней с приемлемой точностью согласовывалось с фактическим распределением [11–13]. Идентификация фильтрационных параметров для таких условий представляет собой сложную задачу как в теоретическом плане, так и с точки зрения современных технических возможностей (в настоящее время



нет программного обеспечения для моделирования задач подобного класса). В связи с этим при решении обратной задачи использовался общий подход к решению задач с переменными параметрами – метод последовательной смены квазистационарных состояний совместно с современными мерзлотно-гидрогеологическими представлениями о строении толщи многолетнемерзлых пород на участках закачки рассолов месторождений АК «АЛРОСА». В соответствии с представлениями о замкнутости центральной (наиболее проницаемой) части участка закачки первоначально выделены зоны коэффициентов фильтрации, максимальные значения которых расположены в центральной части с постепенным уменьшением к периферии. Конфигурация зон для слоев, отражающих многолетнемерзлые породы, принимались одинаковой, соответствующей тектоническим условиям. Для третьего слоя (нижнеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс) коэффициенты фильтрации были приняты исходя из имеющихся данных о водопроводимости пласта и принятой на модели мощности. Дебит закачки принят по данным об объемах закачки рассолов в 2014–2022 гг. Оценка точности решения задачи выполнялась сравнением модельных значений уровней H_m с фактическими значениями H_f на конец 2021 г. по наблюдательным скважинам, расположенным на участке закачки «Ноябрьский».

При последовательном переборе параметров решение задачи закачки рассолов повторялось, анализировалось полученное решение и отклонение его от фактических данных. Для уменьшения отклонения решения задавались уточненные параметры, затем моделирование повторялось. Процесс итераций продолжался до тех пор, пока не достигалась приемлемая оценка средних отклонений (в пределах 5 %) [14].

Результаты исследования и их обсуждение

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

- в скважине № 101 – на глубинах от 150 до 193 м;
- в скважине № 102 – на глубинах от 165 до 199 м;
- в скважине № 105 – на глубинах от 145 до 188 м;
- в скважине № 106 – на глубинах от 145 до 187 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-коллекторы, согласно результатам расходомерии, отмечены в интервале глубин 145–190 м. В настоящее время участок обратной закачки «Ноябрьский» эксплуатируется в опытно-промышленном режиме с суммарной производительностью закачки до 430 м³/сут. (фактически в течение 2018–2022 гг. – до 320 м³/сут.) в режиме свободного налива на базе шести поглощающих скважин. В результате закачки дренажных вод в пределах изучаемого участка началось формирование техногенного водоносного горизонта: линзовидного скопления вод, формируемого в результате прямой подачи рассолов через скважины в коллекторы толщи многолетнемерзлых пород. По состоянию на январь 2022 г. в толщу многолетнемерзлых пород участка «Ноябрьский» закачано около 300 тыс. м³ минерализованных дренажных вод рудника «Айхал», в связи с этим сформированная линза характеризуется невыдержанными фильтрационными параметрами, а также измененным химическим составом закачанных вод. Это связано с растворением жильного льда толщи многолетнемерзлых пород, что сопряжено с уменьшением суммарной минерализации техногенного водоносного горизонта. Наиболее проницаемые зоны расположены в непосредственной близости от скважин в радиусе 25–30 м. По опыту эксплуатации подобных участков закачки Удачинского горно-обогатительного комбината, для формирования более выдержанного водоносного горизонта необходима закачка 1,5–2 млн м³ минерализованных дренажных вод.

Наибольший объем закачки осуществлялся в скважины № 2, 103, 104 (рис. 4).

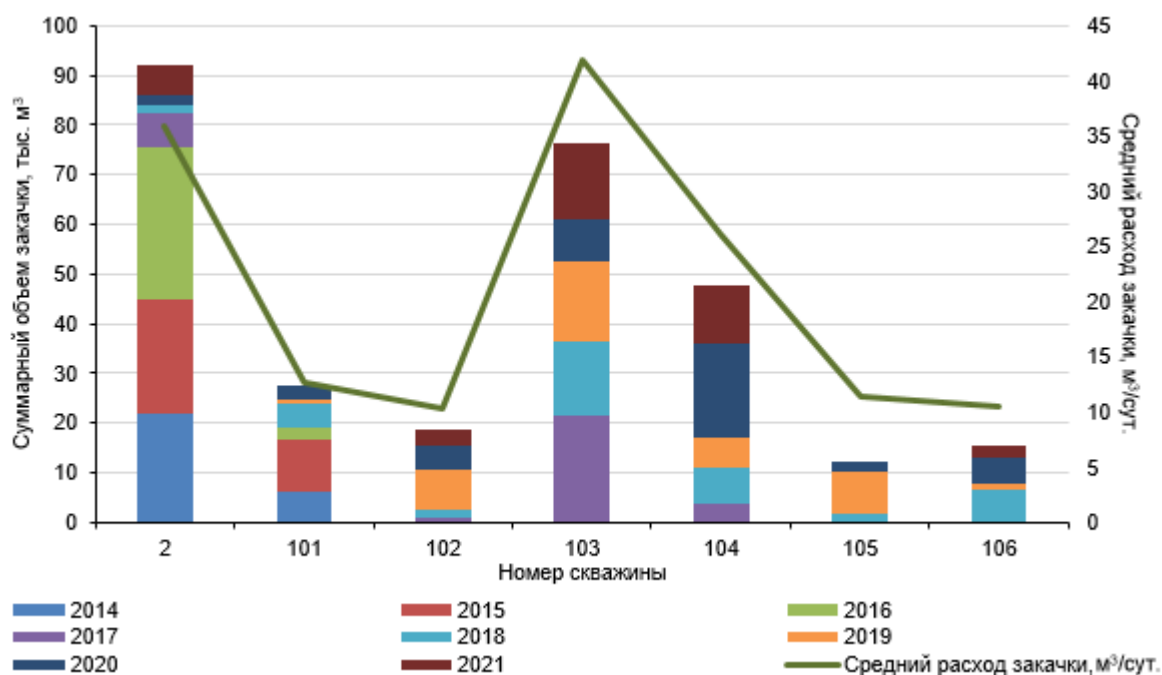


Рис. 4. Суммарные объемы закачки рассолов в эксплуатационные скважины участка «Ноябрьский»
Fig. 4. Total volumes of brine injection into production wells of the Noyabrskiy site

В настоящее время сформированная линза рассолов характеризуется неравномерными фильтрационными параметрами, что обусловлено особенностями тепло- и массопереноса при использовании толщи многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод [15, 16]. Существующим проектом на руднике предусмотрен отдельный сбор природных рассолов на горизонте +100 м, из водосборника горизонта рассолы перекачиваются на дневную поверхность в специальную емкость, откуда автомобильным транспортом доставляются на участок «Ноябрьский». В холодный период за время доставки рассолы успевают охладиться до температуры -10°C . При закачке данных рассолов в толщу многолетнемерзлых пород происходит формирование

поля пониженных температур, так как изначально температура многолетнемерзлых пород составляет $-3...-4^{\circ}\text{C}$, то есть при формировании техногенного водоносного горизонта образуется не талик, а своеобразный криопэг. Основные параметры закачки по скважинным приведены в табл. 1.

По данным опытно-фильтрационных работ, водопроводимость техногенного горизонта составляет $13-90 \text{ м}^2/\text{сут.}$, пьезопроводность $-n \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{сут.}$, что характерно для субнапорного либо безнапорного режима фильтрации (табл. 2).

Изменение уровня воды техногенного горизонта в толще многолетнемерзлых пород и уровня воды в нижнеордовикском межмерзлотном водоносном комплексе, по данным

Таблица 1. Основные параметры по опытным скважинам участка «Ноябрьский»
Table 1. Main parameters for pilot wells of the Noyabrskiy site

Номер скважины	Дебит налива, $\text{м}^3/\text{ч}$	Повышение уровня, м	Фактическое (полученное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Расчетное (максимальное) давление на подошву поглощающих коллекторов, атм.	Удельное водопоглощение, $\text{м}^3/\text{ч}$ на 1 м
101	15	8,3	4,8	17	1,8
103	15	8	3,5	17	1,9
104	15	2,9	3,1	17	5,2
106	15	4,8	4,7	17	3,1



Таблица 2. Фильтрационно-емкостные параметры по опытным скважинам участка «Ноябрьский»
Table 2. Porosity and permeability of pilot wells of the Noyabrsky site

Номер скважины	Год	Водопроницаемость, м ² /сут.	Пьезопроводность, м ² /сут.	Приемистость, м ³ /сут.
101	2018	27,7	$2,3 \cdot 10^5$	311–411
102	2019	52,3	$1,6 \cdot 10^4$	340,12
103	2020	89,87	$4,7 \cdot 10^4$	253,8
104	2020	59,64	$1,8 \cdot 10^4$	791,9
105	2019	12,98	$6 \cdot 10^3$	644
106	2018	61,5	800	281–682

режимных наблюдений, с учетом небольших объемов закачки не дает представления о распространении рассолов ниже выделенных коллекторов. На данном этапе закачки рассолов дренажные воды распространяются в основном по выделенным коллекторам, а также в свободном ото льда трещинном пространстве нижележащих толщ пород, что видно по понижению уровня в скважинах в периоды простоя между периодами закачки рассолов (рис. 5).

Распределение дренажных рассолов в плане можно проследить по появлению воды в наблюдательных скважинах, расположенных в периферийной части (рис. 6). В конце 2014 г. было отмечено появление подземных вод в скважинах 3н и 5н, расположенных в северной и западной частях исследуемого участка, с минерализацией 149 г/л. В 2018 г.

появление рассолов, в свою очередь, было отмечено в скважинах 1н (восточная часть) и 4н (западная часть) с минерализацией 143 и 65 г/л.

По последним данным (сентябрь 2022 г.), минерализация подземных вод, отобранных в скважинах участка закачки, составляет 60–80 г/л при средней минерализации закачиваемых рассолов в предыдущий год 100 г/л. С января по май закачка производилась в скважины 103, 104, что повлияло на минерализацию воды в скважине 1н. Основной объем закачки (70 %) производится с июня по ноябрь с минерализацией вод 66–87 г/л. Так как данная минерализация является равновесной при температуре многолетнемерзлых пород $-3...-2$ °С, то можно предположить, что на данный момент растекание вод происходит в основном по открытым трещинам (рис. 7) [17–19].

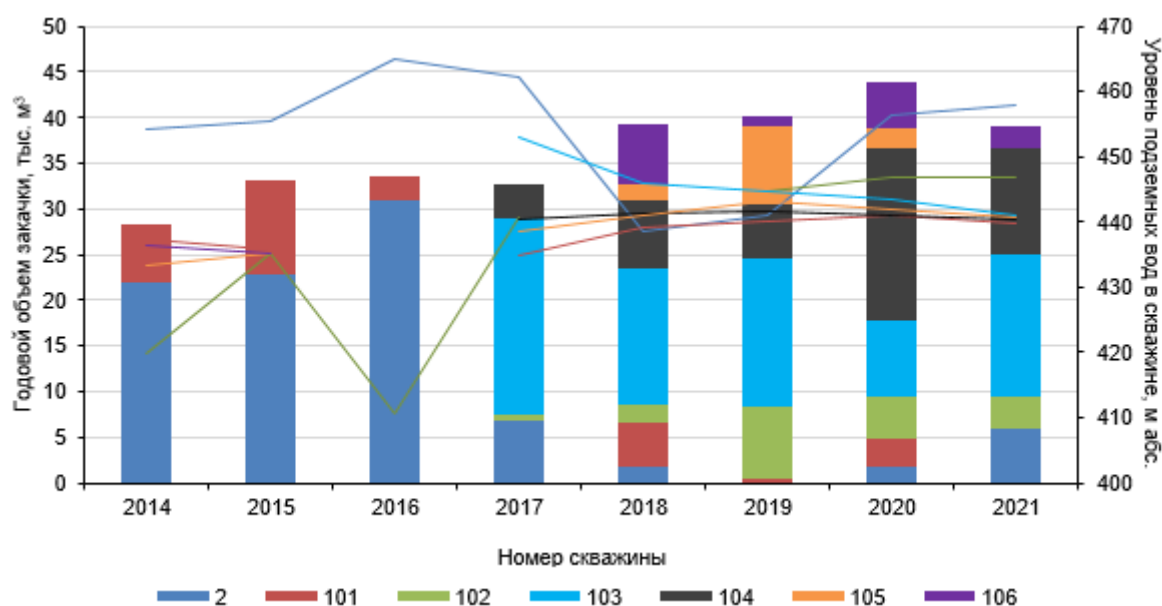


Рис. 5. Изменение уровня техногенного горизонта по замерам в эксплуатационных скважинах в зависимости от объемов закачки рассолов в многолетнемерзлые породы

Fig. 5. Variations of the technogenic horizon level according to the measurements in production wells depending on the volume of brine injection into permafrost

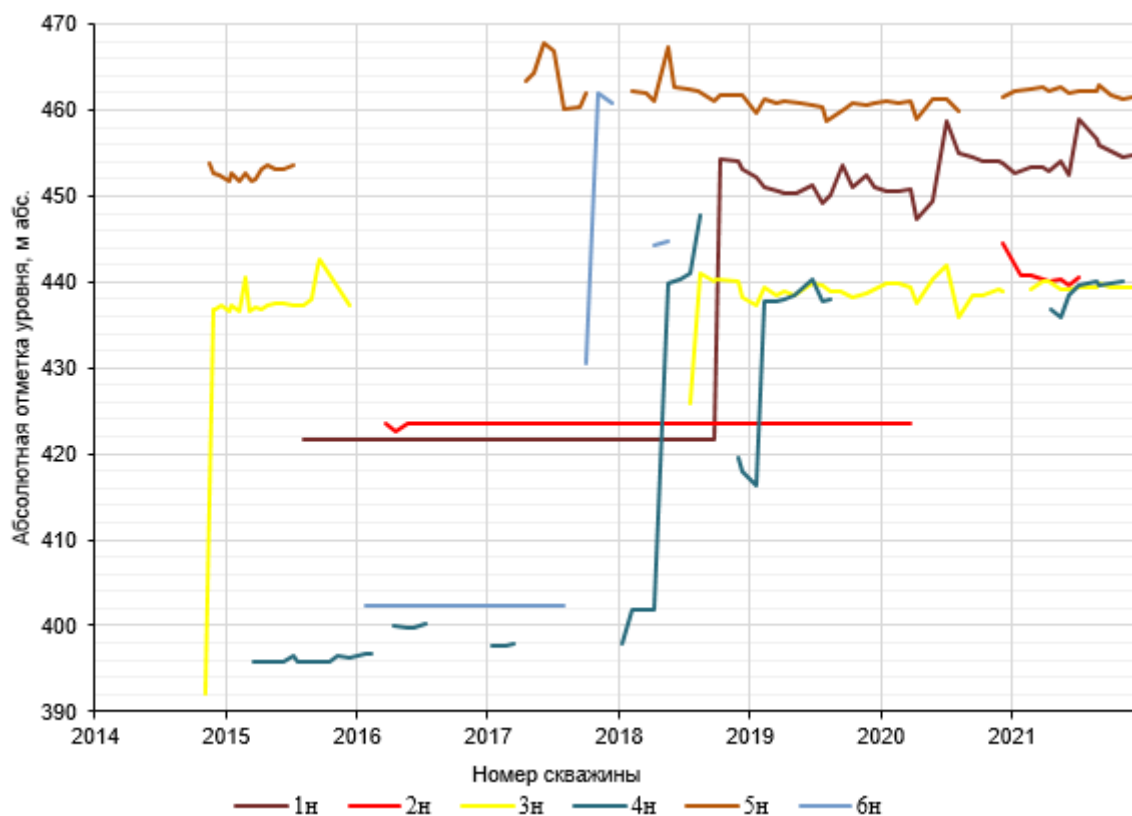


Рис. 6. Изменение уровня подземных вод в техногенном горизонте по данным режимных наблюдений в наблюдательных скважинах
Fig. 6. Groundwater level variations in the technogenic horizon according to the data of monitoring observations in observation wells

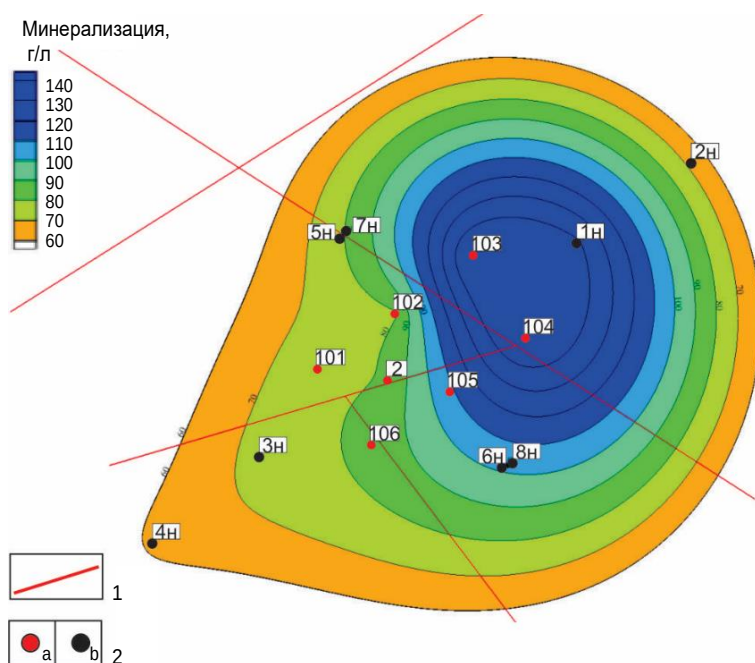


Рис. 7. Изменение минерализации в плане по данным на 2022 г.:
1 – разрывные нарушения;
2 – скважины: а – закачные, б – наблюдательные
Fig. 7. Mineralization variation in the plan according to the data for 2022:
1 – discontinuous faults;
2 – wells: a – injection wells, b – observation wells



Прогнозное моделирование изменения уровня режима техногенного водоносного горизонта в процессе эксплуатации участка «Ноябрьский» было выполнено при следующих условиях:

- граничное условие второго рода в водоупонных скважинах;
- перекрывающая и подстилающая техногенный водоносный горизонт толща многолетнемерзлых пород также задавалась границей второго рода с $Q = 0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- коллекторы толщи многолетнемерзлых пород задавались как «сухой грунт», то есть до начала захоронения рассолов многолетнемерзлых пород не содержали жидкую фазу в трещинно-поровом пространстве; с этой точки зрения процесс захоронения рассолов подобен фильтрации в «сухой грунт» с присущим ему фронтом продвижения границы раздела между «сухим» и насыщенным грунтом [20];
- вертикальный массоперенос в зонах разрывных нарушений (переток закачиваемых рассолов в нижезалегающий нижеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс) задавался полупроницаемой границей третьего рода.

Для проведения прогнозных расчетов с определением достаточности емкости участка на весь период эксплуатации месторождения Айхал на модели были заданы следующие условия:

- в качестве начального положения уровней приняты их значения на конец 2021 г.;
- параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени;
- расход закачки дренажных рассолов принят согласно календарному плану отработки месторождения (суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам) (табл. 3).

По результатам прогнозного моделирования построены схемы гидроизопьез в техно-

генном горизонте по состоянию на 2027 г., 2032 г. и на конец отработки месторождения (2044 г.) (рис. 8, 9). Сформирована сложнопостроенная линза, характеризующаяся большим градиентом напора от закачных скважин к периферии участка. На конец моделируемого периода техногенный водоносный горизонт не выходит за пределы горного отвода участка.

Для определения потенциальной полезной емкости на созданной модели были заданы следующие условия:

- в качестве начального положения уровней принимались их значения на конец 2021 г.;
- параметры модели приняты на основе решения обратной задачи с учетом изменения их во времени;
- заданный средний расход закачки дренажных рассолов составил $760 \text{ м}^3/\text{сут.}$;
- суммарный расход закачки распределяется равномерно по всем закачным скважинам.

Критериями исчерпания емкости участка являлись следующие факторы:

- повышение уровня в эпицентре закачки до отметки +583 (глубину 50 м от дневной поверхности);
- площадное распространение техногенного горизонта за пределы горного отвода.

В результате остаточная прогнозная полезная емкость участка «Ноябрьский» на январь 2022 г. была оценена в 6,1 млн м^3 . Если учесть прогнозный объем закачки дренажных вод рудника «Айхал», который в период с 2022 по 2044 гг. составит порядка 3 млн м^3 , можно сделать вывод, что использование участка закачки «Ноябрьский» в объеме не более 157 тыс. м^3 в год с расходом до $430 \text{ м}^3/\text{сут.}$ обеспечивается в полном объеме только емкостными параметрами коллекторов толщи многолетнемерзлых пород без учета перетока закачиваемых рассолов из многолетнемерзлых пород в нижеордовикский межмерзлотный

Таблица 3. Расходы закачки, заданные при моделировании
Table 3. Injection rates specified in simulation

Период времени, гг.	Расход закачки, $\text{м}^3/\text{сут.}$
2022–2029	310
2029–2039	410
2039–2044	430

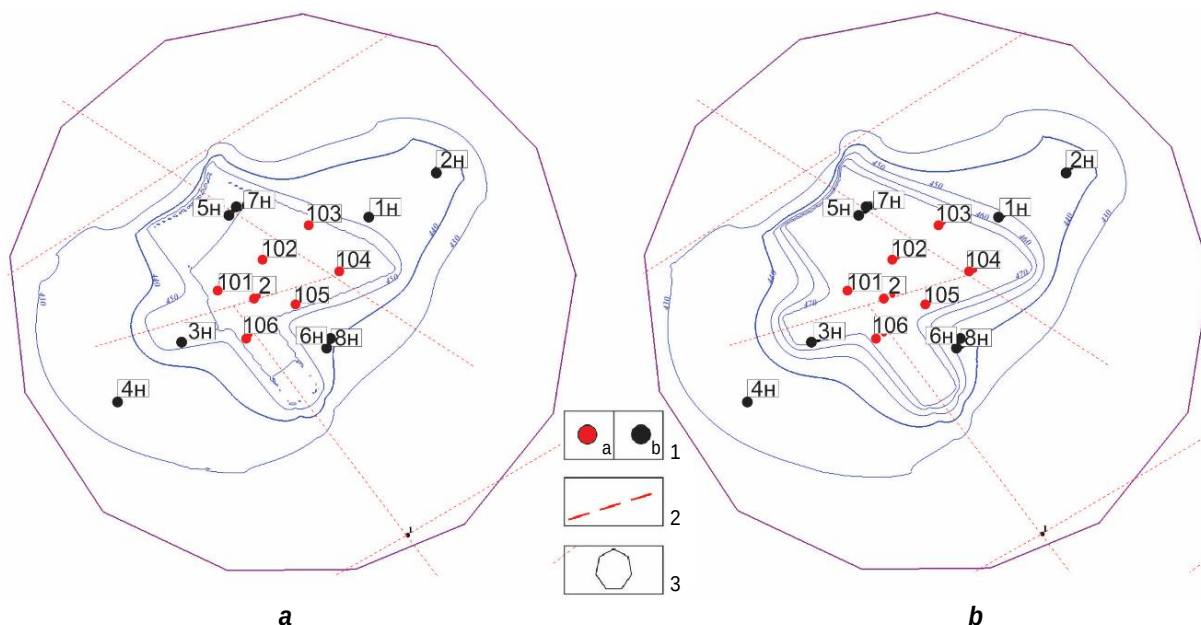


Рис. 8. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте по состоянию на 2027 г. (а) и 2032 г. (б):

1 – скважины: а – закачные, б – наблюдательные; 2 – разрывные нарушения;
3 – горный отвод участка «Ноябрьский»

Fig. 8. Predicted distribution of the groundwater level in the technogenic horizon as of 2027 (a), 2032 (b) year:
1 – wells: a – injection wells, b – observation wells; 2 – faults; 3 – located claim of the Noyabrsky site

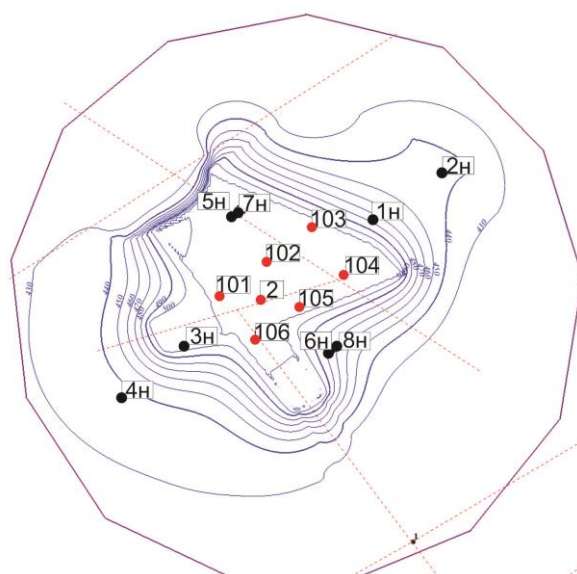


Рис. 9. Прогнозное распределение уровня подземных вод в техногенном горизонте на конец отработки (2044 г.)

Условные обозначения см. на рис. 8

Fig. 9. Predicted distribution of the groundwater level in the technogenic horizon at the end of mining (2044)
See the legend on fig. 8

водоносный комплекс. Формирование вертикального массопереноса из техногенного водоносного горизонта в нижележащий нижеордовикский межмерзлотный водоносный комплекс произойдет в процессе дальнейшей эксплуатации участков закачки после формирования упругого режима фильтрации.

Заключение

Техногенный водоносный горизонт в пределах участка «Ноябрьский» в настоящее время находится в процессе формирования, так как на данный момент использовано менее 5 % от полезной емкости участка. Тем не менее уже произошло объединение отдельных спо-



радиических линз в единый горизонт, в котором происходят процессы трансформации закачиваемых вод с плановым изменением как минерализации, так и макрокомпонентного состава.

В результате выполненного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Уровень в эпицентре закачки за весь период эксплуатации не превысит экологически безопасных отметок (+581...+583 м абс.). На конец отработки месторождения (2044 г.) по результатам прогнозного моделирования абсолютная отметка уровня в закачных скважинах составит +511 м, что ниже отметки дневной поверхности на 120 м.

2. Площадь растекания дренажных вод в многолетнемерзлых породах не выйдет за пределы границ лицензионного участка до конца отработки месторождения трубы Айхал.

Выполненное прогнозное моделирование подтвердило отсутствие экологических рисков в результате эксплуатации участка как минимум до 2044 г.

Дальнейшая эксплуатация участка закачки

«Ноябрьский» приведет к развитию сформированного техногенного водоносного горизонта, существенно ограниченного по площади. Прогнозная площадь техногенного водоносного горизонта и сопряженных зон вертикального переноса в нижезалегающий нижеордовикский водоносный горизонт составит не более 7 км².

На основе результатов прогнозного моделирования техногенного водоносного горизонта можно сделать вывод, что использование метода закачки дренажных вод рудника «Айхал» в толще многолетнемерзлых пород на участке «Ноябрьский» позволяет уменьшить степень влияния горных и добычных работ на геологическую среду изучаемого района, локализовав ее на планово ограниченном сравнительно небольшом по площади участке. Таким образом, экологически безопасная эксплуатация участка закачки «Ноябрьский», исключающая попадание в поверхностные воды дренажных рассолов, возможна как минимум до 2044 г., то есть до конца добычи на месторождении.

Список источников

1. Гриневский С.О. Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод. М.: Инфра-М, 2012. 152 с.
2. Колганов В.Ф., Акишев А.Н., Дроздов А.В. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. 576 с.
3. Климовский И.В., Готовцев С.П. Криолитозона Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Наука, 1994. 167 с.
4. Янников А.М., Янникова С.А., Овчинникова М.Ю., Корепанов А.Ю. Использование многолетнемерзлых пород для закачки дренажных вод коренных месторождений алмазов на примере участка «Ноябрьский» (рудник «Айхал») // Вестник Пермского университета. Геология. 2021. Т. 20. № 3. С. 284–299. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>.
5. Дроздов А.В. Захоронение дренажных рассолов в многолетнемерзлых породах (на примере криолитозоны Сибирской платформы). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 295 с.
6. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР / ред. А.И. Ефимов, И.К. Зайцев. М.: Недра, 1970. 384 с.
7. Толстихин О.Н., Шепелев В.В., Никитина Н.М. [и др.]. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / отв. ред. П.И. Мельников. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.
8. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.
9. Янников А.М. Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия)). Мирный: Изд-во ЗЯНЦ/ЯНА, 2022. 131 с.
10. Chen M., Izady A., Abdalla O.A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model // Journal of Hydrology. 2017. Vol. 544. P. 591–603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>.
11. Hughes J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D., McDonald R.R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability // Environmental Modelling & Software. 2022. Vol. 148. P. 105257. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>.
12. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW // Ground Water. 2012. Vol. 50. Iss. 6. P. 918–926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.
13. Ameli A.A., Craig J.R. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction // Hydrology Research. 2017. Vol. 49. Iss. 1. P. 17–26. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.201>.
14. Hill M.C., Cooley R.L., Pollock D.W. A controlled experiment in ground water flow model calibration // Groundwater. 1998. Vol. 36. Iss. 3. P. 520–535. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02824.x>.
15. Акулова В.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Худоногова Е.В. Техногенные новообразования как результат взаимодействия мерзлого массива пород и дренажных рассолов. Подземная гидросфера: матери-



алы Всерос. совещ. по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2006. С. 358–361.

16. Алексеев С.В., Дроздов А.В., Дроздова Т.И., Алексеева Л.П. Первый опыт захоронения соленых дренажных вод карьера трубки Удачная в многолетне-мерзлые породы // Криосфера Земли. 2002. Т. 6. № 2. С. 61–65.

17. Алексеев С.В., Гунин В.И., Дроздов А.В. [и др.]. Особенности миграции высокоминерализованных стоков карьера трубки Удачная в многолетнемерзлых породах при их подземном захоронении // Тезисы докладов III конференции геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 5–12.

18. Янников А.М., Трифонов Н.С., Лепокурова О.Е. Влияние разрывных нарушений на обводнение и газо-

носность глубоких горизонтов трубки «Айхал» (Республика Саха (Якутия)) // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2021. № 1. С. 104–113. <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>.

19. Боровская В.А., Гаврилов И.Т., Грабовников В.А., Егоров Н.Н., Ефимова И.В., Зильберштейн Б.М. [и др.]. Гидрогеологические исследования для обоснования подземного захоронения промышленных стоков / ред. В.А. Грабовников. М.: Недра, 1993. 335 с.

20. Дроздов А.В. Оценка перспективности участка «Левобережный» для захоронения дренажных рассолов трубки «Удачной» // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 1. С. 146–156.

References

1. Grinevskii S.O. *Hydrogeodynamic modeling of underground and surface water interaction*. Moscow: Infra-M; 2012. 152 p. (In Russ.).

2. Kolganov V.F., Akishev A.N., Drozdov A.V. *Mining and geological features of primary diamond deposits in Yakutia*. Mirny: LAP Lambert Academic Publishing; 2015. 576 p. (In Russ.).

3. Klimovskii I.V., Gotovtsev S.P. *Cryolithozone of the Yakutsk diamondiferous province*. Novosibirsk: Nauka; 1994. 167 p. (In Russ.).

4. Yannikov A.M., Yannikova S.A., Ovchinnikova M.Yu., Korepanov A.Yu. Using permafrost for pumping drainage water from primary diamond deposits on the example of the Noyabrskiy site (Aykhel mine). *Vestnik Permского университета. Geologiya = Bulletin of Perm University. Geology*. 2021;20(3):284-299. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.20.3.284>.

5. Drozdov A.V. *Drainage brine burial in permafrost (on the example of the permafrost zone of the Siberian Platform)*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2007. 295 p. (In Russ.).

6. Efimov A.I., Zaitsev I.K. *Hydrogeology of the USSR. Vol. 20. Yakut ASSR*. Moscow: Nedra; 1970. 384 p. (In Russ.).

7. Tolstikhin O.N., Shepelev V.V., Nikitina N.M., et al. *Permafrost-hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 191 p. (In Russ.).

8. Drozdov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V. *Cryohydrogeology of diamond deposits in Western Yakutia*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2008. 507 p. (In Russ.).

9. Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Alakit–Markhin kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutiya))*. Mirny: ZYANTS/YANA; 2022. 131 p. (In Russ.).

10. Chen M., Izady A., Abdalla O.A. An efficient surrogate-based simulation-optimization method for calibrating a regional MODFLOW model. *Journal of Hydrology*. 2017;544:591-603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.011>.

11. Hughes J.D., Russcher M.J., Langevin C.D., Morway E.D., McDonald R.R. The MODFLOW application programming interface for simulation control and software interoperability. *Environmental Modelling & Software*.

2022;148:105257. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105257>.

12. Kelson V. Predicting collector well yields with MODFLOW. *Ground Water*. 2012; 50(6):918-926. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00910.x>.

13. Ameli A.A., Craig J.R. Semi-analytical 3D solution for assessing radial collector well pumping impacts on groundwater-surface water interaction. *Hydrology Research*. 2017;49(1):17-26. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.201>.

14. Hill M.C., Cooley R.L., Pollock D.W. A controlled experiment in ground water flow model calibration. *Groundwater*. 1998;36(3):520-535. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02824.x>.

15. Akulova V.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Khudonogova E.V. Technogenic neocrystallisations as a result of the frozen rock mass and drainage brine interactions. In: *Podzemnaya gidrosfera: materialy Vseros. soveshch. po podzemnym vodam vostoka Rossii = Underground hydro-sphere: proceedings of All-Russian meeting on underground waters of the Russian East*. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2006, p. 358–361. (In Russ.).

16. Alekseev S.V., Drozdov A.V., Drozdova T.I., Alekseeva L.P. The first experience of burial of saline drainage waters of Udachnaya pipe quarry into permafrost. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2002;6(2):61-65. (In Russ.).

17. Alekseev S.V., Gunin V.I., Drozdov A.V., et al. Migration features of highly mineralized effluents under the Udachnaya pipe open pit in permafrost under their underground burial. In: *Tezisy докладов III konferentsii geokriologov Rossii = Report abstracts of 3rd conference of Russian geocryologists*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2005, p. 5–12. (In Russ.).

18. Yannikov A.M., Trifonov N.S., Lepokurova O.E. The impact of faults on the water inflow and gas content of the deep levels of the Aikhal pipe (republic of Sakha (Yakutiya)). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2021;1:104-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/geology.2021.1/3342>.

19. Borevskaya V.A., Gavrilov I.T., Grabovnikov V.A., Egorov N.N., Efimova I.V., Zil'bershtein B.M., et al. *Hydro-*



geological studies to justify the underground disposal of industrial wastewater. Moscow: Nedra; 1993. 335 p. (In Russ.).

20. Drozdov A.V. Evaluation of "Levoberezhny" site perspective for burying drainage brines of pipe "Udachnaya". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk*

o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2013;1:146-156. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors



Янников Алексей Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
заместитель директора по научной работе,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
✉ yannikov90@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>
Aleksey M. Yannikov,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Deputy Director for Research,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
✉ yannikov90@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0002-2169-123X>



Стручкова Агита Сергеевна,
заведующая сектором гидрогеологического
и гидродинамического моделирования,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
StruchkovaAS@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>
Agita S. Struchkova,
Head of the Sector of Hydrogeological and Hydrodynamic Modeling,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
StruchkovaAS@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7835-6048>



Корепанов Алексей Юрьевич,
заведующий Лабораторией горно-геологических
проблем разработки месторождений,
Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА» (ПАО),
г. Мирный, Россия,
KorepanovAYu@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>
Aleksey Yu. Korepanov,
Head of the Laboratory of Mining and Geological
Problems of Field Development,
"Yakutniproalmaz" Institute, PJSC "ALROSA",
Mirny, Russia,
KorepanovAYu@alrosa.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3593-2524>

Вклад авторов / Contribution of the authors

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
The authors contributed equally to this article.



Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 13.01.2023; одобрена после рецензирования 06.02.2023; принята к публикации 24.02.2023.

The article was submitted 13.01.2023; approved after reviewing 06.02.2023; accepted for publication 24.02.2023.